






Consortios nativos de hongos micorrízicos arbusculares y *Trichoderma* controlan a *Meloidogyne incognita* en chile habanero

Native consortia of arbuscular mycorrhizal fungi and *Trichoderma* control *Meloidogyne incognita* in habanero pepper

Jairo Cristóbal-Alejo¹ ,
José Alberto Ramos-Zapata² ,
Rene Garruña-Hernández¹ ,
María Manuela Reyes-
Estébanez³ ,
Elizabeth Herrera-Parra^{4*} 

¹Tecnológico Nacional de México-Campus Conkal, Km. 16.3 Antigua carretera Mérida-Motul, Conkal. CP. 97345. Yucatán, México.

²Departamento de Ecología Tropical. Campus de Ciencias Biológicas y Agropecuarias Universidad Autónoma de Yucatán. Km. 15.5 Carretera Mérida-Xmatkuil, CP. 97315. Mérida, Yucatán, México.

³Departamento de Microbiología Ambiental y Biotecnología. Universidad Autónoma de Campeche. Av. Agustín Melgar y Juan de la Barrera. Col. Buenavista. CP 24039. San Francisco de Campeche, México.

⁴Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental Mocochoá, Yucatán. Km. 25 Carretera Antigua a Mérida-Motul, Mocochoá, CP. 97454. Yucatán, México.

*Autor de correspondencia:
elian.herrera09@gmail.com

Nota científica

Recibida: 30 de mayo 2023

Aceptada: 23 de octubre 2023

Como citar: Cristóbal-Alejo J, Ramos-Zapata JA, Garruña-Hernández R, Reyes-Estébanez MM, Herrera-Parra E (2023) Consortios nativos de hongos micorrízicos arbusculares y *Trichoderma* controlan a *Meloidogyne incognita* en chile habanero. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 10(3): e3802. DOI: 10.19136/era.a10n3.3802

RESUMEN. Los nematodos agalladores afectan la producción de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) y el uso de microorganismos antagonistas son una opción para su control. El objetivo fue evaluar consorcios nativos de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) y *Trichoderma* spp. (TRI) para el manejo de *M. incognita* (Mi) en *C. chinense*. En condiciones protegidas se establecieron cinco tratamientos: HMA + Mi, TRI + Mi, HMA + TRI + Mi, nematicida Vydate 24% (Oxamil) + Mi y un control solo con Mi. Cada tratamiento tuvo 15 repeticiones. El tratamiento HMA + Mi, disminuyó el índice de agallamiento, el número de huevos y hembras en un 56, 48 y 26.29% con relación al Oxamil. El mayor crecimiento de las plantas se logró con HMA + Mi con efectos superiores al nematicida y el control. Los tratamientos HMA + Mi y HMA + TRI + Mi promovieron mejor funcionamiento fisiológico de las plantas.

Palabras clave: Antagonismo, *Capsicum chinense*, endoparásito sedentario, micorriza.

ABSTRACT. Root-knot nematodes affect the production of habanero pepper (*Capsicum chinense* Jacq.) and the use of antagonistic microorganisms is an option for their control. The objective was to evaluate native consortia of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and *Trichoderma* spp. (TRI) for the management of *M. incognita* (Mi) in *C. chinense*. Five treatments established under protected conditions: AMF + Mi, TRI + Mi, AMF + TRI + Mi, Vydate 24% nematicide (Oxamil) + Mi and a control with only Mi. Each treatment had 15 replicates. The AMF + Mi treatment decreased the galling index, the number of eggs and females by 56, 48 and 26.29% in relation to Oxamil. The highest growth of the plants achieved with AMF + Mi with higher effects than the nematicide and control. The AMF + Mi and AMF + TRI + Mi treatments promoted better physiological functioning of the plants.

Key words: Antagonism, *Capsicum chinense*, sedentary endoparasite, mycorrhizae.

INTRODUCCIÓN

En la Península de Yucatán, el chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) es un cultivo de importancia económica y social. En esta región se concentra el 35.55% de la producción nacional (SIAP 2022). En el estado de Yucatán se destinaron 312.65 ha para su cultivo, con un volumen de producción de 4 325.67 t con rendimientos promedios de 13.84 t ha⁻¹ (SIAP 2022). Los frutos son de uso cotidiano en la cocina regional, se utilizan para elaborar salsas y productos nutraceuticos (Lascurain-Rangel et al. 2022, Avilés-Bentazos et al. 2023). Sin embargo, durante su cultivo la incidencia de enfermedades son una limitante, lo cual varía la producción en cada ciclo agrícola (Cristóbal-Alejo et al. 2020). Una de las principales enfermedades es causada por el nematodo agallador, *Meloidogyne incognita* (Kofoid and White, Chitwood), el cual induce agallas (hipertrofia e hiperplasia) en la raíz, lo que bloquea el flujo de agua y nutrientes del sistema vascular e induce clorosis, caída de flores, frutos, marchitez, reducción de crecimiento y pérdidas de producción (Herrera-Parra et al. 2021a).

El uso de microorganismos de la rizosfera como los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) y especies de *Trichoderma*, reducen significativamente las poblaciones de nematodos en diversas especies de interés agrícola (Herrera-Parra et al. 2018, 2021a). Los HMA confieren protección a las plantas, al modificar la composición química de exudados radicales y al ocupar espacios en la raíz, activan mecanismos de defensa que limitan la penetración de nematodos (Asukwo-Udo et al. 2023, Herrera-Parra et al. 2023). También, estimulan el crecimiento de las plantas, lo que mejora la condición nutricional de éstas (Wahab et al. 2023). Las especies de *Trichoderma* producen metabolitos secundarios, que desorientan estadios infectivos de nematodos y disminuyen su penetración a la raíz, parasitan huevos y generan proteínas, ácido indol acético y sideróforos que en conjunto favorecen la nutrición y el crecimiento de los cultivos (Zhin y Badaluddin et al. 2020).

Así, la inoculación de consorcios de HMA y *Trichoderma* spp., en cultivos tropicales, han mostrado resultados promisorios para el control de patógenos

de la raíz (Sharman et al. 2021, Asukwo-Udo et al. 2023). Estos efectos se potencializan cuando se implementan cepas nativas, al mejorar su interacción y reproducción con otros microorganismos, debido a su coevolución y por estar adaptados a las condiciones ambientales de donde fueron extraídos (Compant et al. 2019). A diferencia de microorganismos introducidos en formulaciones comerciales, que fueron aislados en agrosistemas diferentes a donde son aplicados y son menos efectivos para el control de fitopatógenos (Cetz-Chi et al. 2018). En el sureste de México, son pocos los estudios que contemplan la evaluación de consorcios de cepas nativas de HMA y *Trichoderma* spp., como agentes de control biológico. Recientemente se reportó la efectividad de consorcios de estos microorganismos para el control de *M. incognita* en etapas iniciales de crecimiento de *C. annuum* (Herrera-Parra et al. 2023), pero se desconoce el efecto que pueden ejercer en consorcios en el patosistema *C. chinense*-*M. incognita*. En el presente estudio se planteó como objetivo, evaluar consorcios nativos de HMA y *Trichoderma* spp. para reducir el índice de agallamiento y reproducción de *M. incognita* en *C. chinense*, como estrategia de control biológico del nematodo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Origen de los consorcios de HMA y *Trichoderma* spp

Los consorcios de HMA fueron aislados de la reserva ecológica Cuxtal, ubicada en el estado de Yucatán, México en los 20° 52' 07.44" LN y 89° 36' 51.64" LO, donde predomina la vegetación selva baja tropical caducifolia (Herrera-Parra et al. 2021a). Forman parte de la colección de hongos micorrízicos arbusculares del departamento de ecología de la facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias de la Universidad Autónoma de Yucatán y la identificación se realizó considerando características morfotaxonómicas (Schenck y Pérez 1990, Schüßler y Walker 2010). Las especies de *Trichoderma* también se obtuvieron de la misma entidad, de sitios sin actividad agrícola en los últimos 30 años (Candelero et

al. 2015). Inicialmente la identificación de los hongos se realizó mediante características de cultivo y morfología del hongo (Barnett y Hunter, 1972), posteriormente las cepas fueron identificadas mediante análisis molecular y sus secuencias se encuentran en el GenBank con número de acceso: Th02-01-*T. harzianum*-C1 (MF952887), Th09-06 -*T. atroviridae* (MF078647), Th43-13 -*T. virens* (MF078644) y Th43-14 - *T. harzianum* (MF078649). Los que forman parte de la colección de hongos del laboratorio de fitopatología del Tecnológico Nacional de México campus Conkal.

Inoculación en semillero de *C. chinense*

El consorcio de HMA estuvo conformado por las especies: *Glomus ambisporum* G.S. Sm. & N.C. Schenck, *Claroideoglomus claroideum* C. Walker & A. Schussler y *Funnelliformis geosporum* C. Walker & A. Schüßler (antes *G. geosporum*), las cuales colonizan las raíces y promueven el crecimiento de *Capsicum* spp. (Herrera-Parra et al. 2021b). Las esporas se extrajeron de macetas de propagación (Gerdemann y Nicolson 1963). Posteriormente se esterilizó sustrato mediante arrastre de vapor durante tres días por 1 hora a 100 °C. Con este sustrato se llenaron charolas de germinación de 72 cavidades, donde se depositaron 54 esporas por cavidad que integró el consorcio de HMA (18 esporas por cada especie). Enseguida se sembró una semilla de chile habanero cv. Calakmul por cavidad, previamente desinfectada con hipoclorito de sodio al 1% durante dos minutos, seguidos de dos lavados con agua destilada estéril. El consorcio de *Trichoderma* estuvo integrado por las especies: *Trichoderma harzianum*-C1 Rifai *T. atroviride* P. Karst, *T. virens* J. H. Mill, Giddens & A. A. Fostery *T. harzianum*-C2 Rifai Se reactivaron en medio de cultivo papa-dextrosa-agar (PDA) DIBICO®. Posteriormente se prepararon concentraciones de 1×10^6 esporas mL⁻¹ (Cubillos et al. 2009), las cuales se inocularon en semillas de chile habanero cv. Calakmul al momento de la siembra en las charolas que contenía sustrato estéril comercial Sunshine®. Adicionalmente, se realizaron tres inoculaciones a los 10, 20 y 30 días después de la germinación. Para obtener plántulas inoculadas con

ambos consorcios, primero se inoculó el consorcio de HMA a las semillas y se dejaron transcurrir 30 días para realizar tres inoculaciones con el consorcio de *Trichoderma* spp., a los 31, 36 y 41 días después de la inoculación con los HMA. Las charolas se mantuvieron en invernadero a 28 ± 2 °C, con humedad relativa promedio de 64%. El riego se realizó con base a las lecturas de tensiómetros, estableciéndose como nivel mínimo 15 cbares.

Obtención de la fase infectiva del nematodo (J2) de *M. incognita*

Se muestrearon plantaciones comerciales de *C. chinense*, con agallas de *M. incognita*. De las agalladas se extrajeron masas de huevos y se desinfectaron con hipoclorito de sodio al 1%. Los huevos se incubaron a 28 ± 1 °C hasta la eclosión de los J2 (Herrera-Parra et al. 2021a). De las raíces agalladas se extrajeron hembras adultas para identificar la especie mediante caracteres morfotaxonómicos (Ayoub 1977).

Evaluación de consorcios de HMA y *Trichoderma* spp. como antagonistas de *M. incognita*

Con el suelo esterilizado se llenaron bolsas negras de vivero de 5 kg de capacidad. Previo al trasplante, se realizó un orificio de tres centímetros de diámetro y cinco centímetros de profundidad, con la ayuda de un tubo de policloruro de vinilo que cumplió con estas características, y se inoculó con 1 mL de agua que contenía 1 000 huevos larvados y 300 J2 de *M. incognita* enseguida se trasplantó una planta de *C. chinense* de 47 días de edad inoculadas con los consorcios. El manejo nutrimental de las plantas consistió en una fertilización con equilibrio químico 2:1:1 con urea (Magro, 46-00-00, Fertinova), nitrato de potasio (Ultrasol, 12-00-46, SQM) y fosfato monoamónico (MAP, 12-61-00 Greenhow) aplicada dos veces por semana. Se evaluaron cinco tratamientos: 1) HMA + Mi, 2) *Trichoderma* spp. + *M. incognita* (TRI + Mi), 3) HMA + *Trichoderma* spp. + *M. incognita* (HMA + TRI + Mi), 4) Nematocida oxamil 24% (Vydate®, Dupont) + *M. incognita*, en dosis de 1 mL L⁻¹ de agua aplicado al suelo al momento del trasplante (Oxamil + Mi) y 5) un control

+ *M. incognita*, (control + Mi). En cada tratamiento hubo 15 plantas que constituyeron las repeticiones y las unidades experimentales, distribuidas en un diseño experimental completamente al azar en condiciones de invernadero con temperatura de 28 ± 2 °C, humedad relativa de 64% e intensidad lumínica de 450 luxes en promedio. Los tratamientos se evaluaron después de 166 días después de la siembra (dds), como variables de control del nematodo, se consideró como severidad; el índice de agallamiento de la enfermedad (Taylor y Sasser 1983) y como índice de reproducción del nematodo; número de huevos y hembras por gramo de raíz. También, se midieron variables de crecimiento de las plantas: altura, biomasa aérea seca, área foliar, peso seco de raíz, volumen de raíz se determinó por el método descrito por Böhm (1979) para lo cual se introdujo la raíz de cada planta en una probeta graduada con agua tomando el dato del volumen de agua desplazado por las raíces. Y número y peso total de frutos. Adicionalmente, se estimó el porcentaje de colonización de HMA en cinco plantas por tratamiento (Phillips y Hayman 1970). Para confirmar la colonización por *Trichoderma*, en los tratamientos donde se inoculó se tomaron secciones de raíces del cultivo de 0.5 cm de largo y se sembraron en cajas de Petri con medio de cultivo de papa-dextrosa-agar y la presencia del hongo en este medio de cultivo, se consideró como persistencia del mismo. Con un analizador de gases en infrarrojo (Estados Unidos, Nebraska, LICOR LI-6400) se evaluó el intercambio de gases: fotosíntesis (A_N) ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), conductancia estomática (gs) ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), carbono intercelular (Ci) ($\mu\text{mol mol}^{-1}$), transpiración (E) ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) y eficiencia del uso del agua ($\mu\text{mol CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O}$) (Cristóbal-Alejo et al. 2022).

Análisis estadístico de datos

Con la información que se generó, se realizaron análisis de varianza (ANDEVA) y para el caso de los datos relacionados con el índice de agallamiento y colonización por los HMA estimados en porcentaje, se transformaron mediante la función de arco seno. Se realizó comparación múltiple de medias con el método de Tukey ($P \leq 0.05$), con el

paquete estadístico Statistical Analysis System, versión 9.3.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Efecto de consorcios de HMA y *Trichoderma* spp. en la intensidad de daño y reproducción de *M. incognita*

En las variables índice de agallamiento y reproducción del nematodo, se obtuvieron diferencias significativas entre tratamientos ($P < 0.001$). El menor índice de agallamiento del nematodo se obtuvo con el tratamiento HMA + Mi, las plantas mostraron hasta un 60.00% de raíces libres de agallas, con relación a las plantas de los tratamientos HMA + TRI + Mi, Oxamyl + Mi y el control, donde el índice de agallamiento fue de 75.50 a 83.00%. Con el tratamiento TRI + Mi se tuvo un 18.00% de raíces sanas, con relación al control y presentó el mismo efecto que con los tratamientos, HMA + TRI + Mi y Oxamyl + Mi (Tabla 1). La inoculación solo con HMA o *Trichoderma* spp, confirieron un efecto protector en *Capsicum* spp. en etapas tempranas de crecimiento y disminuyeron la severidad de la enfermedad con índices de agallamiento del 74.00 al 82.91% (Herrera-Parra et al. 2018, Herrera-Parra et al. 2021a). El tratamiento de HMA+TRI+MI, no causó el efecto esperado en la disminución de la severidad en la enfermedad causada por el nematodo, como ocurrió en el tratamiento HMA + Mi, es posible que el consorcio de *Trichoderma* spp. haya limitado su colonización en la rizosfera por competencia inter e intra específica por el consorcio utilizado. Al respecto, se ha señalado que los metabolitos que producen este hongo, al tener un efecto antimicrobial, pueda incidir en su efectividad como agente de control biológico o como promotor de crecimiento vegetal (Vinale et al. 2008, Tucci et al. 2011) y el efecto benéfico lo causó el consorcio integrado por los HMA. En general se observó que la inoculación en consorcio de HMA y *Trichoderma* spp., causaron supresión del nematodo con lo que se redujo el índice de agallamiento en *C. chinense* en etapa de producción del cultivo. La mejor supresión del nematodo lo causó el tratamiento con el consorcio de HMA con efectos superior al tratamiento

Tabla 1. Efecto de consorcios de hongos micorrízicos arbusculares y *Trichoderma* spp., en la reproducción de *M. incognita* en plantas de chile habanero (*C. chinense*).

Tratamientos	Índice de agallamiento %	Variables de reproducción del nematodo	
		Número de huevos por g de raíz (g)	Número de hembras por g de raíz (g)
HMA + Mi	33.00 ± 8.49 ^c	460.00 ± 101.27 ^d	37.00 ± 4.06 ^c
TRI + Mi	68.00 ± 10.54 ^b	1597.20 ± 56.98 ^b	63.60 ± 2.70 ^a
HMA + TRI + Mi	78.00 ± 12.90 ^{ab}	779.00 ± 61.13 ^c	37.60 ± 3.43 ^c
Oxamil + Mi	75.50 ± 13.17 ^{ab}	887.40 ± 55.56 ^c	50.20 ± 4.20 ^b
Control + Mi	83.00 ± 10.54 ^a	1900.40 ± 46.63 ^a	58.60 ± 1.14 ^a
DMS	14.31	126.97	6.25

La tabla muestra promedios ± desviación estándar. n = 15. DMS = diferencia mínima significativa. Letras iguales dentro de misma columna son estadísticamente iguales (Tukey, $P \leq 0.05$). HMA = Consorcio de hongos micorrízicos arbusculares. TRI = Consorcio de *Trichoderma* spp. Mi = *Meloidogyne incognita*. Oxamil = Vydate 1 ml L⁻¹ de agua.

nematicida (Tabla 1). La reducción en el índice de agallamiento se ha asociado con la producción de fenoles, flavonoides y ácidos orgánicos contenidos en los exudados radicales, que se producen cuando los HMA están en interacción simbiótica con las raíces, lo que paraliza a la fase infectiva del nematodo (J2), y disminuye la penetración de éstos en la raíz (Diagne et al. 2020). En reportes previos, *Trichoderma* spp. inmovilizó a los J2, debido a la producción de metabolitos secundarios como: viridina, gliotoxina, gliovirina, peptaiboles, trichodermina, suzukacilina y alameticina, incluso el hongo puede parasitar huevos y J2 del nematodo (Zin y Badaluddin et al. 2020, Moo-Koh et al. 2022) lo que disminuye su población y con ello menor severidad en las raíces.

En el índice de reproducción del nematodo en las plantas del tratamiento control + Mi, tuvieron mayor número de huevos (1900.40 ± 46.63) y hembras por gramo de raíz (58.60 ± 1.14). Una reducción significativa de la reproducción del nematodo se logró con el tratamiento HMA + Mi, con reducciones en la formación de huevos de 48.16 y 72.78% y de hembras por gramo de raíz de 26.29 y 36.86%, en relación a los tratamientos de Oxamyl + Mi y el control + Mi, respectivamente. También, el tratamiento HMA + TRI + Mi tuvo efecto igual al Oxamyl + Mi, disminuyó 59.00% la formación de huevos y un 35.83% de hembras, con relación al control + Mi (Tabla 1). Estos resultados sugieren que los consorcios de microorganismos evaluados, HMA, HMA + *Trichoderma* spp., establecieron interacciones positivas que limitaron el parasitismo del nematodo como ocurrió en cultivos de *Cicer arietinum* L., *Ocimum basilicum* L. inoculados

con consorcios de HMA, *Trichoderma* spp., *Bacillus* spp., que tuvieron reducciones de *M. incognita* del 46.00 al 95.00% (Rizvi et al. 2018, Tiwari et al. 2021). Varios modos de acción están implicados en el control de nematodos: competencia entre HMA y J2 para ocupar sitios en la raíz y por fuentes carbonadas, activación de mecanismos de defensa de la planta asociados con la activación de genes que codifican quitinasas, implicadas en la desintoxicación de especies reactivas de oxígeno, que se producen durante la hipertrofia y muerte celular inducida por nematodos al parasitar raíces, como la glutatión S-transferasa o la superóxido dismutasa, fitoalexinas, involucradas en la biosíntesis de la lignina, precursora de metabolitos secundarios aromáticos que afectan la viabilidad de huevos y movilidad de J2 (Poveda et al. 2020, Moo-Koh et al. 2022).

Con el tratamiento TRI + Mi, consorcio de *Trichoderma* spp., se obtuvo el menor efecto de supresión del nematodo, con relación a los tratamientos que incluyeron consorcios microbianos Oxamyl + Mi (Tabla 1). Al respecto, la mayoría de los estudios reportan los resultados de las evaluaciones individuales de *Trichoderma* spp. o de sus metabolitos (Herrera-Parra et al. 2018, Cristóbal-Alejo et al. 2021). Pero, cuando se realizan inoculaciones duales o en consorcio pueden inhibir el crecimiento de hongos, incluyendo otras especies de *Trichoderma* (Moo-Koh et al. 2018), lo cual puede estar asociado a la incompatibilidad entre especies que integran el consorcio evaluado; además, las cepas entran en competencia por nutrientes y espacios para asegurar su supervivencia, lo que también limitan su capacidad en el

biocontrol del nematodo.

Colonización total

Los tratamientos que presentaron mayor colonización micorrízica ($P < 0.001$) fueron HMA + Mi con 90.36% y HMA + TRI + Mi con 93.97%. Este último, incluyó la inoculación de *Trichoderma* spp., y no limitó la colonización micorrízica del cultivo. En los tratamientos TRI + Mi, Oxamil + Mi y control + Mi no hubo colonización micorrízica. En estudios con *S. melongena*, parasitada *M. javanica*, también la colonización fue alta (68.20%) y no fue afectada por la inoculación de consorcios integrados por *G. mosseae*, *Gi. gigantea* y *P. fluorescens* (Sharman et al. 2021). Lo cual puede estar asociado al origen de los microorganismos que se inoculan en consorcio, y la compatibilidad que existe al aislarse del mismo lugar de origen.

Efecto de consorcios de hongos micorrízicos arbusculares y *Trichoderma* spp, en el crecimiento, producción y fisiología de *C. chinense*

Hubo diferencias significativas entre tratamientos ($P < 0.001$) para el crecimiento. Los HMA y la combinación con las cepas de *Trichoderma* favorecieron el crecimiento de las plantas con efectos en su mayoría igual al obtenido con el tratamiento Oxamil + Mi. La mayor altura de plantas (66.30 ± 1.49) se obtuvo con el HMA + Mi, su efecto en la promoción de crecimiento fue mejor al resto de los tratamientos y al control + Mi. Los tratamientos HMA + TRI + Mi y Oxamil + Mi, tuvieron la misma capacidad para favorecer el crecimiento en altura de las plantas hasta 61.60 cm en promedio y fueron estadísticamente diferentes al resto de los tratamientos. Un efecto significativo para incrementar la biomasa foliar se logró con HMA + Mi y HMA + TRI + Mi, las plantas incrementaron un 24.23% de biomasa con relación al Oxamil + Mi y el control + Mi, con 24.04 gramos en promedio. El área foliar incrementó 81.60% con los tratamientos HMA + Mi, HMA + TRI + Mi, Oxamil + Mi, con relación al control + Mi (Tabla 2). Los efectos benéficos de los HMA, están asociados con las hifas extrarradicales que funcionan como una extensión de las raíces y exploran mayor área y espacios porosos

del suelo, donde toman y translocan a la planta nutrientes como fósforo, nitrógeno y potasio (Vergara et al. 2019). Adicionalmente, *Trichoderma* produce ácido cumárico, glucurónico y cítrico que facilitan la disponibilidad de fósforo, zinc, magnesio, manganeso y sideróforos que actúan como compuestos quelantes de hierro (Sood et al. 2020) lo que contribuyen a la nutrición y crecimiento del cultivo; además, produce metabolitos secundarios identificados como HYTLO1, ácido harziánico y 6-pentil pirona (Marra et al. 2022) asociados a la promoción de crecimiento que se refleja en plantas con mayor vigor y producción de biomasa.

Con el tratamiento HMA + Mi se obtuvieron raíces con un volumen de 88.50 cm^3 , y raíces un 43.98 y 35.59% de mayor tamaño que las del control + Mi y tratadas con Oxamil + Mi y HMA + TRI + Mi, respectivamente (Tabla 2). El crecimiento de raíces está asociada con la capacidad de los HMA para modificar el crecimiento y morfología de la raíz, lo que incrementa su área y compensa el daño que realizan la población del nematodo (Diagne et al. 2020). En el caso de *Trichoderma*, se reporta la producción del ácido 3-indol acético y cisteínas que estimulan la elongación de raíces, lo que mejora la superficie de la raíz, la colonización por este hongo y potencializa la absorción de agua y nutrientes (Nieto-Jacobo et al. 2017, Sood et al. 2020).

El mayor número de frutos se obtuvo con los tratamientos HMA + Mi, HMA + TRI + Mi y Oxamil + Mi, hasta un 70.00% más de frutos que en las plantas del tratamiento con TRI + Mi y el tratamiento control + Mi. Así mismo, el mayor peso de frutos se produjo con HMA + Mi, HMA+ TRI+ Mi y tuvieron un 42.37% más frutos que el tratamiento nematicida (Oxamil + Mi) y hasta un 79.26% más que el TRI + Mi y el control + Mi (Tabla 3). En estudios previos, se reportaron los beneficios de la aplicación en consorcio de estos microorganismos. Así, con la inoculación de *T. harzianum* y *G. mosseae* incrementaron rendimiento de frutos de *S. lycopersicum* ($8.2 \text{ kg planta}^{-1}$), sin afectaciones en la actividad antioxidante, flavonoides totales y el contenido de vitamina C (Nzanza et al. 2012). Con el consorcio integrado por *G. mosseae*, *Gi. gigantea* y *P. fluorescens* re-

Tabla 2. Efecto de consorcios de hongos micorrízicos arbusculares y *Trichoderma* spp. en el crecimiento de plantas de chile habanero (*C. chinense*) inoculadas con *M. incognita*.

Tratamientos	Variables de crecimiento				
	Altura de planta (cm)	Biomasa aérea seca (g)	Área foliar (cm ²)	Volumen de raíz (cm ³)	Peso seco de raíz (g)
HMA + Mi	66.30 ± 1.49 ^a	31.73 ± 4.16 ^a	963.90 ^a	88.50 ± 6.25 ^a	23.04 ^a
TRI + Mi	54.00 ± 3.16 ^c	16.76 ± 2.46 ^c	380.40 ^b	45.00 ± 4.71 ^c	6.18 ^b
HMA + TRI + Mi	60.90 ± 3.66 ^b	30.25 ± 3.24 ^a	1837.50 ^a	61.50 ± 5.79 ^b	12.04 ^b
Oxamil + Mi	61.60 ± 3.06 ^b	24.04 ± 4.56 ^b	1939.30 ^a	57.00 ± 4.89 ^b	13.50 ^b
Control + Mi	52.60 ± 4.11 ^c	20.77 ± 1.65 ^{bc}	356.70 ^b	49.00 ± 5.16 ^c	12.14 ^b
DMS	4.09	4.31	706.58	6.85	7.33

La tabla muestra promedios ± desviación estándar. n = 15. DMS = diferencia mínima significativa. Letras iguales dentro de misma columna son estadísticamente iguales (Tukey, $P \leq 0.05$). HMA = Consorcio de hongos micorrízicos arbusculares. TRI = Consorcio de *Trichoderma* spp. Mi = *Meloidogyne incognita*. Oxamil = Vydate® 1ml L⁻¹ de agua.

portaron incrementos de 259.00% de producción de frutos de *S. melongena*, parasitado por *M. javanica* (Sharman et al. 2021).

Tabla 3. Efecto de consorcios de hongos micorrízicos arbusculares y *Trichoderma* spp. en la producción de chile habanero (*C. chinense*).

Tratamientos	Variables de producción	
	Número total de frutos	Peso total de frutos (g)
HMA + Mi	28.10 ± 4.95 ^a	218.13 ± 25.57 ^a
TRI + Mi	9.3 ± 1.41 ^b	45.22 ± 2.53 ^c
HMA + TRI + Mi	31.30 ± 7.19 ^a	185.75 ± 59.05 ^a
Oxamil + Mi	27.10 ± 3.81 ^a	125.70 ± 11.16 ^b
Control + Mi	13.30 ± 4.05 ^b	56.98 ± 8.85 ^c
DMS	5.94	37.48

La tabla muestra promedios ± desviación estándar. n = 15. DMS = diferencia mínima significativa. Letras iguales dentro de misma columna son estadísticamente iguales (Tukey, $P \leq 0.05$). HMA = Consorcio de hongos micorrízicos arbusculares. TRI = Consorcio de *Trichoderma* spp. Mi = *Meloidogyne incognita*. Oxamil = Vydate® 1ml L⁻¹ de agua.

Los análisis de varianza para las variables fisiológicas mostraron diferencias significativas entre tratamientos ($P \leq 0.01$). La mayor tasa fotosintética ($18.0 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) se obtuvo con el tratamiento HMA + Mi, estadísticamente similar al tratamiento HMA + TRI + Mi ($17.7 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), pero superó al tratamiento con Oxamil + Mi ($16.3 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) y control + Mi ($12.6 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$); la menor tasa fotosintética se obtuvo en las plantas con TRI + Mi ($2.6 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) (Tabla 4). Esto indicó que la inoculación de consorcios de HMA, potenció la asimilación de carbono, no así la inoculación con *Trichoderma*. Considerando que los tratamientos con HMA también incrementaron la mayoría de las variables de crecimiento y las características de los frutos, se sugiere que a pesar de la presencia de ne-

matodos los mecanismos que utiliza la planta durante la simbiosis con HMA mejora la síntesis de fotoasimilados, los cuales son canalizados en las diversas formas de crecimiento de la planta (Parihar et al. 2020, Bernardo et al. 2021).

Cabe mencionar que el tratamiento TRI + Mi tuvo la conductancia estomática ($0.03 \text{ mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) y la tasa de transpiración ($0.9 \text{ mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) más bajas, incluso por debajo de las plantas control, esto sugiere que los estomas de las plantas con nematodos inoculadas con *Trichoderma* mantienen un flujo de intercambio de gases tanto de CO₂ como de H₂O relativamente bajo, lo cual se reflejó en una mayor concentración de carbono intercelular ($307 \mu\text{mol mol}^{-1}$) (Tabla 4), esto indicó que probablemente incrementó la acumulación de carbono en los espacios aéreos subestomáticos a consecuencia de una baja eficiencia en la carboxilación durante la fotosíntesis, lo que disminuyó el intercambio de gases planta-atmosfera. En ocasiones los microorganismos endófitos como *Trichoderma* spp. pueden ser demandantes y comprometer los productos del metabolismo primario de la planta (Woo et al. 2023).

La eficiencia del uso del agua (EUA) fue estadísticamente superior en las plantas del tratamiento HMA + Mi ($3.3 \mu\text{mol CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O}$), los demás tratamientos fueron estadísticamente similares entre ellos; sin embargo, el tratamiento TRI + Mi fue estadísticamente inferior a todos ($1.8 \mu\text{mol CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O}$) (Tabla 4). Estos resultados sugieren que a pesar de la presencia de nematodos las plantas inoculadas con HMA pueden mejorar la EUA como una consecuencia de fijar más moléculas de car-

Tabla 4. Efecto de consorcios de hongos micorrízicos arbusculares y *Trichoderma* spp. en variables fisiológicas de chile habanero (*C. chinense*).

Tratamientos	Variables fisiológicas				
	Fotosíntesis ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Conductancia Estomática ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Carbono intercelular ($\mu\text{mol mol}^{-1}$)	Transpiración ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Eficiencia del uso del agua ($\mu\text{mol CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O}$)
HMA + Mi	18.0 \pm 0.49 ^a	0.33 \pm 0.014 ^{bc}	269 \pm 2.2 ^b	5.3 \pm 0.16 ^b	3.3 \pm 0.04 ^a
TRI + Mi	2.6 \pm 0.54 ^d	0.03 \pm 0.005 ^e	307 \pm 13 ^a	0.9 \pm 0.12 ^c	1.8 \pm 0.32 ^c
HMA + TRI + Mi	17.7 \pm 0.50 ^b	0.39 \pm 0.027 ^{ab}	277 \pm 2.9 ^b	6.7 \pm 0.27 ^a	2.6 \pm 0.04 ^b
Oxamil + Mi	16.3 \pm 0.57 ^b	0.29 \pm 0.018 ^c	264 \pm 2.4 ^b	6.9 \pm 0.29 ^a	2.3 \pm 0.02 ^b
Control + Mi	12.6 \pm 0.43 ^c	0.17 \pm 0.007 ^d	241 \pm 1.5 ^c	4.9 \pm 0.16 ^b	2.5 \pm 0.02 ^b
DMS	2.1	0.09	22.0	1.5	0.4

La tabla muestra promedios \pm desviación estándar. n = 15. DMS = diferencia mínima significativa. Letras iguales dentro de misma columna son estadísticamente iguales (Tukey, $P \leq 0.05$). HMA = Consorcio de hongos micorrízicos arbusculares. TRI = consorcio de *Trichoderma* spp. Mi = *Meloidogyne incognita*. Oxamil = Vydate 1ml L⁻¹ de agua.

bono por cada molécula de agua que liberan durante la transpiración (Olijira et al. 2020). Los HMA y *Trichoderma* spp., inoculados en consorcios mantu-

vieron este efecto de control y redujeron el índice de agallamiento en *C. chinense* en etapa de producción del cultivo.

LITERATURA CITADA

- Asukwo-Udo I, Fidelis-Akpan J, Salimon-Bello O, Oko-Otie V (2023) Arbuscular mycorrhizal fungus species differed in bio-control potential on pepper genotypes infected with *Meloidogyne incognita*. International Journal of Vegetable Science 29: 261-274.
- Avilés-Betanzos KA, Cauch-Rodríguez JV, González-Ávila M, Scampicchio M, Morozova K, Ramírez-Sucre MO, Rodríguez-Buenfil IM (2023) Natural deep eutectic solvent optimization to obtain an extract rich in polyphenols from *Capsicum chinense* leaves using an ultrasonic probe. Processes 11: 1729. Doi: 10.3390/pr11061729.
- Ayoub MS (1977) Plant nematology: An agricultural training aid. Department of Food and Agriculture Division of Plant Industry Laboratory Services. Nematology California, Sacramento, USA. 157p.
- Barnett HL, Hunter BB (1972) Illustrated genera of imperfect fungi. 3ra edición. EE. UU. Burgess Publishing. Co. Minneapolis. 241p.
- Bernardo FV, Garita AS, Arango MC, Ripodas JI, Nazareno SMC, Ruscitti MF (2021) Arbuscular mycorrhizal fungi against the false root-knot nematode activity in *Capsicum annuum*: physiological responses in plants. Biocontrol Science and Technology 31: 119-131.
- Böhm W (1979) Root parameters and their measurement. In: Methods of Studying Root Systems. In: Billings WD, Golley F, Lange OL, Olson JS (ed). Springer. New York, USA. pp: 125-138.
- Candelero J, Cristóbal AJ, Reyes RA, Tun SJM, Ruíz SE (2015) *Trichoderma* spp. promotoras del crecimiento en plántulas de *Capsicum chinense* Jacq. y antagónicas contra *Meloidogyne incognita*. Revista Internacional de Botánica Experimental 84: 113-119.
- Cetz-Chi J, Cristóbal-Alejo J, Tun-Suarez J, Peraza-Luna A, Candelero de la Cruz J (2018) Especies nativas de *Trichoderma* spp. y su actividad antagónica contra *Meloidogyne incognita* en *Solanum lycopersicum* L. Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes 26: 5-12.
- Compant S, Samad A, Faist H, Sessitsch A (2019) A review on the plant microbiome: ecology, functions, and emerging trends in microbial application. Journal of Advance Research 19: 29-37.

- Cristóbal-Alejo J, Lima-Burgos A, Pinzón-López L, Tun-Suárez JM, Herrera-Parra E (2022) Hongo micorrízicos arbusculares aceleran el tiempo de crecimiento de portainjertos de guanábana (*Annona muricata* L.). *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 9(1): e3226. DOI: 10.19136/era.a9n1.3226
- Cristóbal-Alejo J, Celis-Perera SI, Herrera-Parra E, Tun-Suárez JM, Gonzáles-Moreno A (2020) Principales enfermedades en chile habanero y su control. En: Latournerie-Moreno L, Ruíz-Sánchez E, Garruña R, y Jarvis DI (ed) Compendio de chile habanero: Diversidad genética, manejo y sustentabilidad. Tecnológico Nacional de México/I.T. Conkal Yucatán, México. pp: 60-68.
- Cristóbal-Alejo J, Moo-Koh FA, Tun-Suarez J, Reyes-Ramírez J, Gamboa-Angulo M (2021) Efecto de la interacción dual de especies de *Trichoderma* en el crecimiento de *Capsicum chinense* Jacq. *Agrociencias* 55: 681-693.
- Cubillos HJ, Valero N, Mejía L (2009) *Trichoderma harzianum* como promotor del crecimiento vegetal del maracuyá (*Passiflora edulis* var. *Flavicarpa* Degener). *Agronomía Colombiana* 27: 81-86.
- Diagne N, Ngom M, Ibrahima DA, Fall D, Hoche V, Svitoonoff S (2020) Roles of arbuscular mycorrhizal fungi on plant growth and performance: Importance in biotic and abiotic stressed regulation. *Diversity* 12(10): 370. DOI: 10.3390/d12100370.
- Gerdemann JW, Nicolson TH (1963) Spores of mycorrhizal endogene species extracted from soil by wet sieving and decanting. *Transactions of the British Mycological Society* 46: 235-244.
- Herrera-Parra E, Ramos-Zapata JA, Cristóbal-Alejo J, Tun-Suarez J, Reyes-Ramírez A (2018) Species of *Trichoderma* antagonistic to the root knot nematode (*Meloidogyne incognita*) in habanero pepper. *International Journal of Experimental Botany* 87: 7-13.
- Herrera-Parra E, Ramos-Zapata J, Basto-Pool C, Cristóbal-Alejo J (2021a) Sweet pepper (*Capsicum annuum*) response to the inoculation of native arbuscular mycorrhizal fungi and the parasitism of root-knot *Meloidogyne incognita*. *Revista Bio Ciencias* 8: 982. DOI: 10.15741/revbio.08.e982.
- Herrera-Parra E, Hernández-Cuevas L, Cristóbal-Alejo J, Parra-Tabla V, Ramos-Zapata JA (2021b) Native mycorrhizal fungi induce positive and differential effect on initial growth in *Capsicum* spp. *Acta Agrícola y Pecuaria* 7: E00710120 Doi: 10.30973/aap/2021.7.0071020.
- Herrera-Parra E, Cristóbal-Alejo J, Zavala-León MJ, Basto-Pool CI (2023) Hongos micorrízicos arbusculares y *Trichoderma* en *Capsicum annuum* disminuyen el daño inducido por *Meloidogyne incognita*. *Temas Agrarios* 28: 37-45.
- Lascurain-Rangel M, Aveñado-Reyes S, Tan R, Caballero J, Cortés-Zarraga L, Linares-Mazari E, Bye-Boettler R, López-Binniquist C, de Ávila A (2022) Plantas americanas utilizadas como condimentos en la cocina mexicana. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 93: 1-47. Doi: 10.22201/ib.20078706e.2022.93.3949.
- Marra R, Lombardi N, Piccolo A, Bazghaleh N, Prashar P, Vandenberg A, Woo S (2022) Mineral biofortification and growth simulation of lentil plants inoculated with *Trichoderma* strain and metabolites. *Microorganisms* 10(87): 1-15. DOI: 10.3390/microorganisms10010087
- Moo-Koh FA, Cristóbal-Alejo J, Reyes-Ramírez A, Tun-Suárez JM, Gamboa-Angulo M, Islas-Flores I (2018) Incompatibilidad interespecífica de especies de *Trichoderma* contra *Meloidogyne incognita* en *Solanum lycopersicum*. *Scientia Fungorum* 47: 27-45.
- Moo-Koh FA, Cristóbal-Alejo J, Andrés MF, Martín J, Reyes F, Tun-Suárez JM, Gamboa-Angulo M (2022) *In vitro* assessment of organic and residual fractions of nematicidal culture filtrates from thirteen tropical *Trichoderma* strains and metabolic profiles of most active. *Journal of Fungi* 8(1): 82. DOI: 10.3390/jof8010082.

- Nieto-Jacobo MF, Steyaert JM, Salazar-Badillo FB, Nguyen DV, Rostás M, Braithwaite M, De Souza JT, Jimenez-Bremont JF, Ohkura M, Sterwart A, Mendoza-Mendoza A (2017) Environmental growth conditions of *Trichoderma* spp. affects indole acetic acid derivatives, volatile organic compounds, and plant growth promotion. *Frontiers in Plant Science* 8: 102. DOI: 10.3389/fpls.2017.00102.
- Nzanza B, Marais D, Soundy P (2012) Yield and nutrient content of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) as influenced by *Trichoderma harzianum* and *Glomus mosseae* inoculation. *Scientia Horticulturae* 144: 55-59.
- Oljira AM, Hussain T, Waghmode TR, Zhao H, Sun H, Liu X, Wang X, Liu B (2020) *Trichoderma* enhances net photosynthesis, water use efficiency, and growth of wheat (*Triticum aestivum* L.) under salt stress. *Microorganisms* 8(10): 1565. Doi: 10.3390/microorganisms8101565.
- Parihar M, Chitara M, Khatri P, Kumari A, Kumar MP, Rakshit A, Rana A, Singh MV, Kumar SA, Choudhary M, Kumar BJ, Ram H, Pattanayak A, Tiwari K, Singh JS (2020) Arbuscular mycorrhizal fungi: abundance, interaction with plants and pontencial biological applications. In: Yadav A, Rastegari A, Yadav N, Kour D (eds) *Advances in plant microbiome and sustainable agriculture*. *Microorganisms for Sustainability*, Springer, Singapore. pp: 105-123. Doi: 10.1007/978-981-15-3208-5_5.
- Poveda J, Abris-Urias P, Escobar C (2020) Biological control of plant-parasitic nematodes by filamentous fungi inducers of resistance: *Trichoderma*, mycorrhizal and endophytic fungi. *Frontiers in Microbiology* 11: 992. DOI: 10.3389/fmicb.2020.0099.
- Phillips JM, Hayman DS (1970) Improved procedures for clearing roots and staining parasitic vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Transactions of the British Mycological Society* 55: 158-161.
- Rizvi R, Mahmood I, Ansari S (2018) Interaction between plant symbionts, bio-organic and antagonistic fungi in the management of *Meloidogyne incognita* infecting chickpea. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences* 17: 424-434.
- Schenck NC, Pérez Y (1990) Manual for the identification of vesicular arbuscular mycorrhizal fungi (INVAM). 3ra edición. University of Florida. Synergistic. Gainesville, USA. 245p.
- Schüßler A, Walker C (2010) The Glomeromycota. A species list with new families and new genera. The Royal Botanic Garden Kew. Disponible en: www.amf-phlogeny.com. Fecha de consulta: 11 de junio 2023.
- Sharman M, Saini I, Kausshik P, Aldawsari MM, Balawi AT, Alam P (2021) Mycorrhizal fungi and *Pseudomonas fluorescens* application reduces root-knot nematode (*Meloidogyne javanica*) infestation in eggplant. *Saudi Journal of Biological Science* 28: 3695-3691.
- SIAP (2022) Anuario estadístico de la producción agrícola. Sistema de información agroalimentación y pesquera. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>. Fecha de consulta: 11 de junio 2023.
- Sood M, Kapoor D, Kumar V, Sheteiwy MS, Ramakrishnan M, Landi M, Araniti F, Sharman A (2020) *Trichoderma*: the "secrets" of a multitalented biocontrol agent. *Plants* 9(762): 1-25. DOI: 10.3390/plants9060762.
- Taylor A, Sasser J (1983) Biología, identificación y control de los nematodos de nódulo de la raíz (Especies de *Meloidogyne*). Proyecto Internacional de *Meloidogyne*. In: Departamento de Fitopatología de la Universidad del Estado de Carolina del Norte y Agencia de Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (eds.) *Manual de biología, identificación y control de los nematodos de nódulo de la raíz (especies de Meloidogyne)*. Artes gráficas del departamento de fitopatología de la Universidad del Estado de Carolina del Norte. EEUU. pp: 89-95.

- Tiwari S, Pandey R, Gross A (2021) Identification of rhizospheric microorganisms that manages root knot nematode and improve oil yield in sweet basil (*Ocimum basilicum* L.). *Agronomy* 11: 570. DOI: 0.3390/agronomy11030570
- Tucci M, Ruocco M, De Masi L, De Palma M, Lorito M (2011) The beneficial effect of *Trichoderma* spp. on tomato is modulated by the plant genotype. *Molecular Plant Pathology* 12: 341-354.
- Vergara C, Araujo KEC, Souza SR, Schultz N, Saggin-Júnior OJ, Sperandio MVL, Zilli JE (2019) Plant-mycorrhizal fungi interaction and response to inoculation with different growth-promoting fungi. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 54: e25140. DOI: 10.1590/S1678-3921.pab2019.v54.25140.
- Vinale F, Sivasithamparam, K., Ghisalberti EL, Marra R, Barbetti MJ, Li H, Woo SL, Lorito M (2008). A novel role for *Trichoderma* secondary metabolites in the interactions with plants. *Physiological and Molecular Plant Pathology* 72: 80-86.
- Wahab A, Muhammad M, Munir A, Abdi G, Zaman W, Ayaz A, Khizar C, Reddy SPP (2023) Role of arbuscular mycorrhizal fungi in regulating growth, enhancing productivity, and potentially influencing ecosystems under abiotic and biotic stresses. *Plants* 12.3102. Doi: 10.3390/plants12173102.
- Woo SL, Hermosa R, Lorito M, Monte E (2023) *Trichoderma*: a multipurpose, plant-beneficial microorganism for eco-sustainable agriculture. *Nature Reviews Microbiology* 21: 312-326.
- Zin NA, Badaluddin NA (2020) Biological functions of *Trichoderma* spp. for agriculture applications. *Annals of Agricultural Sciences* 65: 168-178.