Revista Mexicana de Fitopatología
e-ISSN: 2007-8080

Crossref Open access

Nota Fitopatológica

Uso de *Purpureocillium lilacinum* MTL01 y *Bacillus velezensis* 83 para reducir el agallamiento por *Meloidogyne enterolobii* y mejorar la floración en tomate

Elena Lugo-García[1], Alejandro Salinas-Castro[2], Gandhi Landa-Cadena[2], Claudia Martínez-Anaya[1], Irán Tapia-Vázquez[1]*.
[1]Departamento de Ingeniería Celular y Biocatálisis, Instituto de Biotecnología, UNAM. Av. Universidad 2001, Chamilpa. C. P. 62210, Cuernavaca, Morelos. [2]Centro de Investigación en Micología Aplicada, Universidad Veracruzana, Calle Médicos No. 5. Unidad del Bosque, C. P. 91010 Xalapa, Veracruz. México.

Autor de Correspondencia:
Irán Tapia-Vázquez
iran.tapia01@gmail.com

Sección:
Edición periódica

Recibido:
07 Mayo, 2025
Aceptado:
28 Julio, 2026
Publicado:
25 Agosto, 2026

Cita:
Lugo-García E, Salinas-Castro A, Landa-Cadena G, Martínez-Anaya C y Tapia-Vázquez I. 2026. Uso de *Purpureocillium lilacinum* MTL01 y *Bacillus velezensis* 83 para reducir el agallamiento por *Meloidogyne enterolobii* y mejorar la floración en tomate. Revista Mexicana de Fitopatología 44(3): 134. https://doi.org/10.18781/R.MEX.FIT.2505-3

RESUMEN

Antecedentes/Objetivo. El objetivo de este estudio fue determinar el efecto combinado de una cepa ambiental de *Purpureocillium lilacinum* (MTL01) junto con esporas de *Bacillus velezensis* 83, promotor del crecimiento en tomate, ante la infección del nematodo agallador *Meloidogyne enterolobii.*

Desarrollo Experimental. El estudio se realizó con un diseño completamente al azar, con tres réplicas experimentales (julio–octubre 2022, febrero–junio 2023 y septiembre 2024–enero 2025). Los tratamientos incluyeron controles sin inocular, plantas inoculadas con *P. lilacinum* MTL01, con *B. velezensis* 83 o con ambos, con y sin infección por nematodos. Las semillas se esterilizaron y se incubaron con esporas de MTL01 o con solución control, luego se germinaron y trasplantaron. *B. velezensis* 83 se aplicó una semana después seguido de dos aplicaciones adicionales posteriores. Los nematodos se inocularon tres semanas posteriores al trasplante. Las plantas crecieron bajo distintas condiciones de invernadero según el experimento durante ocho semanas después de la inoculación. En la cosecha se registraron parámetros de crecimiento e infección (biomasa, longitud, número de flores, peso radicular, número de agallas e índice de agallamiento).

Resultados. Los datos de crecimiento vegetativo variaron entre los experimentos, sin clara evidencia de efectos asociados a la inoculación de los microorganismos. Pero la combinación de *P. lilacinum* MTL01 y *B. velezensis* 83 mostró resultados reproducibles reduciendo en más del 60 % la formación de agallas causadas por *M. enterolobii* y promoviendo una tendencia consistente hacia el aumento de la floración respecto a las plantas control infestadas con el nematodo. Estos resultados muestran el potencial del uso combinado de microorganismos para mejorar el rendimiento de tomate en condiciones de invernadero.

Conclusión. Los resultados resaltan la importancia de mitigar la infección por *M. enterolobii* en tomate con la combinación de microorganismos, no solo para controlar la población del nematodo, sino también para incrementar el rendimiento de flores en 4.3 veces (Experimento 3) de plantas sin nematodos, y 1.6 veces en presencia de *M. enterolobii*. Esto representa una estrategia prometedora, aunque se requiere investigación adicional para confirmar su seguridad y optimizar su aplicación en condiciones agrícolas reales.

Palabras clave: Hongo, Bacteria, Nematodo, Biocontrol, Fenología

Copyright: © 2026 por los autores. Licencia RMF / SMF, México. Esta Nota es de *acceso abierto* distribuido bajo los términos y condiciones de la Sociedad Mexicana de Fitopatología. www.rmf.smf.org.mx.

INTRODUCCIÓN

El tomate (*Solanum lycopersicum*) es uno de los cultivos más importantes en México, y su producción se ve afectada por *Meloidogyne enterolobii*. El manejo tradicional de *M. enterolobii* en México se basa principalmente en el uso de pesticidas sintéticos. Sin embargo, en el intento de reducir su utilización, actualmente se analizan estrategias basadas en rotación de cultivos y control biológico (Lamberti, 1997; Tapia-Vázquez *et al*., 2022). Por ejemplo, los hongos micorrízicos arbusculares como *Acaulospora longulata* (Campos *et al*., 2013; de Sá y Campos, 2020) y hongos filamentosos como *Pochonia chlamydosporia* (Silva *et al*., 2017), *Paraboeremia taiwanensis* (Liang *et al*., 2020), *Trichoderma harzianum* (Jindapunnapat *et al*., 2013) y *Purpureocillium lilacinum* destacan por su capacidad nematicida; así como las bacterias de los géneros *Pseudomonas*, *Paenibacillus* (Sohrabi *et al*., 2018) y *Bacillus* spp. (Basyony y Abo-Zaid, 2018; Díaz-Manzano *et al*., 2023; Vieira de Carvalho Júnior *et al.,* 2022).

En México existen diversos productos comerciales basados en microorganismos (Tapia-Vázquez *et al*., 2022); no obstante, los agricultores muestran cierta resistencia a su implementación, principalmente por la necesidad de aplicaciones frecuentes y por su acción más lenta en comparación con los nematicidas sintéticos. Por ello, es necesario desarrollar esquemas de manejo que aumenten la eficacia de los bioproductos. El uso de combinaciones de microorganismos puede representar una alternativa valiosa para abordar este desafío. Por ejemplo, Nesha y Siddiqui (2017) evaluaron los efectos de *Paecilomyces lilacinus* y *Aspergillus niger*, de manera individual y combinada en zanahoria (*Daucus carota*), y confirmaron que el uso de ambas especies redujo significativamente la formación de agallas por *M. javanica*. Por otra parte, las bacterias de *Bacillus* son conocidas como promotoras del crecimiento vegetal y además se ha documentado su participación en el control biológico de diversas plagas. Existen reportes sobre la supresión de poblaciones de *Meloidogyne* por *B. subtilis* en chile (*Capsicum annuum*) (Mokbel *et al*., 2022; Soto Deza *et al*., 2012) y en tomate (Basyony y Abo-Zaid, 2018), mientras que las cepas BMH e INV de una especie relacionada con *B. velezensis* redujeron más del 90 % el número de agallas y huevos de *M. incognita* en tomate (Cruz-Magalhães *et al*., 2022). Asimismo, Tian y colaboradores (2022) reportaron que *B. velezensis* Bv25 redujo las agallas causadas por *M. incognita* (73.8 %) en raíces de pepino (*Cucumis sativus*), mediante la colonización radicular y la producción de compuestos volátiles. Además, *B. velezensis* VB7 inhibió la viabilidad de los huevos y causó la muerte de juveniles de *M. incognita* en ensayos *in vitro* e indujo respuesta inmune innata en tomate (Kamalanathan *et al*., 2023).

La cepa *B. velezensis* 83 es comercializada en México como biofungicida foliar (Fungifree AB®), utilizada para el control biológico de hongos fitopatógenos en diversos cultivos de importancia agrícola (Galindo *et al*., 2013). Adicionalmente, Balderas-Ruíz *et al*. (2021) evaluaron la capacidad de *B. velezensis* 83 para promover el crecimiento del tomate en diferentes etapas fenológicas y su eficacia en el biocontrol de *Botrytis cinerea* en hojas y frutos postcosecha, observando mejoras significativas en la producción y calidad del tomate, así como en el control del hongo. El presente trabajo tuvo el objetivo de evaluar de forma individual y combinada a *B. velezensis* 83 y la cepa ambiental *P. lilacinum* MTL01 frente a la infección de *M. enterolobii* en tomate. Asimismo, evaluar la eficiencia para incrementar el rendimiento del tomate.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Aislado del nematodo. Se estableció una población de *Meloidogyne enterolobii* (GenBank OM721664) en el laboratorio para realizar estudios de control biológico. Los nematodos se obtuvieron a partir de raíces de tomate infectadas destinadas para la propagación de nematodos provenientes de un cultivo de acelga (*Beta vulgaris* var. *cicla*) y colectas de Veracruz (Salinas-Castro *et al*., 2022). Las masas de huevos se extrajeron de raíces infectadas y los juveniles de segundo estadio (J2) se recuperaron mediante una modificación del método de embudo de Baermann (Tintori *et al*., 2022). Estos juveniles se emplearon para establecer poblaciones en laboratorio con tomate variedad Calafia F1 (Harris Moran) por su susceptibilidad ante este nematodo.

Aislado e identificación del hongo. Durante experimentos independientes de propagación de *Meloidogyne paranaensis* en un sistema de microcultivo en plantas de tomate, se observó la supervivencia de una de cinco plántulas inoculadas con masas de huevos. En la planta sobreviviente, los J2 no lograron eclosionar debido a la presencia de una infección fúngica. Se obtuvo un cultivo axénico del hongo en agar dextrosa papa (PDA por sus siglas en inglés) suplementado con ampicilina (100 µg mL^{-1}) y kanamicina (50 µg mL^{-1}). Se caracterizó morfológicamente y se identificó de forma molecular mediante amplificación y secuenciación de la región intergénica ITS del ADN ribosomal con los oligonucleótidos ITS1 (5′-TCCGTAGGTGAACCTGCG-3′) e ITS4 (5′-TCCTCCGCTTATTGATATG-3′) (White *et al*., 1990), y comparación filogenética con cepas relacionadas del mismo género y especie. La reconstrucción filogenética se realizó utilizando el modelo TN93 (Tamura y Nei, 1993), con valores de soporte de ramas calculados mediante el algoritmo aLRT (SH-like) y visualizados con el programa SeaView.

Interacción entre *M. enterolobii* y *P. lilacinum MTL01*. Para evaluar la interacción y el posible parasitismo de *P. lilacinum* MTL01 sobre *M. enterolobii*, se realizaron ensayos *in vitro* y observaciones de los organismos a partir de infecciones en plantas de tomate. Primero se realizó un ensayo de confrontación en placas de PDA suplementado con kanamicina (50 µg mL^{-1}) y ampicilina (100 µg mL^{-1}), donde masas de huevos de *M. enterolobii* se colocaron junto a una colonia de *P. lilacinum*, aproximadamente a 5 cm de distancia, y después de 5 días se observó el parasitismo de los huevos. Adicionalmente, al finalizar los experimentos en invernadero, se recuperaron en agua hembras de agallas provenientes de raíces de tomate tratadas con *P. lilacinum*, de las que después de 48 horas emergió micelio, mientras que masas de huevos obtenidas del mismo tratamiento se desinfectaron con NaOCl 3 % y cuatro enjuagues con agua estéril. Los huevos obtenidos se incubaron en PDA suplementado con antibióticos para evaluar la colonización fúngica.

Evaluación de la combinación de *P. lilacinum* MTL01 y *B. velezensis* 83 como agentes de control contra *M. enterolobii* en plantas de tomate. Quisimos evaluar la existencia de sinergismo en la capacidad de control de *M. enterolobii* con la inoculación combinada de *P. lilacinum* MTL01 y *B. velezensis* 83 (producto comercial Fungifree AB®, LMG S-30921) en plantas de tomate, comparándola con los efectos de cada microorganismo por separado. El diseño experimental se estableció con el propósito de favorecer la colonización temprana del hongo MTL01 en plántulas de tomate durante la germinación, e incorporar posteriormente los tratamientos con *B. velezensis* 83 a partir de las dos semanas postgerminación, seguidos de dos aplicaciones adicionales cada 20 días. Para los ensayos de biocontrol, las semillas de tomate se desinfectaron superficialmente con lavados de

NaOCl 10 % y etanol 70 %, seguidos de lavados con agua destilada estéril. Posteriormente, se incubaron durante 24 h en una suspensión de 1×10^6 esporas mL^{-1} de MTL01 en glicerol estéril al 10 % antes de sembrar. Después de germinar y del trasplante, *B. velezensis* 83 se aplicó al sustrato como una suspensión equivalente a 1×10^8 UFC por maceta, con dos aplicaciones adicionales cada 20 días. Tres semanas después del trasplante, las plantas fueron inoculadas con una combinación de J2s y huevos de *M. enterolobii* para aplicar entre 1 200 y 3 400 nematodos por planta, según cada experimento.

Los experimentos se repitieron tres veces en el tiempo en un invernadero bajo un diseño completamente al azar, en diferentes épocas del año: Experimento 1: de julio a octubre 2022; Experimento 2: febrero a junio 2023, y Experimento 3: septiembre 2024 – enero 2025. En cada experimento se evaluaron cuatro tratamientos (con y sin *M. enterolobii*): 1) Sin microorganismos; 2) Solo *P. lilacinum* MTL01; 3) Solo *B. velezensis* 83; 4) Combinación *P.l.* MTL01 + *B.v.* 83. Por cada tratamiento se incluyeron seis plantas. Las plantas se monitorearon durante ocho semanas después de la introducción de los nematodos y registramos las siguientes variables: longitud total, biomasa aérea (peso fresco y seco), número de flores, peso fresco de la raíz, número de agallas e índice de agallamiento (Taylor y Sasser, 1978). Los datos se analizaron mediante ANOVA de una vía, y las medias se compararon utilizando la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) con el programa GraphPad Prism.

Caracterización de *P. lilacinum* MTL01 e interacción con *M. enterolobii*. De acuerdo con las características morfológicas y moleculares del aislado fúngico proveniente de huevos de *M. paranaensis* (Figura 1A), se confirmó la identificación de *Purpureocillium lilacinum*, designado como cepa MTL01, con 100 % de identidad y 100 % de cobertura para la región ITS (GenBank OR470716). En medio PDA se observó una colonia inicialmente blanca-beige, de textura esponjosa-algodonosa, que adquirió tonalidades lila a violeta conforme avanzó la esporulación (Figura 1C y D). Microscópicamente presentó conidióforos ramificados, fiálides alargadas y conidios ovalados (Figura 1B) (Nguyen Thi H *et al*., 2025). Por otra parte, *Meloidogyne enterolobii* logró establecerse y completar su ciclo de vida en las raíces de tomate Calafia F1, provocando la formación de agallas características asociadas con infecciones de nematodos formadores de agallas (Figura 2A), lo que llevó al deterioro general de la planta. Estas estructuras albergaron hembras adultas y masas de huevos asociadas al ciclo reproductivo del nematodo (Tapia-Vázquez *et al*., 2022). Un acercamiento a un nudo radicular muestra una masa de huevos sobresaliendo del tejido (Figura 2B), mientras que las observaciones bajo un estereomicroscopio revelan hembras adultas con su morfología característica en forma de pera (Tapia-Vázquez *et al*., 2022), acompañadas de masas de huevos (Figura 2C). Los J2 recién eclosionados fueron móviles y sobrevivieron en agua hasta por dos semanas (Figura 2D).

En los ensayos de confrontación *in vitro*, huevos de *M. enterolobii* colocados en presencia de *P. lilacinum* MTL01 fueron progresivamente colonizados por el hongo, impidiendo la eclosión de juveniles (Figuras 1E y 1F), mientras que las hembras recuperadas de agallas provenientes de raíces tratadas con MTL01 desarrollaron crecimiento micelial visible tras su incubación en agua destilada estéril (Figuras 1G y 1H). Asimismo, los huevos obtenidos de dichas agallas produjeron colonias de *P. lilacinum* al incubarse en PDA suplementado con kanamicina y ampicilina, confirmando el potencial nematófago de esta cepa.

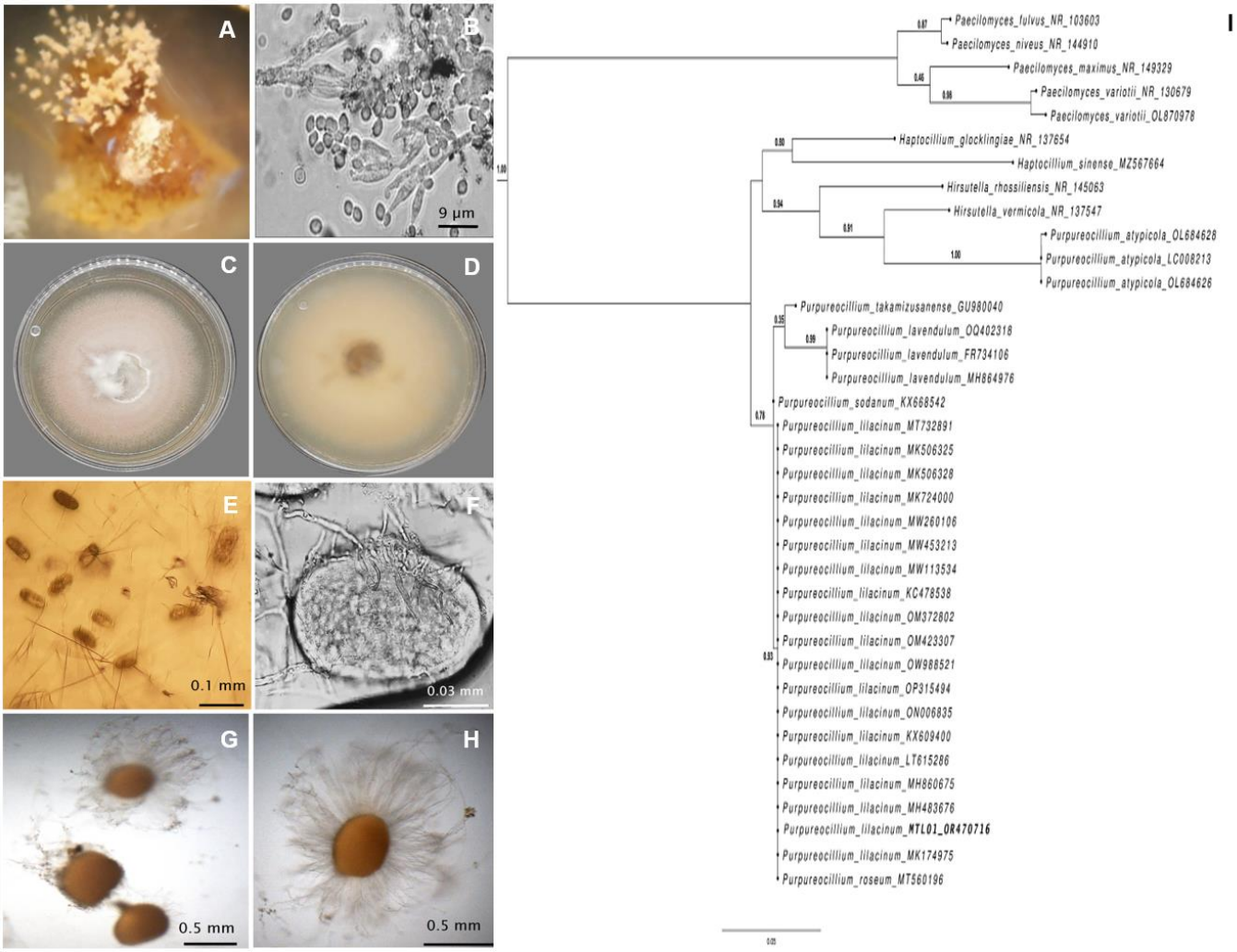


Figura 1. Aislamiento y caracterización de *P. lilacinum* MTL01. **A)** Micelio de MTL01 creciendo sobre una masa de huevos de *M. paranaensis*. **B)** Estructuras reproductivas de MTL01: conidióforos, fiálides y conidios. **C** y **D)** Apariencia de MTL01 sobre medio PDA: vista superior y vista inferior. **E)** Huevos de *M. enterolobii* parasitados por MTL01 en medio PDA. **F)** Huevo parasitado proveniente de raíces del Experimento 1. **G** y **H)** Hembras adultas parasitadas provenientes de raíces del Experimento 1. **I)** Filogenia de MTL01 comparada con otras cepas y especies relacionadas.

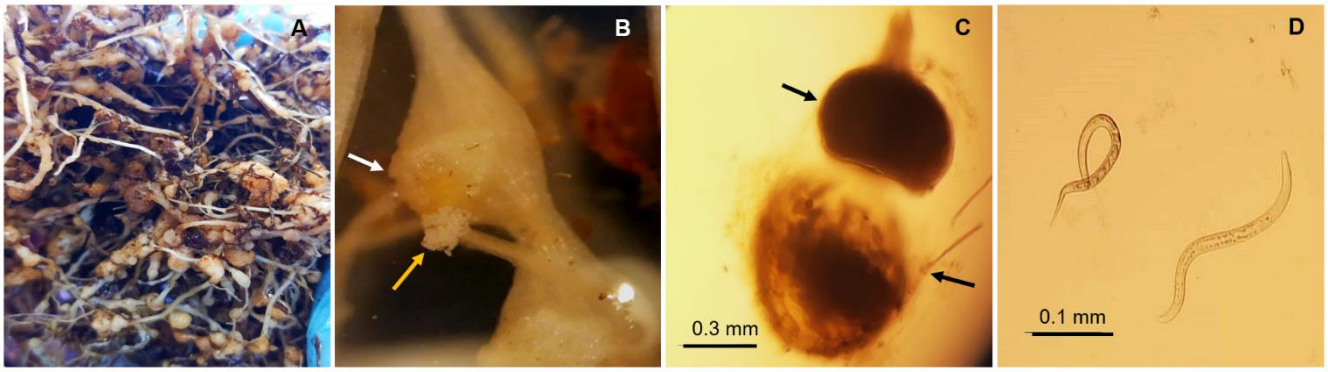


Figura 2. Población de *M. enterolobii* establecida en el laboratorio. **A)** Raíces agalladas después de la propagación de *M. enterolobii* a los 90 días posteriores a la inoculación con J2s, en una planta de tomate de 4 meses de edad. **B)** Agalla con una masa de huevos expuesta (flecha blanca) y huevos (flecha amarilla). **C)** Cuerpo de hembra con forma de pera (flecha superior) y masa de huevos (flecha inferior). **D)** Nematodos de estadio J2 eclosionados en agua.

En los tres experimentos en invernadero se observaron respuestas variables en los parámetros de crecimiento vegetativo (Cuadros 1, 2 y 3), muy posiblemente por las condiciones climáticas de cada temporada del año. En el Experimento 1, el tratamiento combinado de *P. lilacinum* MTL01 y *B. velezensis* 83 aumentó la longitud de los brotes en ausencia de nematodos; sin embargo, este efecto no se observó en plantas inoculadas con *M. enterolobii*. Las diferencias en el peso radicular no fueron significativas; sin embargo, las raíces con nematodos fueron más pesadas, posiblemente por la formación de agallas (Cuadro 1). En el Experimento 2, no se detectaron efectos consistentes sobre el crecimiento de las plantas asociados a ninguno de los tratamientos (Cuadro 2). En el Experimento 3, la inoculación individual de *P. lilacinum* MTL01 redujo el peso fresco de raíz (27 g) en plantas infestadas con nematodos, mientras que los demás parámetros se mantuvieron comparables entre tratamientos (Cuadro 3). Esto sugiere que las respuestas de promoción del crecimiento inducidas por *Purpureocillium lilacinum* MTL01 y *Bacillus velezensis* 83 estuvieron influenciadas por las condiciones particulares de cultivo en invernadero, según se ha documentado para plantas de tomate (Jeong *et al*., 2026).

Cuadro 1. Variables de respuesta fenológicas ante la presencia y ausencia de *M. enterolobii* con diferentes tratamientos Experimento 1 (julio a octubre 2022).

	Altura (cm)		**Peso fresco aéreo (g)**		**Peso seco aéreo (g)**		**Peso fresco de raíz (g)**	
Tratamiento	Control	+ *M. enterolobii*	Control	+*M. enterolobii*	Control	+*M. enterolobii*	Control	+*M. enterolobii*
Control	122.3±12.2^{a}	118.3±12.7^{a}	38.7±5.0^{a}	27.9±7.8^{a}	5.0±0.6^{ab}	3.7±1.0^{b}	17.6±5.4^{abc}	22.8±8.4^{ab}
MTL01	116.3±9.9^{a}	104.8±8.5^{a}	32.3±6.1^{a}	30.6±7.8^{a}	4.34±0.7^{ab}	4.0±0.9^{b}	12.5±2.2^{c}	24.5±6.8^{a}
B.v. 83	109.8±8.4 ^{a}	116.8±8.0^{a}	27.4±8.1^{a}	36.3±5.8^{a}	4.0±1.2^{b}	5.3±0.8^{ab}	15.6±4.7^{abc}	19.7±3.7^{abc}
MTL01 + *B.v.* 83	121.7±12.0^{a}	108.5±3.9^{a}	39.1±12.3^{a}	39.0±5.8^{a}	6.1±1.6^{a}	5.4±0.8^{ab}	14.2±2.2^{bc}	23.0±3.6^{ab}

*Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas (ANOVA de una vía, prueba de Tukey; $p < 0.05$).

Cuadro 2. Variables de respuesta fenológicas ante la presencia y ausencia de *M. enterolobii* con diferentes tratamientos Experimento 2 (febrero a junio 2023).

	Altura (cm)		**Peso fresco aéreo (g)**		**Peso seco aéreo (g)**		**Peso fresco de raíz (g)**	
Tratamiento	Control	+ *M. enterolobii*	Control	+*M. enterolobii*	Control	+*M. enterolobii*	Control	+*M. enterolobii*
Control	104.9±7.5^{ab}	106.7±4.4^{ab}	36.6±2.4^{a}	36.6±2.4^{a}	7.2±1.0^{a}	5.9±1.3^{abc}	18.5±1.1^{ab}	18.6±4.6^{ab}
MTL01	108.8±4.4^{a}	107.0±8.0^{a}	31.1±3.0^{ab}	31.1±3.0^{ab}	5.0±0.9^{bc}	5.4±0.4^{abc}	16.2±4.2^{bc}	13.6±1.2^{bc}
B.v. 83	108.4±3.8^{a}	95.2±6.2^{b}	32.9±4.0^{ab}	32.9±4.0^{ab}	6.0±1.5^{ab}	5.3±0.4^{bc}	22.8±4.6^{a}	13.6±1.5^{bc}
MTL01 + *B.v.* 83	104.5±7.9^{ab}	104.1±6.0^{ab}	27.4±3.9^{b}	27.4±3.9^{b}	4.3±0.9^{bc}	4.2±0.7^{c}	16.2±2.3^{bc}	11.6±2.1^{c}

*Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas (ANOVA de una vía, prueba de Tukey; $p < 0.05$).

En contraste con la variabilidad observada en los parámetros de crecimiento vegetativo, algunos efectos mostraron tendencias más reproducibles entre experimentos. En particular, se destacan dos parámetros clave: a) número de flores y b) número de agallas. A pesar de que la respuesta en la floración también fue variable entre experimentos, la inoculación combinada de *P. lilacinum MTL01* y *B. velezensis* 83, mostró una tendencia consistente hacia niveles mayores de floración en todos los casos (Figura 3A, 3C y 3E). En el Experimento 1 la combinación de ambos microorganismos resultó en 1.3 veces más flores que las plantas control sin nematodos, y 2.3 veces más en plantas infectadas con *M. enterolobii* (Figura 3A).

Cuadro 3. Variables de respuesta fenológicas ante la presencia y ausencia de *M. enterolobii* con diferentes tratamientos Experimento 3 (septiembre 2024 – enero 2025).

	Altura (cm)		Peso fresco aéreo (g)		Peso seco aéreo (g)		Peso fresco de raíz (g)	
Tratamiento	Control	+ *M. enterolobii*	Control	+*M. enterolobii*	Control	+*M. enterolobii*	Control	+*M. enterolobii*
Control	120.4±18.9^{ab}	121.3±10.1^{ab}	45.5±11.1^{a}	48.1±3.8^{a}	8.2±2.3^{a}	8.4±0.8^{a}	31.6±17.3^{ab}	35.8±3.3^{a}
MTL01	126.7±6.8^{a}	94.7±14.4^{b}	39.0±4.9^{ab}	29.8±7.7^{b}	6.9±0.9^{a}	5.5±1.9^{a}	11.9±0.5^{d}	27.0±3.9^{abc}
B.v. 83	107.8±13.9^{ab}	104.1±12.7^{ab}	40.9±7.8^{ab}	41.6±4.0^{ab}	8.2±1.8^{a}	7.9±0.9^{a}	20.4±7.4^{bcd}	32.43±4.1^{ab}
MTL01 + *B.v.* 83	115.5±18.9^{ab}	106.3±21.9^{ab}	40.3±10.1^{ab}	37.0±9.7^{ab}	7.6±2.0^{a}	6.4±1.9^{a}	16.4±2.8^{cd}	30.1±7.2^{ab}

*Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas (ANOVA de una vía, prueba de Tukey; $p < 0.05$).

En el Experimento 2, las diferencias entre tratamientos fueron menos marcadas en ausencia de nematodos (1.3 veces más); sin embargo, la combinación de ambos microorganismos generó casi el doble (1.94 veces más) de flores que el control en presencia de *M. enterolobii* (Figura 3C). El Experimento 3 mostró las mayores diferencias al emplear la combinación microbiana, con un incremento de 4.3 veces en el número de flores en ausencia de nematodos y de 1.6 veces en plantas con nematodos (Figura 3E).

El índice de agallamiento disminuyó significativamente en cada experimento. En el Experimento 1, *P. lilacinum* MTL01 y *B. velezensis* 83 redujeron, de forma individual, la formación de agallas aproximadamente en un 60 %, mientras que el tratamiento combinado lo disminuyó en 66 %, determinado por gramo de raíces periféricas (Figura 3B). En el Experimento 2, las reducciones fueron de aproximadamente 71 % (MTL01), 43 % (*B. velezensis* 83) y 78 % para la combinación (Figura 3D). Finalmente, en el Experimento 3, el agallamiento se redujo aproximadamente un 56 % (MTL01), 67 % (*B. velezensis* 83) y 81 % (combinación), confirmando la reproducibilidad del efecto a lo largo de los ensayos (Figura 3F y Cuadro 4). Estos resultados enfatizan que tanto *P. lilacinum* MTL01 como *B. velezensis* 83 contribuyen a mejorar el biocontrol de *M. enterolobii*, siendo su aplicación combinada la estrategia más eficaz, lo que coincide con los resultados de otros reportes (Díaz-Manzano *et al*., 2023; de Paula *et al.,* 2024; Huang *et al*., 2016).

Cuadro 4. Número y porcentaje de reducción de agallas por tratamiento en tres experimentos independientes.

	Experimento 1		Experimento 2		Experimento 3	
Tratamiento	**Número de agallas**	**Reducción (%)**	**Número de agallas**	**Reducción (%)**	**Número de agallas**	**Reducción (%)**
Control	117.0±76.0 ^{a}	-	13.9±4.5^{a}	-	85.2±25.4^{a}	-
P. lilacinum MTL01	45.5±22.3 ^{b}	61 %	4.1±2.6^{b}	71 %	37.7±9.1^{b}	56 %
B. velezensis 83	45.7±12.4 ^{b}	61 %	7.9±2.1^{bc}	43 %	28.0±10.4^{b}	67 %
MTL01+ 83	39.5±10.0 ^{b}	66 %	3.1±1.3^{c}	78 %	15.8±3.3^{b}	81%

*Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas (ANOVA de una vía, prueba de Tukey; $p < 0.05$).

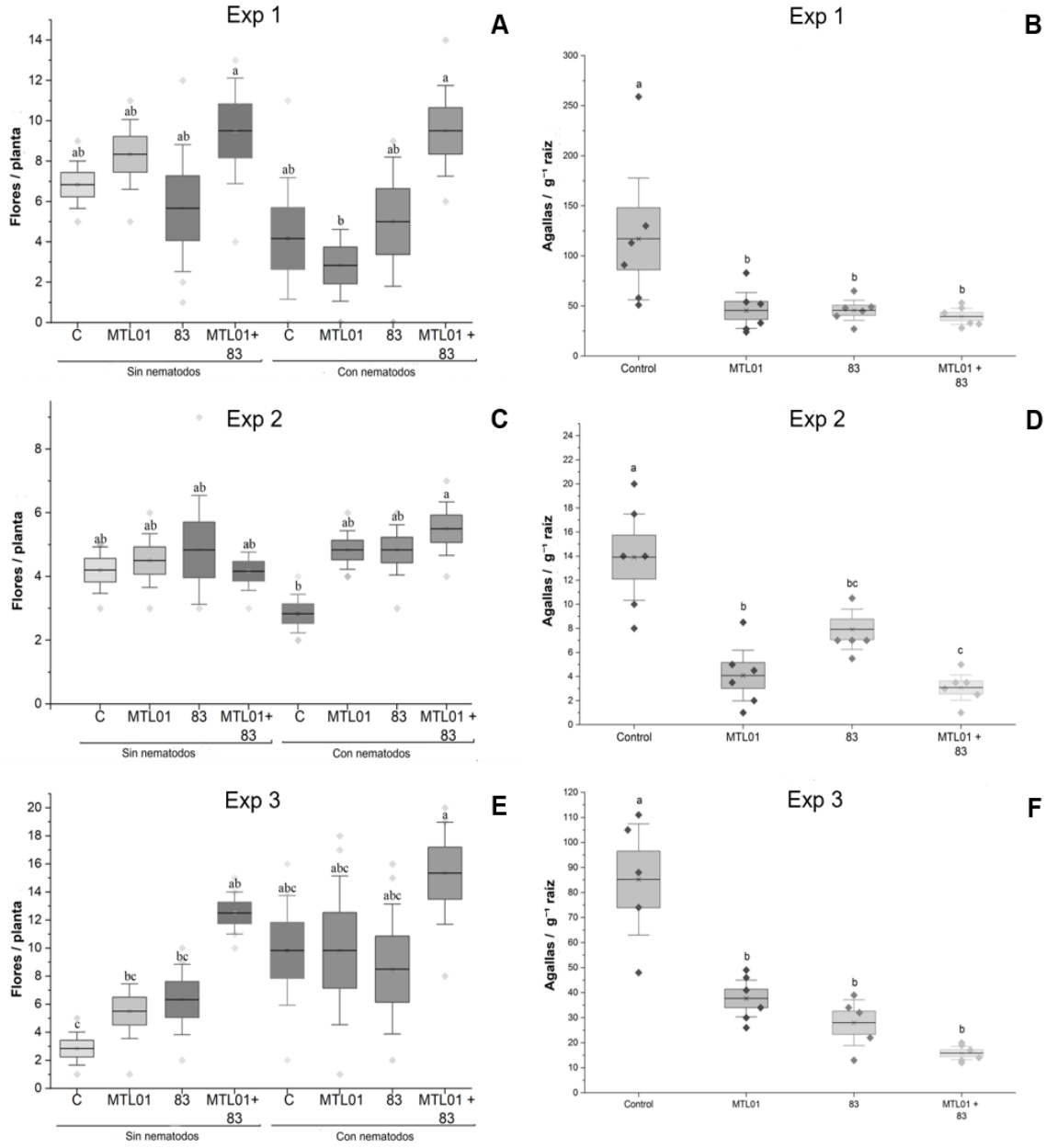


Figura 3. La combinación de *P. lilacinum* MTL01 y *B. velezensis* 83 promueve la floración y reduce el agallamiento en plantas de tomate infectadas con *M. enterolobii*. **A), C)** y **E):** Conteo de flores a lo largo del ciclo de vida antes de finalizar cada experimento. **B), D)** y **F):** Agallamiento de raíces por experimento. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas (ANOVA, prueba de Tukey; $p < 0.05$).

El impacto positivo del tratamiento combinado sobre la floración y la reducción de la formación de agallas a lo largo de los experimentos demostró una respuesta biológica más estable y reproducible. Estos resultados indican que, aunque la promoción del crecimiento puede depender de las condiciones ambientales, los efectos protectores y reproductivos conferidos por la combinación microbiana son más consistentes.

CONCLUSIONES

La combinación de *P. lilacinum* MTL01 y *B. velezensis* 83 demostró ser una estrategia eficaz para el biocontrol de *Meloidogyne enterolobii* en plantas de tomate en condiciones de invernadero. La inoculación combinada de ambos microorganismos redujo la cantidad de agallas en más del 60 % en comparación con plantas infectadas únicamente con el nematodo y promovió de manera consistente un aumento en la floración entre 1.3 y 4.3 veces respecto al control, tanto en presencia como en ausencia del fitoparásito. Estos resultados sientan las bases para estudios posteriores que evalúen su efectividad en condiciones de campo y optimicen la formulación y dosificación de este tratamiento en aplicaciones agrícolas sostenibles.

Limitaciones. La principal limitación de este estudio fue el tamaño de muestra reducido utilizado en los experimentos. No obstante, el empleo de semillas certificadas permitió mantener una baja variabilidad entre las réplicas técnicas de cada experimento, lo que hizo posible realizar comparaciones estadísticas confiables de los resultados obtenidos.

Conflicto de intereses. Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés con respecto a la investigación, autoría y/o publicación de esta nota.

Financiamiento. Este trabajo fue financiado por el proyecto DGAPA-PAPIIT (IN203622) otorgado a C. Martínez-Anaya, y por el Programa de Becas de Estancias Posdoctorales por México, del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) otorgado a I. Tapia-Vázquez.

Agradecimientos. A Verónica Rojo y Chris Wood, del Laboratorio Nacional de Microscopía Avanzada (LNMA) del Instituto de Biotecnología, UNAM, por su apoyo técnico. A Leobardo Serrano y Enrique Galindo, por la revisión crítica de este trabajo.

Contribución de los autores. Concepción, ITV; Conceptualización, ITV y CMA; Metodología, ELG, ASC y GLC; Análisis formal, ELG, ITV y CMA; Investigación, ITV y CMA; Recursos, CMA, ASC y GLC; Curación de datos, ITV y ELG; Redacción – borrador original, CMA; Redacción – revisión y edición, ELG, ASC, GLC, CMA e ITV; Adquisición de financiamiento, CMA. Todas y todos los autores han leído y acordado la versión final del manuscrito.

REFERENCIAS

Balderas-Ruíz KA, Gómez-Guerrero CI, Trujillo-Roldán MA, Valdez-Cruz NA, Aranda-Ocampo S, *et al.* 2021. *Bacillus velezensis* 83 increases productivity and quality of tomato (*Solanum lycopersicum* L.): pre and postharvest assessment. Current Research in Microbial Sciences 2:100076. https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2021.100076

Basyony AG, Abo-Zaid GA. 2018. Biocontrol of the root-knot nematode, *Meloidogyne incognita*, using an eco-friendly formulation from Bacillus subtilis, lab. and greenhouse studies. Egyptian Journal of Biological Pest Control 28:87. https://doi.org/10.1186/s41938-018-0094-4

Campos MAS, Silva FSB, Yano-Melo AM, Melo NF, Pedrosa EMR, *et al*. 2013. Responses of guava plants to inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi in soil infested with *Meloidogyne enterolobii*. Plant Pathology Journal 29:242-248. https://doi.org/10.5423/PPJ.OA.10.2012.0156

Cruz-Magalhães V, Guimarães RA, Silva JCP, Faria AF, Pedroso MP, *et al*. 2022. The combination of two Bacillus strains suppresses *Meloidogyne incognita* and fungal pathogens, but does not enhance plant growth. Pest Management Science 78:722-732. https://doi.org/10.1002/ps.6685

de Paula LL, Campos VP, Terra WC, de Brum D, Jacobs DC, *et al*. 2024. The combination of *Bacillus amyloliquefaciens* and *Purpureocillium lilacinum* in the control of *Meloidogyne enterolobii*. Biological Control 189:105438. https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2023.105438

de Sá CSB, Campos MAS. 2020. Arbuscular mycorrhizal fungi decrease *Meloidogyne enterolobii* infection of guava seedlings. Journal of Helminthology 94:e183. https://doi.org/10.1017/S0022149X20000668

Díaz-Manzano FE, Amora DX, Martínez-Gómez Á, Moelbak L, Escobar C. 2023. Biocontrol of *Meloidogyne* spp. in *Solanum lycopersicum* using a dual combination of *Bacillus* strains. Frontiers in Plant Science 13:1077062. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1077062

Galindo E, Serrano-Carreón L, Gutiérrez CR, Allende R, Balderas K, *et al*. 2013. The challenges of introducing a new biofungicide to the market: a case study. Electronic Journal of Biotechnology 16(3):1-9. https://doi.org/10.2225/vol16-issue3-fulltext-6

Huang WK, Cui JK, Liu SM, Kong LA, Wu QS, *et al*. 2016. Testing various biocontrol agents against the root-knot nematode (*Meloidogyne incognita*) in cucumber plants identifies a combination of *Syncephalastrum racemosum* and *Paecilomyces lilacinus* as being most effective. Biological Control 92:31–37. https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2015.09.008

Jeong JY, Choi HG. 2026. Development and multiple cultivation seasons evaluation of a temperature-driven process-based model for tomato growth and yield in greenhouse conditions. Computers and Electronics in Agriculture 251:111919. https://doi.org/10.1016/j.compag.2026.111919

Jindapunnapat K, Chinnasri B, Kwankuae S. 2013. Biological control of root-knot nematodes (*Meloidogyne enterolobii*) in guava by the fungus *Trichoderma harzianum*. Journal of Developments in Sustainable Agriculture 8:110-118. https://doi.org/10.11178/jdsa.8.110

Kamalanathan V, Sevugapperumal N, Nallusamy S. 2023. Antagonistic bacteria *Bacillus velezensis* VB7 possess nematicidal action and induce an immune response to suppress the infection of root-knot nematode (RKN) in tomato. Genes 14:1335. https://doi.org/10.3390/genes14071335

Lamberti F. 1997. Plant nematology in developing countries: problems and progress. FAO Plant Production and Protection Paper (FAO). https://www.fao.org/4/v9978e/v9978e05.htm

Liang YJ, Ariyawansa HA, Becker JO, Yang J. 2020. The evaluation of egg-parasitic fungi *Paraboeremia taiwanensis* and *Samsoniella* sp. for the biological control of *Meloidogyne enterolobii* on Chinese cabbage. Microorganisms 8:828. https://doi.org/10.3390/microorganisms8060828

Mokbel A, Abd El-Hameed H, Massoud H, ElSayed T, Sherif N, *et al*. 2022. Impact of *Bacillus subtilis*, *Trichoderma* spp. and the bioproduct Top Perfect on *Meloidogyne incognita* infecting pepper plants. Alexandria Journal of Agricultural Sciences 67:175-181. https://doi.org/10.21608/alexja.2022.159058.1025

Nesha R, Siddiqui ZA. 2017. Effects of *Paecilomyces lilacinus* and *Aspergillus niger* alone and in combination on the growth, chlorophyll contents and soft rot disease complex of carrot. Scientia Horticulturae 218:258-264. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.11.027

Nguyen Thi H, Nguyen Thi XH, Huynh N, Phan AN, Dinh TH, Do AD. 2025. Antagonistic activity of *Purpureocillium lilacinum* PL2 against root-knot nematode (*Meloidogyne incognita*) infection on pepper plants. Journal of Phytopathology 173: e70132. https://doi.org/10.1111/jph.70132

Philbrick AN, Adhikari TB, Louws FJ, Gorny AM. 2020. *Meloidogyne enterolobii*, a major threat to tomato production: current status and future prospects for its management. Frontiers in Plant Science 11:606395. https://doi.org/10.3389/fpls.2020.606395

Salinas-Castro A, Navarro de la Fuente L, Tapia-Vázquez I, López-Lima D. 2022. First report of *Meloidogyne enterolobii* on chard (*Beta vulgaris* subsp. vulgaris) and carrot (*Daucus carota*) in México. Journal of Plant Diseases and Protection 129:1263-1268. https://doi.org/10.1007/s41348-022-00636-1

Silva SD, Carneiro RMDG, Faria M, Souza DA, Monnerat RG, *et al*. 2017. Evaluation of *Pochonia chlamydosporia* and *Purpureocillium lilacinum* for suppression of *Meloidogyne enterolobii* on tomato and banana. Journal of Nematology 49:77-85. https://doi.org/10.21307/jofnem-2017-047

Sohrabi F, Sheikholeslami M, Heydari R, Rezaee S, Sharifi R. 2018. Evaluation of four rhizobacteria on tomato growth and suppression of root-knot nematode, *Meloidogyne javanica* under greenhouse conditions: a pilot study. Egyptian Journal of Biological Pest Control 28:56. https://doi.org/10.1186/s41938-018-0059-7

Soto Deza NM, López Medina SE, Murguía Reyes CA. 2012. Eficacia de la cepa nativa de *Bacillus subtilis* como agente supresor del nematodo del nudo *Meloidogyne spp*. en cultivo de *Capsicum annuum* (ají pimiento piquillo). Revista de Investigación Agraria y Ambiental 3:25-40. https://doi.org/10.22490/21456453.931

Tamura K, Nei M. 1993. Estimation of the number of nucleotide substitutions in the control region of mitochondrial DNA in humans and chimpanzees. Molecular Biology and Evolution 10:512-526. https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.molbev.a040023

Tapia-Vázquez I, Montoya-Martínez AC, De los Santos-Villalobos S, Ek-Ramos MJ, Montesinos-Matías R, *et al*. 2022. Root-knot nematodes (*Meloidogyne* spp.) a threat to agriculture in Mexico: biology, current control strategies, and perspectives. World Journal of Microbiology and Biotechnology 38:1-18. https://doi.org/10.1007/s11274-021-03211-2

Taylor AL, Sasser JN. 1978. Biology, identification and control of root-knot nematodes (*Meloidogyne* species). https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/19780844105

Tian X, Zhao X, Zhao S, Zhao J, Mao Z. 2022. The biocontrol functions of *Bacillus velezensis* strain Bv-25 against *Meloidogyne incognita*. Frontiers in Microbiology 13:843041. https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.843041

Tintori SC, Sloat SA, Rockman MV. 2022. Rapid isolation of wild nematodes by Baermann funnel. Journal of Visualized Experiments 179:63287. https://doi.org/10.3791/63287

Vieira de Carvalho Júnior O, Sá AV, Peixoto AR, Paz CD, Cunha e Castro JM, *et al*. 2022. Local Bacillus species as potential biocontrol agents for *Meloidogyne enterolobii* in melon (*Cucumis melo* L.). Biocontrol Science and Technology 32:314-328. https://doi.org/10.1080/09583157.2021.1999394

White TJ, Bruns T, Lee S, Taylor J. 1990. Amplification and direct sequencing of fungal ribosomal RNA genes for phylogenetics. *In*: PCR Protocols: a guide to methods and applications. Academic Press, San Diego, pp. 315-322. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-372180-8.50042-1