

Evaluación de *Bacillus* spp. y *Paecilomyces* sp. en el manejo del nemátodo agallador (*Meloidogyne incognita*) en el cultivo de chile en Morelos

Evaluation of *Bacillus* spp. and *Paecilomyces* sp. in the management of root-knot nematode (*Meloidogyne incognita*) in chili crops in Morelos

Yessenia Montserrat Robles-Estrada^a, Abraham Ojeda-Monteon^b, Sergio Rubén Pérez-Ríos^c, Oscar Cervantes-Arce^d, Benito Flores Chávez^e, Iridiam Hernández-Soto^f

Haga clic o pulse aquí para escribir texto.

Abstract:

This study evaluated the efficacy of *Bacillus* spp. and *Paecilomyces* sp. in controlling root-knot nematode (*Meloidogyne incognita*) in Creole chili peppers (*Capsicum annum* L.) under protected agriculture in Morelos, Mexico. Four doses of *Bacillus methylotrophicus* (500–2000 mL ha⁻¹) and a mixture of *Paecilomyces lilacinus* + *Bacillus firmus* (4 kg ha⁻¹) were tested against a no-application control in a completely randomized block design with four replicates. Four applications were made by localized irrigation and evaluated at 30, 60, 90, and 120 days after transplant (DAT). The treatments significantly reduced soil juvenile density and root gall index, with efficacies ranging from 28 to 70%, with T3 (*B. methylotrophicus*, 1.5 L ha⁻¹) and T5 (*P. lilacinus* + *B. firmus*, 4 kg ha⁻¹) being the most effective. No phytotoxic effects were observed, and crop yield increased by over 23%, without affecting fruit quality. These results support the use of native biocontrollers as a sustainable alternative to reduce chemical nematicides and improve productivity in agroecological management systems.

Keywords:

Biocontrollers, mycorrhizal fungi, phytopathogens, agroecological management, rhizobacteria.

Resumen:

Se evaluó la eficacia de *Bacillus* spp. y *Paecilomyces* sp. en el control del nemátodo agallador (*Meloidogyne incognita*) en chile (*Capsicum annum* L.) tipo criollo bajo agricultura protegida en Morelos, México. Se probaron cuatro dosis de *Bacillus methylotrophicus* (500–2000 mL ha⁻¹) y una mezcla de *Paecilomyces lilacinus* + *Bacillus firmus* (4 kg ha⁻¹), comparadas con un testigo sin aplicación, en un diseño de bloques completamente al azar con cuatro repeticiones. Se efectuaron cuatro aplicaciones mediante riego localizado y las evaluaciones se realizaron a los 30, 60, 90 y 120 días después del trasplante (DDT). Los tratamientos redujeron significativamente la densidad de juveniles en el suelo y el índice de agallamiento radicular, con eficacias de 28 a 70 %, siendo T3 (*B. methylotrophicus*, 1.5 L ha⁻¹) y T5 (*P. lilacinus* + *B. firmus*, 4 kg ha⁻¹) los más efectivos. No se observaron efectos fitotóxicos y el rendimiento del cultivo aumentó en más del 23 %, sin afectar la calidad de los frutos. Estos resultados respaldan el uso de biocontroladores nativos como alternativa sostenible para reducir el uso de nematicidas químicos y mejorar la productividad en sistemas de manejo agroecológico.

Palabras Clave:

Biocontroladores, hongos micorrízicos, fitopatógenos, manejo agroecológico, rizobacterias.

^a Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Instituto de Ciencias Agropecuarias | Tulancingo de Bravo, Hgo | México, <https://orcid.org/0009-0007-6992-4630>, Email: yessenia4950@gmail.com

^b Autor de Correspondencia, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Instituto de Ciencias Agropecuarias | Tulancingo de Bravo, Hgo | México, <https://orcid.org/0000-0002-5697-3106>, Email: abraham_monteon@uaeh.edu.mx

^c Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Instituto de Ciencias Agropecuarias | Tulancingo de Bravo, Hgo | México, <https://orcid.org/0000-0001-7892-4842>, Email: sperez@uaeh.edu.mx

^d Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Instituto de Ciencias Agropecuarias | Tulancingo de Bravo, Hgo | México, <https://orcid.org/0000-0002-3388-2973>, Email: oarce@uaeh.edu.mx

^e Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Instituto de Ciencias Agropecuarias | Tulancingo de Bravo, Hgo | México, <https://orcid.org/0000-0002-4579-8103>, Email: profe_5566@uaeh.edu.mx

^f Iridiam Hernández-Soto, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Instituto de Ciencias Agropecuarias | Tulancingo de Bravo, Hgo | México, Email: iridiam_hernandez@uaeh.edu.mx

Introducción

El género *Capsicum* pertenece a la familia Solanaceae e incluye más de 30 especies, entre las cuales destacan *C. annuum*, *C. frutescens*, *C. pubescens*, *C. chinense*, *C. baccatum* y *C. assamicum* (Alcalá-Rico et al., 2023; Pérez-Martínez et al., 2022). Estas especies figuran entre las plantas domesticadas más antiguas de México y Mesoamérica, donde el chile (*C. annuum* L.) ha desempeñado un papel fundamental en la alimentación, la cultura y la economía. Actualmente, el chile es uno de los cultivos hortícolas de mayor relevancia económica y social en México, tanto para el consumo interno como para la exportación (Long-Solís, 2012). Se cultivan más de 150,000 ha, con una producción superior a 3.5 millones de toneladas anuales y un valor estimado de 39 mil millones de pesos (SIAP, 2025).

El cultivo enfrenta diversas limitantes fitosanitarias que afectan su rendimiento y calidad. Entre las principales plagas se encuentran el minador de la hoja (*Liriomyza* sp.), la mosquita blanca (*Bemisia tabaci*), el gusano barrenador del fruto (*Helicoverpa zea*), el gusano soldado (*Spodoptera exigua*), el gusano alfiler (*Keiferia lycopersicella*) y el picudo del chile (*Anthonomus eugenii*). Asimismo, se presentan enfermedades causadas por hongos y oomicetos como la cenicilla (*Leveillula taurica*), el tizón tardío (*Phytophthora infestans*), el tizón temprano (*Alternaria solani*) y la marchitez del chile (*Phytophthora capsici*) (Guigón-López & González-González, 2001; 2007; Mex et al., 2020; Velásquez-Valle et al., 2001).

Entre los principales patógenos del suelo, los nemátodos fitoparásitos representan un problema creciente en las zonas productoras, siendo los más relevantes el nemátodo agallador (*Meloidogyne incognita*) y el falso agallador (*Nacobbus aberrans*) (Herrera-Parra et al., 2011). *M. incognita* causa pérdidas globales estimadas en más de 100 mil millones de dólares anuales (Bartlem et al., 2014). Los síntomas incluyen clorosis foliar, defoliación y marchitez. En las raíces se observan agallas de tamaño variable producto de hipertrofia e hiperplasia celular. La infección altera la síntesis de proteínas asociadas a la formación de agallas, modifica la acción de los reguladores de crecimiento vegetal y desorganiza el tejido vascular, reduciendo significativamente el desarrollo y rendimiento de las plantas (Coyne et al., 2007; Medina-Canales et al., 2011; Navarrete-Mapen et al., 2020).

El manejo tradicional de nemátodos se ha basado principalmente en el uso intensivo de nematicidas químicos, cuya aplicación prolongada ha provocado efectos negativos sobre el ambiente, la salud humana y la biota del suelo, además de favorecer la resistencia en las poblaciones de nemátodos (Calvo-Araya & Zapata-Montes, 2020; Chi et al., 2018). En este contexto, el empleo de agentes biológicos representa una alternativa sostenible y segura para el manejo integrado de nemátodos del suelo (Chi et al., 2018).

Las rizobacterias del género *Bacillus* destacan por su capacidad para colonizar la rizosfera, inducir resistencia sistémica en las plantas y producir metabolitos con efecto nematicida o nematostático (Calvo-Araya & Zapata-Montes, 2020; Fernández-Santillán et al., 2016;

Pérez-Rodríguez et al., 2011). Por ello, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar la efectividad biológica de productos formulados a base de *Bacillus methylotrophicus*, *Bacillus firmus* y del hongo nematófago *Paecilomyces lilacinus* en el control de *Meloidogyne incognita* en el cultivo de chile.

Materiales y métodos

Ubicación del área de estudio. El estudio se realizó durante el ciclo primavera-verano 2024 en el campo "La Esperanza", municipio de Jantetelco, Morelos, México (18°41'31.5" N, 98°45'54.2" O; 1360 msnm). La región presenta un clima subhúmedo con lluvias en verano, temperatura media máxima de 24 °C y mínima de 11 °C, humedad relativa de 70 ± 15% y vientos menores a 6.6 km·h⁻¹ la mayor parte del año (SMN, 2025).

Establecimiento del experimento. El ensayo se realizó bajo condiciones de agricultura protegida, en un invernadero cubierto con polietileno blanco lechoso de calibre 720 con protección UV. Se trasplantaron plantas de chile (*Capsicum annuum* L.) variedad criolla, de 45 días de edad, en camas acolchadas blancas dispuestas en doble hilera y equipadas con cintilla de riego por goteo (calibre 8 000) con un gasto aproximado de 1.5 L·h⁻¹. La distancia entre plantas fue de 40 cm.

El invernadero presentaba un historial de infestación por nemátodos fitoparásitos. Las prácticas agronómicas—riego, fertilización y manejo del desarrollo— se mantuvieron uniformes en todas las unidades experimentales (UE) para asegurar condiciones homogéneas.

Diseño experimental. Se empleó un diseño de bloques completos al azar con seis tratamientos y cuatro repeticiones, para un total de 24 UE. Cada unidad experimental consistió en una cama de 1 m de ancho por 25 m de largo (25 m²), con aproximadamente 120 plantas, lo que representó una superficie experimental total de 600 m². Los tratamientos evaluados fueron: T1. Formulación en suspensión concentrada (SC) de *Bacillus methylotrophicus* cepa nativa equivalente a 151.98 g·L⁻¹ con un contenido de 1X10⁹ UFC·mL⁻¹ a una dosis de 0.5 L·ha⁻¹; T2. La misma formulación de *Bacillus methylotrophicus* a dosis de 1.0 L·ha⁻¹; T3. *Bacillus methylotrophicus* a dosis de 1.5 L·ha⁻¹; T4. *Bacillus methylotrophicus* a dosis de 2.0 L·ha⁻¹; T5. Formulación en polvo humectable (WP) de una mezcla de *Paecilomyces lilacinus* (Equivalente a 34 g·Kg⁻¹, con un contenido de 3.0 X10⁹ UFC/g) y *Bacillus firmus* (Equivalente a 26 g·Kg⁻¹, con un contenido de 5.0 X10⁸ UFC/g) a una dosis de 4 kg·ha⁻¹ y finalmente T6. Testigo o control sin aplicación. La aleatorización se realizó mediante el procedimiento "design.ab" del programa estadístico R® para Windows®.

Se realizaron cuatro aplicaciones de los tratamientos: la primera al momento del trasplante y las siguientes cada 30 días. Las aplicaciones se efectuaron mediante el sistema de riego por goteo (fertirriego), dirigiendo la primera al suelo durante el trasplante. Entre las unidades experimentales se dejaron tres surcos sin aplicar como barrera para evitar la deriva entre tratamientos. El volumen total de agua utilizado fue de 4103 L·ha⁻¹.

Evaluación de tratamientos. Se realizó una evaluación

inicial antes de la aplicación y posteriormente a los 30, 60, 90 y 120 días después del trasplante (DDT). Se cuantificaron juveniles de *M. incognita* por cm³ de suelo. En cada UE se tomó una muestra compuesta (1.0 kg de suelo) obtenida de cinco submuestras a 5–20 cm de profundidad en la rizósfera. Las muestras se etiquetaron y transportaron en frío al laboratorio. El número de juveniles se determinó mediante la técnica de tamizado-centrifugado, utilizando tamices de 400 y 500 mallas.

Además, se determinó el índice de agallamiento en las raíces del cultivo después de la aplicación de los tratamientos. Para ello, en cada parcela útil se seleccionaron al azar cinco plantas, evaluadas de acuerdo con la escala de Taylor y Sasser (1978), que se muestra a continuación:

Clase	Descripción de daño
0	Cero agallas
1	1-2 agallas
2	3-10 agallas
3	11-30 agallas
4	31-100 agallas
5	>100 agallas

Adicionalmente, se registraron datos de rendimiento y longitud de frutos (cm) para evaluar la cantidad y calidad de la cosecha. La producción se contabilizó por planta a los 120 días después del trasplante (DDT). El rendimiento se estimó a partir de cuatro plantas seleccionadas al azar por unidad experimental. En cuanto a la calidad, se midió la longitud (cm) de cinco frutos representativos por planta utilizando un vernier digital.

Finalmente, se evaluaron los posibles efectos fitotóxicos de las formulaciones sobre el cultivo. Para ello, se determinó el porcentaje de fitotoxicidad considerando síntomas como cambios de color, necrosis y deformaciones en hojas o frutos. Los resultados se compararon con base en la escala propuesta por la *European Weed Research Society* (EWRS), que se presenta a continuación:

Valor puntual	Efecto sobre el cultivo	% de fitotoxicidad al cultivo
1	Sin efecto	0
2	Síntomas muy ligeros	1.0 - 3.5
3	Síntomas ligeros	3.5 - 7.0
4	Síntomas sin daños	7.0 - 12.5
5	en rendimiento	12.5 - 20
6	Daño medio	20 - 30
7	Daños elevados	30 - 50
8	Daños muy elevados	50 - 99
9	Daños severos	100
	Muerte completa	

Análisis estadístico. Obtenidas las evaluaciones de juveniles·cm⁻³, índice de agallamiento, calidad de frutos

(longitud en cm), rendimiento (g/planta) y efectos fitotóxicos, se calculó la eficacia de cada tratamiento mediante la fórmula de Abbott (1925):

$$Eficacia (\%) = \frac{(IT-it)}{IT} \times 100$$

donde *IT* es la densidad de juveniles·cm⁻³, el valor del índice de agallamiento, longitud de frutos o fitotoxicidad en el testigo, e *it* corresponde a los valores de cada tratamiento.

Con los datos de supervivencia y eficacia por unidad experimental se realizaron pruebas de homogeneidad de varianzas (Levene) y normalidad (Shapiro–Wilk). El supuesto de independencia se aseguró mediante la aleatorización de los tratamientos en las unidades experimentales. Posteriormente, se efectuó un análisis de varianza (ANAVA) y una comparación de medias con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Los análisis se realizaron con el programa SAS v.9.3 (SAS Institute Inc., 2008) para Windows. Además, se efectuó un ANAVA independiente para cada evaluación (Hernández-Castro et al., 2022).

Resultados y discusión

La infestación inicial registrada en el sitio experimental al momento de la instalación del estudio osciló entre 483.5 y 500 juveniles·cm⁻³ por unidad experimental. La prueba de comparación de medias (Tukey, $p \leq 0.05$) no mostró diferencias significativas entre tratamientos, lo que confirma la homogeneidad en la distribución del nemátodo en el área experimental. En cuanto al índice de agallamiento, no se realizó una evaluación previa, ya que el manejo sanitario aplicado durante la siembra y la producción de plántulas en almácigo permitió mantener un 0 % de agallamiento inicial (Cuadro 1). Estudios previos han reportado resultados coincidentes respecto al potencial de control biológico de *Bacillus* spp. frente a *Meloidogyne incognita*. Por ejemplo, Xiong et al. (2015) demostraron que cepas marinas de *Bacillus firmus* presentaron una marcada actividad nematocida sistémica, evidenciada por la inhibición de la eclosión de huevos, la reducción de la motilidad y la mortalidad de juveniles. Además, en ensayos con plantas de tomate, dichas cepas redujeron significativamente el agallamiento, la formación de masas de huevos en raíces y la población final de nematodos en el suelo. Estos resultados respaldan el enfoque biológico del presente estudio, en el cual se busca aprovechar la capacidad de *Bacillus* spp. y *Paecilomyces* sp. para disminuir la presión de nematodos fitopatógenos en campo.

Cuadro 1. Promedio de individuos (juveniles·cm⁻³) durante la evaluación previa del estudio de eficacia de formulaciones de *Bacillus* spp. y *Paecilomyces* sp. en el manejo del nemátodo agallador (*M. incognita*) en el cultivo de chile cv. criolla en Jantetelco, Morelos, México, 2024.

Tratamiento	dosis	Individuos vivos (juveniles·cm ⁻³)
T1. <i>Bacillus methylothrophicus</i>	0.5 L·ha ⁻¹	496.00 a*
T2. <i>B. methylothrophicus</i>	1.0 L·ha ⁻¹	489.75 a
T3. <i>B. methylothrophicus</i>	1.5 L·ha ⁻¹	484.25 a
T4. <i>B. methylothrophicus</i>	2.0 L·ha ⁻¹	483.50 a
T5. <i>Paecilomyces lilacinus</i> + <i>Bacillus firmus</i>	4 kg·ha ⁻¹	500.00 a
T6. Testigo sin aplicación	NA	497.50 a
PR>F		0.99
Levene's Test		0.25

*Medias con diferentes letras en una misma columna difieren estadísticamente según la Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

Durante la primera evaluación, realizada a los 30 DDT, se observó que en el testigo sin aplicación los niveles de infestación en el suelo se mantuvieron similares a los registrados en la evaluación previa. En los tratamientos con aplicación, el promedio de juveniles·cm⁻³ osciló entre 366 y 385, sin diferencias estadísticas significativas entre ellos (prueba de Tukey, $\alpha=0.05$). Las eficacias obtenidas variaron entre 28 y 32%. A los 60 DDT, la densidad de juveniles en el suelo mostró una tendencia descendente conforme aumentó la dosis aplicada. En esta evaluación se detectaron diferencias significativas entre tratamientos. Las menores densidades de juveniles se registraron en T3 (*Bacillus methylothrophicus*, 1.5 L·ha⁻¹) y T5 (*Paecilomyces lilacinus* + *Bacillus firmus*, 4 kg·ha⁻¹), con eficacias que oscilaron entre 40 y 56% (Cuadro 2). Resultados semejantes fueron reportados por El-Nagdi et al. (2019), quienes observaron que diversas cepas de

Bacillus spp. redujeron significativamente la densidad de juveniles (J2) en el suelo, así como la formación de agallas y masas de huevos en raíces de berenjena. Además, estos autores destacaron que los tratamientos biológicos incrementaron notablemente los parámetros de crecimiento vegetal en comparación con los testigos. De igual manera, Perveen y Shahzad (2013) reportaron que tres especies de *Paecilomyces* (*P. variotii*, *P. lilacinus* y *P. fumosoroseus*) ejercieron distintos niveles de control sobre *M. incognita*, al inhibir la eclosión de huevos, reducir la densidad de juveniles y disminuir el número de agallas en frijol mungo (*Vigna radiata*). Los autores también observaron incrementos en el peso seco de brotes y raíces, tanto en condiciones *in vitro* como *in vivo*, lo que fortalece la efectividad de los agentes de biocontrol.

Cuadro 2. Promedio de individuos (juveniles·cm⁻³) y porcentaje de eficacia durante la primera y segunda evaluación de formulaciones de *Bacillus* spp. y *Paecilomyces* sp. en el manejo del nemátodo agallador (*Meloidogyne incognita*) en chile cv. Criolla, Jantetelco, Morelos, México, 2024.

Tratamiento	Dosis	Juveniles·cm ⁻³ 30 DDT	Eficacia 30 DDT (%)	Juveniles·cm ⁻³ 60 DDT	Eficacia 60 DDT (%)
T1. <i>Bacillus methylothrophicus</i>	0.5 L·ha ⁻¹	385.75 b*	28.50	315.25 b	39.17
T2. <i>B. methylothrophicus</i>	1.0 L·ha ⁻¹	370.75 b	31.28	310.25 b	40.14
T3. <i>B. methylothrophicus</i>	1.5 L·ha ⁻¹	377.00 b	30.12	242.75 c	53.16
T4. <i>B. methylothrophicus</i>	2.0 L·ha ⁻¹	370.00 b	31.42	261.25 cb	49.59
T5. <i>Paecilomyces lilacinus</i> + <i>Bacillus firmus</i>	4 kg·ha ⁻¹	366.25 b	32.11	230.00 c	55.62
T6. Testigo sin aplicación	NA	539.50 a	0.00	518.25 a	0.00
PR>F		<.0001		<.0001	
Levene's Test		0.4067		0.1417	

*Medias con diferentes letras en una misma columna difieren estadísticamente según la Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

En cuanto al índice de agallamiento, considerado un indicador de severidad del daño, se observó una reducción significativa desde la primera evaluación (30 DDT). El tratamiento T3 (*Bacillus methylothrophicus*, 1.5 L·ha⁻¹) presentó el valor más bajo en la escala de Taylor y Sasser (1978), con un promedio de 1.6 y una eficacia del 66%. No obstante, todos los tratamientos mostraron una alta efectividad en la reducción de síntomas. A los 60

DDT, el índice de agallamiento aumentó ligeramente en comparación con la primera evaluación; sin embargo, respecto al testigo sin aplicación, las eficacias se mantuvieron elevadas, con valores entre 60 y 64%, diferencias estadísticamente significativas atribuibles al efecto de los tratamientos biológicos (Cuadro 3). Resultados coincidentes fueron reportados por Habazar et

al. (2021), quienes evaluaron la eficacia de ocho cepas de *Bacillus* spp. en el manejo de *Meloidogyne* spp. y su influencia en el crecimiento y rendimiento de plantas de tomate. Los autores observaron que la inoculación de *Bacillus* spp. en semillas y plántulas redujo significativamente el número de agallas, masas de

huevos y densidad de nematodos en el suelo. Además, reportaron una mejora general en el crecimiento y rendimiento del tomate, lo cual confirma el potencial de estas bacterias como agentes de biocontrol con efectos bioestimulantes, lo que sugiere una posible acción persistente de metabolitos y enzimas asociadas a microorganismos en la rizosfera.

Cuadro 3. Promedio del índice de agallamiento (severidad) y porcentaje de eficacia durante la primera y segunda evaluación de formulaciones de *Bacillus* spp. y *Paecilomyces* sp. en el manejo del nemátodo agallador (*Meloidogyne incognita*) en chile cv. Criolla, Jantetelco, Morelos, México, 2024.

Tratamiento	Dosis	Índice de agallamiento 30 DDT	Eficacia 30 DDT (%)	Índice de agallamiento 60 DDT	Eficacia 60 DDT (%)
T1. <i>Bacillus methylotrophicus</i>	0.5 L·ha ⁻¹	2.2 b	52	2.00 b	60
T2. <i>B. methylotrophicus</i>	1.0 L·ha ⁻¹	1.7 cb	64	2.00 b	60
T3. <i>B. methylotrophicus</i>	1.5 L·ha ⁻¹	1.6 c	66	1.80 b	64
T4. <i>B. methylotrophicus</i>	2.0 L·ha ⁻¹	1.7 cb	64	2.00 b	60
T5. <i>Paecilomyces lilacinus</i> + <i>Bacillus firmus</i>	4 kg·ha ⁻¹	1.7 cb	63	2.05 b	59
T6. Testigo sin aplicación	NA	4.6 a	0	4.95 a	0
PR>F		<.0001		<.0001	
Levene's Test		0.1033		0.1514	

*Medias con diferentes letras en una misma columna difieren estadísticamente según la Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

Durante las evaluaciones finales, realizadas a los 90 y 120 DDT, se observó una reducción sustancial en la densidad de juveniles en el suelo de las unidades experimentales. Las eficacias alcanzaron valores de entre 55 y 59% en la tercera evaluación, y de 56 a 66% en la cuarta. En ambas fechas, todos los tratamientos presentaron una efectividad estadísticamente similar en el control de la infestación por el nemátodo agallador, así como en la reducción de los síntomas en raíces. Resultados análogos fueron reportados por Chinheya et al. (2017), quienes evaluaron el potencial de biocontrol de aislados de *Bacillus* spp. en soya mediante experimentos de laboratorio e invernadero. Los autores observaron que las cepas probadas causaron mortalidades de juveniles de segundo estadio (J2) entre 50 y 100 % in vitro, a las 3–24 horas de exposición. Asimismo, el tratamiento de semillas con los aislados de *Bacillus* redujo significativamente el número de agallas y masas de huevos en las raíces, además de incrementar el peso de brotes, en comparación con el control sin aplicación; lo anterior sugiere que los microorganismos aplicados podrían establecerse en la rizosfera, ejerciendo un efecto de control prolongado a través de la producción continua de enzimas hidrolíticas (quitinasas, proteasas) y metabolitos secundarios nematocidas, que inhiben la eclosión de huevos y reducen la movilidad de los juveniles (Xia et al., 2011).

En cuanto al índice de agallamiento en las últimas fechas

de evaluación, se observó que a los 90 DDT se alcanzaron las mayores eficacias de control, registrándose hasta un 70% con el tratamiento T5 (*Paecilomyces lilacinus* + *Bacillus firmus*). Por otro lado, a los 120 DDT la severidad asociada al índice de agallamiento fue similar entre los tratamientos, con valores entre 1.65 y 1.8 en la escala de Taylor y Sasser (1978), y eficacias que oscilaron entre 63 y 67% (Cuadro 5). Resultados comparables se han reportado en estudios realizados en tomate, donde cepas de *Bacillus* aplicadas de manera individual y combinada redujeron el número de agallas y masas de huevos de *M. incognita* en más del 90 % en las raíces. Sin embargo, cuando las cepas se aplicaron en combinación, la supresión de nemátodos y el aumento en el peso de brotes fueron menores que con aplicaciones individuales, sugiriendo posibles interacciones negativas entre las cepas (Cruz-Magalhães et al., 2022). Además, los metabolitos presentes en los sobrenadantes libres de células y los compuestos orgánicos volátiles (COV) de las cepas demostraron un fuerte efecto contra diversos fitopatógenos, incluyendo *M. incognita*, *Fusarium oxysporum*, *Rhizoctonia solani* y *Sclerotium rolfsii*, aunque no mostraron actividad frente a tres especies de hongos nematófagos, este es un plus importante en el establecimiento de estrategias de manejo integrado.

Cuadro 4. Promedio de individuos (juveniles·cm⁻³) y porcentaje de eficacia durante la tercera y cuarta evaluación de formulaciones de *Bacillus* spp. y *Paecilomyces* sp. en el manejo del nemátodo agallador (*Meloidogyne incognita*) en Chile cv. Criolla, Jantetelco, Morelos, México, 2024.

Tratamiento	Dosis	Juveniles·cm ⁻³ 90 DDT	Eficacia 90 DDT (%)	Juveniles·cm ⁻³ 120 DDT	Eficacia 120 DDT (%)
T1. <i>Bacillus methylotrophicus</i>	0.5 L·ha ⁻¹	246.50 b	55.36	269.25 b	56.99
T2. <i>B. methylotrophicus</i>	1.0 L·ha ⁻¹	234.50 b	57.54	272.50 b	56.47
T3. <i>B. methylotrophicus</i>	1.5 L·ha ⁻¹	225.00 b	59.26	211.75 b	66.17
T4. <i>B. methylotrophicus</i>	2.0 L·ha ⁻¹	239.25 b	56.68	232.50 b	62.86
T5. <i>Paecilomyces lilacinus</i> + <i>Bacillus firmus</i>	4 kg·ha ⁻¹	229.75 b	58.40	215.00 b	65.65
T6. Testigo sin aplicación	NA	552.25 a	0.00	626.00 a	0.00
PR>F		<.0001		<.0001	
Levene's Test		0.2923		0.2123	

*Medias con diferentes letras en una misma columna difieren estadísticamente según la Prueba de Tukey (p ≤ 0.05).

Los parámetros asociados a la calidad del fruto mostraron un comportamiento contrastante. La longitud de los frutos no presentó diferencias estadísticas significativas entre tratamientos; sin embargo, el rendimiento mostró un incremento notable, con un aumento superior al 23% en el promedio general. En este último caso, todos los tratamientos registraron valores estadísticamente similares. Diversos estudios respaldan el efecto sinérgico de cepas biocontroladoras sobre calidad y rendimiento de cultivos. Diversos estudios respaldan el efecto sinérgico de cepas biocontroladoras sobre la calidad y rendimiento de cultivos. Por ejemplo, d'Errico et al. (2019) evaluaron *Bacillus firmus*, aplicada sola o combinada con oxamilo o fostiazato, en tomate. La aplicación redujo significativamente las poblaciones de *Meloidogyne incognita* y la infección por *Pseudopyrenochaeta lycopersici*. La combinación con productos químicos

produjo el índice de agallamiento más bajo y aumentó el rendimiento hasta un 50 % respecto al control, destacando la eficacia de los tratamientos biológicos como estrategia complementaria para mejorar la productividad y el manejo de plagas. Este efecto sistémico también se ha observado en otros patosistemas. Por ejemplo, Hernández-Castillo et al. (2014) evaluaron tres cepas rizosféricas de *Bacillus* en Chile, inoculadas inicialmente a la raíz de plántulas y posteriormente al suelo de macetas. Las cepas inhibieron significativamente la actividad infectiva de *Phytophthora capsici*, *Rhizoctonia solani* y *Fusarium oxysporum*, agentes causales de marchitez. Además, estimularon el crecimiento vegetativo, peso de raíz y frutos, y rendimiento total, reduciendo la incidencia y severidad de la enfermedad, superando incluso la eficacia de un fungicida sintético utilizado como control.

Cuadro 5. Promedio del índice de agallamiento (severidad) y porcentaje de eficacia durante la tercera y cuarta evaluación de formulaciones de *Bacillus* spp. y *Paecilomyces* sp. en el manejo del nemátodo agallador (*Meloidogyne incognita*) en Chile cv. Criolla, Jantetelco, Morelos, México, 2024.

Tratamiento	Dosis	Índice de agallamiento 90 DDT	Eficacia 90 DDT (%)	Índice de agallamiento 120 DDT	Eficacia 120 DDT (%)
T1. <i>Bacillus methylotrophicus</i>	0.5 L·ha ⁻¹	2.05 b	59	1.80 b	63.6
T2. <i>B. methylotrophicus</i>	1.0 L·ha ⁻¹	1.80 cb	64	1.70 b	65.6
T3. <i>B. methylotrophicus</i>	1.5 L·ha ⁻¹	1.70 cb	66	1.65 b	66.6
T4. <i>B. methylotrophicus</i>	2.0 L·ha ⁻¹	1.90 cb	62	1.70 b	65.6
T5. <i>Paecilomyces lilacinus</i> + <i>Bacillus firmus</i>	4 kg·ha ⁻¹	1.50 c	70	1.80 b	63.6
T6. Testigo sin aplicación	NA	4.95 a	0	4.95 a	0.00
PR>F		<.0001		<.0001	
Levene's Test		0.2839		0.0358	

*Medias con diferentes letras en una misma columna difieren estadísticamente según la Prueba de Tukey (p ≤ 0.05).

Cuadro 6. Longitud de fruto (cm) y rendimiento (g/planta) a los 120 DDT durante la evaluación de formulaciones de *Bacillus* spp. y *Paecilomyces* sp. en el manejo del nemátodo agallador (*Meloidogyne incognita*) en chile cv. Criolla, Jantetelco, Morelos, México, 2024.

Tratamiento	Dosis	Longitud de fruto	Rendimiento (g/planta)
T1. <i>Bacillus methylotrophicus</i>	0.5 L·ha ⁻¹	16.6 a	245.3 b
T2. <i>B. methylotrophicus</i>	1.0 L·ha ⁻¹	16.3 a	242.4 b
T3. <i>B. methylotrophicus</i>	1.5 L·ha ⁻¹	16.3 a	244.3 b
T4. <i>B. methylotrophicus</i>	2.0 L·ha ⁻¹	16.8 a	242.9 b
T5. <i>P. lilacinus</i> + <i>Bacillus firmus</i>	4 kg·ha ⁻¹	16.2 a	246.4 b
T6. Testigo sin aplicación	NA	16.3 a	198.4 a
PR>F		0.4656	<.0001
Levene's Test		0.1175	0.2755

*Medias con diferentes letras en una misma columna difieren estadísticamente según la Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

Conclusiones

Todos los tratamientos biológicos evaluados mostraron un efecto significativo en el control de *Meloidogyne incognita* en el cultivo de chile, con variaciones en la intensidad del control atribuibles a la dosis y la cepa utilizada. Cuatro aplicaciones de las cepas nematopatógenas fueron suficientes para reducir sustancialmente la densidad de juveniles en el suelo y disminuir en más de la mitad el índice de agallamiento en plantas en campo. Además, como efecto sinérgico, los tratamientos mejoraron significativamente el rendimiento del cultivo. Estos resultados respaldan la recomendación de incorporar cepas nativas de bacterias y hongos biocontroladores y promotores de crecimiento en programas de manejo integrado de cultivos, destacando su importancia para reducir el uso de químicos sintéticos y promover sistemas agrícolas más sostenibles.

Literatura citada

[1] Alcalá-Rico, J. S. G. J., Ramírez-Meraz, M., Maldonado-Moreno, N., Borja-Bravo, M., Camposeco-Montejo, N., & López-Benitez, A. (2023). Variación morfológica en frutos de genotipos de chile piquín (*Capsicum annuum* var. *Glabriusculum*) del Noreste y Centro de México. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 10(2).

[2] Bartlem, D. G., Jones, M. G., & Hammes, U. Z. (2014). Vascularization and nutrient delivery at root-knot nematode feeding sites in host roots. *Journal of experimental botany*, 65(7), 1789-1798.

[3] Basyony, A. G., & Abo-Zaid, G. A. (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(1), 1-13.

[4] Calvo-Araya, J. A., & Zapata-Montes, N. (2020). Evaluation of nematicidal activity of fluensulfone against *Meloidogyne incognita* in Bell Pepper Crop. *International Journal of Plant & Soil Science*, 32(10), 52-59.

[5] Chi, J. I. C., Alejo, J. C., Suárez, J. M. T., Luna, F. A. P., & De la Cruz, J. C. (2018). Especies nativas de *Trichoderma* spp. y su actividad antagónica contra

Meloidogyne incognita en *Solanum lycopersicum* L. *Investigación y Ciencia*, 26(73), 5-12.

[6] Chinheya, C. C., Yobo, K. S., & Laing, M. D. (2017). Biological control of the rootknot nematode, *Meloidogyne javanica* (Chitwood) using *Bacillus* isolates, on soybean. *Biological control*, 109, 37-41.

[7] Cruz-Magalhães, V., Guimarães, R. A., Da Silva, J. C., de Faria, A. F., Pedroso, M. P., Campos, V. P., ... & De Souza, J. T. (2022). The combination of two *Bacillus* strains suppresses *Meloidogyne incognita* and fungal pathogens, but does not enhance plant growth. *Pest management science*, 78(2), 722-732.

[8] d'Errico, G., Marra, R., Crescenzi, A., Davino, S. W., Fanigliulo, A., Woo, S. L., & Lorito, M. (2019). Integrated management strategies of *Meloidogyne incognita* and *Pseudopyrenochaeta lycopersici* on tomato using a *Bacillus firmus*-based product and two synthetic nematicides in two consecutive crop cycles in greenhouse. *Crop Protection*, 122, 159-164.

[9] El-Nagdi, W. M., & Abd-El-Khair, H. (2019). Application of *Bacillus* species for controlling root-knot nematode *Meloidogyne incognita* in eggplant. *Bulletin of the National Research Centre*, 43(1), 154.

[10] Fernández-Santillán, G., Cerna-Rebaza, L., & Ruiz, J. C. (2016). Eficacia de *Paecilomyces lilacinus* en el control de *Meloidogyne incognita* que ataca al cultivo de *Capsicum annuum*, "pimiento piquillo". *Fitosanidad*, 20(3), 109-119.

[11] Guigón-López, C., & González, P. A. G. (2001). Estudio regional de las enfermedades del chile (*Capsicum annuum*, L.) y su comportamiento temporal en el sur de Chihuahua, México. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 19(1), 49-56.

[12] Guigón-López, C., & González-González, P. A. (2007). Manejo de plagas en el cultivo de chile y su impacto ambiental en la zona agrícola de Jiménez-Villa López, Chihuahua, México: Pest management in the pepper crop and their environmental impact in the Jiménez-Villa López, Chihuahua, México agricultural zone. *TECNOCIENCIA Chihuahua*, 1(2), 36-47.

[13] Habazar, T., Yanti, Y., Dani, M. R., & Monica, D. (2021, May). Biocontrol of *Meloidogyne* sp. on tomato plants by selected *Bacillus* spp. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 757, No. 1, p. 012019). IOP Publishing.

[14] Hernández-Castillo, F. D., Lira-Saldivar, R. H., Gallegos-Morales, G., Hernández-Suárez, M., &

- Solis-Gaona, S. (2014). Biocontrol de la marchitez del chile con tres especies de *Bacillus* y su efecto en el crecimiento y rendimiento. *Phyton (Buenos Aires)*, 83(1), 49-55.
- [15] Herrera-Parra, E., Cristóbal-Alejo, J., Tun-Suárez, J. M., Góngora-Jiménez, J. A., & Lomas-Barrie, C. T. (2011). Nematofauna nociva (*Meloidogyne* spp.) en cultivos hortícolas tropicales: Distribución y perspectivas de manejo en Yucatán. *Recursos genéticos microbianos en la zona Golfo-Sureste de México*, 1, 138-150.
- [16] Long-Solís, J. (2012). Capsicum y cultura: la historia del chilli, 203. Fondo de Cultura Económica, Mexico City, Mexico.
- [17] Mex, R. M., GARCEZ, A. N., & SANCHEZ, E. R. (2020). Biología y manejo de plagas del cultivo de chile habanero. *Martín-Mex, R., Nexticapán-Garcéz, A., & Ruiz-Sánchez, E. (2020). Biología y manejo de plagas del cultivo de chile habanero. En CIATEJ (Ed.), Metabolómica y cultivo del chile habanero (Capsicum chinense Jacq) de la Península de Yucatán.*, 42-54.
- [18] Navarrete-Mapen, R. Z. N., Alejo, J. C., Suarez, J. M. T., Parra, E. D. L. Á. H., & Vázquez, A. U. (2020). Principales enfermedades del chile habanero (*Capsicum chinense*) y su control. *Navarrete-Mapen, RZ, Cristóbal-Alejo, J., Tun-Suárez, JM, Herrera-Parra, E., & Uc-Varguez, A. (2020). Principales enfermedades del chile habanero (Capsicum chinense) y su control. En CIATEJ (Ed.), Metabolómica y cultivo del chile habanero.*
- [19] Pérez-Martínez, A. L., Eguiarte, L. E., Mercer, K. L., Martínez-Ainsworth, N. E., McHale, L., van der Knaap, E., & Jardón-Barbolla, L. (2022). Genetic diversity, gene flow, and differentiation among wild, semiwild, and landrace chile pepper (*Capsicum annuum*) populations in Oaxaca, Mexico. *American Journal of Botany*, 109(7), 1157-1176.
- [20] Pérez-Rodríguez, I., Franco-Navarro, F., del Prado-Vera, I. C., & Zavaleta-Mejía, E. (2011). Nontrol de *Nacobbus aberrans* en chile ancho (*Capsicum annuum* L.) mediante el uso combinado de enmiendas orgánicas, hongos nematófagos y nematocidas. *Nematropica*, 122-129.
- [21] Perveen, Z., & Shahzad, S. (2013). A comparative study of the efficacy of *Paecilomyces* species against root-knot nematode *Meloidogyne incognita*.
- [22] Perveen, Z., & Shahzad, S. (2013). A comparative study of the efficacy of *Paecilomyces* species against root-knot nematode *Meloidogyne incognita*.
- [23] Velásquez-Valle, R., Medina-Aguilar, M. M., & Luna-Ruiz, J. D. J. (2001). Sintomatología y géneros de patógenos asociados con las pudriciones de la raíz del chile (*Capsicum annuum* L.) en el Norte-Centro de México. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 19(2), 175-181.
- [24] Xia, Y., Xie, S., Ma, X., Wu, H., Wang, X., & Gao, X. (2011). The purL gene of *Bacillus subtilis* is associated with nematocidal activity. *FEMS microbiology letters*, 322(2), 99-107.
- [25] Xiong, J., Zhou, Q., Luo, H., Xia, L., Li, L., Sun, M., & Yu, Z. (2015). Systemic nematocidal activity and biocontrol efficacy of *Bacillus firmus* against the root-knot nematode *Meloidogyne incognita*. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 31(4), 661-667