



Artículo Científico

Toxicidad de fungicidas de contacto en cuatro especies de *Trichoderma*, un enfoque de compatibilidad *in vitro*

Conrado Parraguirre-Lezama, Omar Romero-Arenas *, Centro de Agroecología, Instituto de Ciencias, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Edificio VAL 1, Km 1,7 Carretera a San Baltazar Tetela, San Pedro Zacachimalpa, Puebla 72960, México; **Alba Cruz Coronel, Amparo Mauricio-Gutiérrez**, Posgrado en Manejo Sostenible de Agroecosistemas, Instituto de Ciencias, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla; **Carlos A Contreras-Paredes**, Jardín Botánico Universitario, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla Colonia San Manuel, 72590 Puebla, México; **Antonio Rivera Tapia**, Centro de Investigaciones en Ciencias Microbiológicas. Instituto de Ciencias (ICUAP), Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP). *Autor para correspondencia: biol.ora@hotmail.com

*Autor de
correspondencia:

Omar Romero-Arenas
biol.ora@hotmail.com

Sección:

Edición periódica

Recibido:

25 Febrero 2024

Aceptado:

13 Diciembre 2024

Publicado:

27 Diciembre 2024

Adelantada, 2025

Cita:

Parraguirre-Lezama C,
Romero-Arenas O, Cruz
CA, Mauricio-Gutiérrez
A, et al., 2025. Toxicidad
de fungicidas de contacto
en cuatro especies de
Trichoderma, un enfoque
de compatibilidad *in vitro*.
Revista Mexicana de
Fitopatología 43(1): 46.
[https://doi.org/10.18781/R.
MEX.FIT.2402-7](https://doi.org/10.18781/R.MEX.FIT.2402-7)



RESUMEN

Objetivo/Antecedentes. La transición hacia prácticas agrícolas responsables es fundamental para promover la salud de los agroecosistemas y garantizar la seguridad alimentaria. Impulsar investigaciones integrales que combinen métodos químicos y biológicos representa un avance significativo en el manejo de fitopatógenos, es decir, esta aproximación novedosa se basa en la premisa de que la acción conjunta entre fungicidas y un agente antagonico como *Trichoderma* spp., pueden ofrecer una protección robusta en comparación con enfoques individuales. El objetivo del estudio es investigar la resistencia y compatibilidad *in vitro* de cuatro especies de *Trichoderma* frente a tres fungicidas ampliamente utilizados en México.

Materiales y Métodos. Se empleó la técnica de intoxicación controlada en medio PDA bajo condiciones controladas con tres concentraciones (450, 900 y 1350 mg L⁻¹), para el caso de los ingredientes activos Captan y Clorotalonil, para Mancozeb se utilizaron 600, 1200 y 1800 mg L⁻¹. La compatibilidad se determinó en relación con el grupo control utilizando el software estadístico SPSS Statistics versión 26 para el entorno operativo Windows.

Resultados. El estudio reveló que las cepas de *T. harzianum*, *T. hamatum*, *T. koningiopsis* y *T. asperellum* exhibieron una compatibilidad global del 60.04% para los ingredientes activos evaluados, siendo el fungicida Captán 50® el que demostró el mayor porcentaje de compatibilidad (79.87%) en las concentraciones de 450,

900 y 1350 mg L⁻¹. *T. harzianum* mostró mayor tolerancia al ingrediente activo Clorotalonil en la concentración de 450 mg L⁻¹, sin embargo, a concentraciones más altas demostró mayor toxicidad, siendo *T. koningiopsis* la que exhibió la menor resistencia en sus tres concentraciones evaluadas.

Conclusión. Los tratamientos con diferentes concentraciones de los fungicidas Captan, Mancozeb y Clorotalonil evidenciaron una marcada variabilidad en términos de prevalencia y toxicidad hacia las especies evaluadas de *Trichoderma in vitro*. Este enfoque permite diseñar estrategias de manejo integrado minimizando la dependencia de productos químicos y promoviendo la compatibilidad entre agentes biológicos y fungicidas.

Palabras clave: Hongos, fitopatógenos, toxicidad, resistencia.

INTRODUCCIÓN

En el escenario actual de la agricultura, el control de patógenos asociados a enfermedades en cultivos se enfrenta a desafíos importantes debido al uso frecuente y extensivo de insumos industriales, los llamados agrotóxicos (Hensh *et al.*, 2022) que han aumentado significativamente en los últimos años para incrementar la productividad de los sistemas agrícolas (Zhang *et al.*, 2018; Balaska *et al.*, 2023). Sin embargo, la sobreexposición ha llevado al desarrollo de resistencia, reduciendo su efectividad y generando preocupaciones ambientales (Lamichhane *et al.*, 2018; Sharma *et al.*, 2019; Andrade-Hoyos *et al.*, 2023).

En México, la implementación de los esquemas tecnológicos de la revolución verde durante la segunda mitad del siglo XX, introdujo prácticas agrícolas convencionales, así como el uso extendido de fertilizantes y pesticidas para la producción agrícola (Rivera *et al.*, 2022), así mismo, se estima que alrededor de 900 pesticidas son empleados por los agricultores mexicanos en diversos cultivos.

Algunos pesticidas están clasificados como altamente peligrosos, según la lista elaborada por Pesticide Action Network International (PAN, 2016), implicando severos efectos ecológicos e impactos negativos en la salud de la población local y consumidores (Muhie *et al.*, 2022, Rosas-Sánchez *et al.*, 2023). De acuerdo con los datos disponibles, actualmente las regiones de México con mayor uso de pesticidas son Sinaloa, Chiapas, Veracruz, Jalisco, Nayarit, Colima, Sonora, Baja California, Tamaulipas, Michoacán, Tabasco, Estado de México, Oaxaca y Puebla, en donde se aplica el 80 % del total de pesticidas utilizados en el país. Además, se han reportado sitios contaminados con 28 pesticidas en 15 estados de la república mexicana de acuerdo con datos reportados por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Ortiz-Hernández *et al.*, 2017; SEMARNAT, 2020).

Año tras año, cantidades de fungicidas varían considerablemente, oscilando entre 395 y 13.16 toneladas; reflejando la extensa dependencia del país a estos productos para la protección de los cultivos (García-Gutiérrez *et al.*, 2012). Además, no existe información pública disponible sobre el nombre, ingrediente activo y cantidad de cada uno de los fungicidas autorizado que se aplica a nivel nacional (Cruz *et al.*, 2022). Según García *et al.* (2018) los ingredientes activos como Captan, Mancozeb y Clorotalonil, pueden identificarse como los de mayor aplicación en el país.

La exploración de estrategias agrícolas que buscan potenciar la eficacia en el control de fitopatógenos para la producción de alimentos, ha llevado a la posibilidad de generar sinergias beneficiosas mediante la combinación de fungicidas y antagonistas biológicos como *Trichoderma* spp. (Abd *et al.*, 2019). Esta aproximación novedosa se basa en la premisa de que la acción conjunta de fungicidas y *Trichoderma* spp., puede ofrecer una protección robusta contra fitopatógenos en comparación con enfoques individuales (Yao *et al.*, 2023; Parraguirre *et al.*, 2023). La investigación en este ámbito, busca comprender y optimizar las interacciones para desarrollar prácticas agrícolas efectivas y respetuosas con el ambiente; marcando un paso significativo hacia la integración de métodos químicos y biológicos en la gestión de fitopatógenos en la agricultura (Terrero-Yépez *et al.*, 2028; Ruano-Rosa *et al.*, 2018; Zin *et al.*, 2020; Rodríguez *et al.*, 2023).

El énfasis en la integración de métodos químicos y biológicos, como el caso del uso del género *Trichoderma*, refleja un cambio en el manejo integrado para la agricultura, reconociendo la importancia de equilibrar la eficacia de los tratamientos con la preservación de la biodiversidad y la sostenibilidad agrícola. Al adoptar esta premisa, los agricultores pueden no solo combatir eficientemente diferentes tipos de fitopatógenos, sino también, promover la salud a largo plazo de los agroecosistemas (Tyśkiewicz *et al.*, 2022). Esta transición hacia prácticas agrícolas que minimizar los impactos negativos de los fungicidas, no solo representa un paso significativo en la dirección correcta, sino que también sienta las bases para un futuro resiliente y armonioso para la producción de alimentos sanos (Mishenin *et al.*, 2021). En este contexto, surge la necesidad de explorar soluciones innovadoras, es por ello que, el presente estudio tuvo el objetivo de investigar la resistencia y compatibilidad *in vitro* de cuatro especies de *Trichoderma* en tres ingredientes activos de amplio espectro utilizados en México.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se desarrolló en el Laboratorio 204 de Fitopatología del Centro de Agroecología Edificio VAL 1 del Instituto de Ciencias de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla.

Material biológico. Las cepas utilizadas fueron previamente caracterizadas e identificadas taxonómica y molecularmente (Andrade-Hoyos *et al.*, 2020). Para este estudio se utilizó *Trichoderma harzianum* (T-H4) colectada en Tetela de Ocampo, Puebla, *Trichoderma koningiopsis* (T-K11) colectada en Guadalajara, Jalisco y *Trichoderma asperellum* (T-AS1) colectada en Hidalgo, todas ellas aisladas de la rizósfera de aguacate (*Persea americana*), la cepa *Trichoderma hamatum* (T-A12) fue colectada en Tlaltipa, Veracruz, aislada de la rizósfera de canela (*Verum de cinnamomun*). Las secuencias se encuentran depositadas en la base de datos del Centro Nacional de Información Biológica (NCBI) con los números de Acceso: MK779064, MK791648, MK778890 y MK791650, respectivamente. Así mismo, se encuentran resguardadas en el Laboratorio de Fitopatología 204 del Centro de Agroecología del Instituto de Ciencias, BUAP.

Caracterización del crecimiento en condiciones estándar. Se utilizaron fragmentos de 10 días de edad de 5 mm de diámetro con crecimiento activo de las cepas de *Trichoderma* desarrolladas en medio PDA (Bioxon, Becton Dickinson, Ciudad de México, México). Estos fragmentos se colocaron individualmente en cajas Petri (9 cm de diámetro) que contenían 20 mL de PDA (Bioxon, Becton Dickinson, Ciudad de México, México) y se incubaron a 28 ± 2 °C durante 10 días en la oscuridad. Cada 12 h, se midió el crecimiento micelial con un Vernier digital (CD-6 Mitutoyo, Naucalpan de Juárez, México) obteniendo el promedio de cuatro mediciones por unidad experimental (4 cajas Petri). El diámetro (d) se calculó usando la fórmula: $d=2 \times r$ (Mannerucci *et al.*, 2023). El experimento se repitió por duplicado en un diseño estadístico completamente al azar, con cuatro repeticiones para cada tratamiento.

Ensayo de resistencia y tolerancia a fungicidas *in vitro*. Se empleó la técnica de intoxicación controlada descrita por Azza *et al.* (2021), que consistió en colocar discos de 5 mm de diámetro con micelio activo de 10 días de edad de las cepas T-H4 de *T. harzianum*, T-K11 de *T. koningiopsis*, T-AS1 de *T. asperellum* y T-A12 de *T. hamatum*. Se preparó medio de cultivo PDA (Bioxon, Becton Dickinson, Ciudad de México, México) siguiendo las instrucciones del fabricante, adicionalmente se suplementó con algún ingrediente activo de tres marcas de fungicidas protectores (Captán 50[®], Mancosol 80[®], Talonil 75[®]) a tres concentraciones diferentes, expresada en mg L⁻¹: (a) bajo (la mitad de la dosis comercial recomendada); (b) recomendado (dosis comercial autorizada por el fabricante) y; (c) alto (duplicar la dosis comercial recomendada) (Cuadro 1).

Finalmente, se colocaron discos de 5 mm de diámetro obtenidos de cultivos de *Trichoderma* de 10 días de edad desarrollados en medio PDA (Bioxon, Becton Dickinson, Ciudad de México, México) sobre cajas de Petri de 9 cm de diámetro

Cuadro 1. Fungicidas utilizados a diferentes concentraciones evaluadas.

Fungicida (Nombre comercial)	Ingrediente activo	Fórmula molecular	Concentración (mg L ⁻¹)		
			Bajo	Recomendado	Alto
Captán 50®	Captan	C ₉ H ₈ Cl ₃ NO ₂ S	450	900	1350
Mancosol 80®	Mancozeb	C ₄ H ₆ MnN ₂ S ₄	600	1200	1800
Talonil 75®	Clorotalonil	C ₈ Cl ₄ N ₂	450	900	1350

que contenían 20 mL de PDA con los diferentes tratamientos (fungicidas) por triplicado. Las placas fueron incubadas a 28 °C ± 2 con un fotoperíodo de 12 h durante 10 días para inducir la esporulación (Escudero-Leyva *et al.*, 2022). Como grupo de control, se utilizó medio PDA siguiendo las instrucciones del fabricante, sin la adición de fungicidas.

La evaluación concluyó cuando el micelio del grupo control de cada cepa evaluada cubrió completamente la caja de Petri. Para calcular el porcentaje de inhibición del crecimiento micelial, se aplicó la fórmula $PI = [(X-Y)/X] \times 100$ propuesta por Sundar *et al.*, (1995), dónde: PI= Porcentaje de inhibición, X=Diámetro de la colonia en placa control y Y=Diámetro de la colonia en placa tratada.

Para evaluar el efecto sobre la capacidad de formación de conidios (CFC) de cada uno de los ingredientes activos de los fungicidas a diferentes concentraciones, se empleó la técnica descrita por Castellanos *et al.* (2015) con algunas modificaciones. Se tomaron placas de 10 días de crecimiento de cada una de las cepas de *Trichoderma* provenientes de los medios con diferentes fungicidas y el grupo control; en ellas se colocaron 9 mL de agua estéril con 1 mL de Tween 80 al 0.01 % (el Tween 80 se utilizó para reducir la tensión superficial del agua y permite una distribución homogénea de los conidios para realizar un conteo preciso bajo el microscopio óptico). Posteriormente, la suspensión de conidios obtenidos se traspasó a tubos de ensayo de 160 × 20 mm y se aforó a 20 mL de volumen final con agua estéril en un matraz volumétrico. Cada tubo se situó en el agitador Vortex durante 30 segundos y, luego se procedió al conteo de conidios (conidios mL⁻¹) en la cámara de Neubauer. Adicionalmente, se calculó el porcentaje de esporulación (ESP) para cada tratamiento de fungicida en relación con el grupo control.

Ensayo de compatibilidad a fungicidas *in vitro*. Se consideraron los dos indicadores previamente evaluados: el porcentaje de inhibición del crecimiento micelial y el porcentaje de esporulación a los 10 días, mediante la aplicación de la fórmula $C = [20(CV) + 80(ESP)] / 100$, establecida por Alves *et al.* (1998), donde: C=Valor corregido para la clasificación del producto, CV=Porcentaje de inhibición del crecimiento micelial del tratamiento con relación al grupo control y ESP=Porcentaje de

esporulación del tratamiento con relación al testigo. Posteriormente, la compatibilidad de cada ingrediente activo se determinó mediante los valores de C, siguiendo la escala propuesta por Alves *et al.* (1998): A) Muy tóxico de 0 a 30 %; B) Tóxico de 31 a 45 %, C) Moderadamente tóxico de 46 a 60% y D) Compatible cuando es mayor de 60 %. Este enfoque proporciona una medida cuantitativa de la compatibilidad de cada plaguicida con las cepas de *Trichoderma*, permitiendo una evaluación objetiva de los efectos observados.

Análisis estadístico. Los datos recopilados fueron sometidos a un modelo lineal multivariante con análisis factorial completo (MANOVA) utilizando el software estadístico SPSS Statistics versión 26 para el entorno operativo Windows. Las variables de respuesta fueron el diámetro de crecimiento micelial, la tasa de esporulación y el porcentaje de inhibición del crecimiento micelial, siendo los factores fijos el ingrediente activo, las diferentes concentraciones evaluadas y las cuatro especies de *Trichoderma* sometidas en este estudio. Se aplicó la prueba de esfericidad de Bartlett para evaluar la homogeneidad de las covarianzas, seguida de una prueba de comparación de medias de Tukey-Kramer con un nivel de significancia $p \leq 0.05$.

Las variables porcentaje de inhibición de crecimiento micelial (PI) y el porcentaje de esporulación (ESP) se sometieron a una transformación mediante la función arcocoseno angular ($\sqrt{x + 1}$). Posteriormente, la compatibilidad (C) fue analizada mediante un análisis de componentes principales (PCA) y un meta-análisis utilizando el paquete estadístico Jamovi Statistics versión 2.0 para Windows. Los resultados del meta-análisis se presentaron en términos de la diferencia de medias acompañada de su intervalo de confianza (IC) al 95 %. Además, se incluyeron los valores de la heterogeneidad (I^2) y significancia estadística.

RESULTADOS

Los resultados obtenidos para análisis de Varianza Multivariada tipo III, revelan que las variables independientes, como los ingredientes activos, las especies de *Trichoderma* spp., y las diferentes concentraciones de cada uno de los ingredientes activos, tienen un efecto altamente significativo ($p = 0.0001$) sobre las variables porcentaje de índice de crecimiento (PI %), diámetro de la colonia y la concentración de conidios por mililitro, además las interacciones entre ingredientes activos y especies, así como entre ingredientes activos y concentración, también mostraron ser estadísticamente significativas, lo que indica que la eficacia de los ingredientes activos puede variar dependiendo de la especie de *Trichoderma* spp., y la concentración utilizada. Esto indica que la eficacia de los ingredientes activos no es uniforme, sino que varía considerablemente dependiendo de la especie de *Tricho-*

derma involucrada y la concentración aplicada, lo que sugiere que algunas especies pueden presentar resistencia o sensibilidad a ciertos compuestos químicos, lo que es crucial para diseñar estrategias de manejo integradas y específicas.

El modelo estadístico empleado es robusto, explicando entre el 92.2 y el 94% de la variabilidad en los datos, como lo reflejan los valores de R^2 ajustado. Esto sugiere que las variables evaluadas son determinantes clave en la respuesta observada en *Trichoderma* spp., y refuerza la importancia de considerar múltiples factores y sus interacciones en estudios de eficacia de agentes biocontroladores (Cuadro 2). Estos hallazgos proporcionan una base sólida para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas en el manejo de enfermedades agrícolas. Esto es especialmente importante en el contexto del manejo integrado de enfermedades, donde la selección precisa de ingredientes activos en combinación con especies y concentraciones adecuadas puede optimizar los resultados y minimizar los efectos adversos en el agroecosistema.

Cuadro 2. Análisis multifactorial de varianza (MANOVA) parcial para los efectos de los Ingredientes activos, especies (*Trichoderma* spp.) y concentración sobre el porcentaje de inhibición de crecimiento micelial (PI), diámetro (mm) y capacidad de formación de conidios (CFC).

Origen	Variable dependiente	Tipo III de suma de cuadrados	gL	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido ^x	X ₁ =PI (%)	123455.289 ^a	39	3165.52	64.664	<0.001
	X ₂ = Diámetro (mm)	95923.155 ^b	39	2459.56	48.886	<0.001
	X ₃ = CFC (Conidios mL ⁻¹)	245 E+05 ^c	39	6.30E+23	61.986	<0.001
Ingredientes activos * Especies * Concentración n ^y	X ₁	4048.447	12	337.371	6.892	<0.001
	X ₂	4.1764E+23	12	3.4803E+22	2.702	<0.001
	X ₃	2270.496	12	189.208	4.768	<0.003

^xDiseño: Intersección + Ingredientes activos + Especies (*Trichoderma* spp.) + Concentración n; ^yIngredientes activos * Especies (*Trichoderma* spp) * Concentración n; Concentración n: $R^2 = 0.955$ (R^2 ajustado = 0.94)_a; Diámetro: $R^2 = 0.95$ (R^2 ajustado = 0.94)_b; CFC: $R^2 = 0.941$ (R^2 ajustado = 0.92)_c; Significancia alpha = 0.05.

Se observa una clara disminución en el diámetro de las colonias fúngicas con el incremento de la concentración de los ingredientes activos, especialmente en las concentraciones altas de Mancozeb (1800 mg L⁻¹) y Clorotalonil (1350 mg L⁻¹). En términos de esporulación, los resultados indican que el grupo control permitió una alta concentración de conidios en todas las especies de *Trichoderma*, con valores superiores a 1.4E+12 conidios mL⁻¹ (Cuadro 3).

El tratamiento DTH0, utilizado como control, exhibe un diámetro alto en *T. hamatum* en comparación con otros tratamientos, mientras que la capacidad de esporulación es significativamente mayor en este mismo tratamiento en comparación con otras especies de *Trichoderma*. *T. harzianum* presentó un diámetro de 22.31

Cuadro 3. Evaluación de cuatro especies de *Trichoderma* a diferentes concentraciones de fungicidas en condiciones controladas.

Código	Ingrediente activo	Especies	Concentración (mg L ⁻¹)	Diámetro±DE (mm) ^x	CFC±DE (conidios mL ⁻¹) ^x
DTHR0	Agua (Control)	<i>T. harzianum</i>	-	90.00±0.01 ^a	1.66E+12±3.59E+07 ^a
DTK0		<i>T. konigiopsis</i>		89.99±0.01 ^a	1.47E+12±2.46E+07 ^a
DTH0		<i>T. hamatum</i>		88.95±0.01 ^a	1.41E+12±1.50E+07 ^a
DTA0		<i>T. asperellum</i>		89.17±0.01 ^a	1.48E+12±1.13E+07 ^a
DTHR1		<i>T. harzianum</i>	450	42.38±1.30 ^{cdefg}	4.76E+11±2.14E+11 ^{bcd}
DTHR2			900	37.88±1.30 ^{cdefghi}	3.49E+11±1.56E+11 ^{bcd}
DTHR3			1350	35.50±0.58 ^{cdefghi}	2.26E+11±3.38E+10 ^{cdefg}
DTK1	Captan	<i>T. konigiopsis</i>	450	43.88±9.99 ^{cdef}	5.48E+11±5.70E+10 ^{bcd}
DTK2			900	31.13±14.75 ^{defghij}	3.96E+11±1.34E+11 ^{bcd}
DTK3			1350	25.19±12.60 ^{hijkl}	1.85E+11±5.45E+10 ^{defg}
DTH01		<i>T. hamatum</i>	450	39.88±1.65 ^{cdefgh}	3.54E+11±3.90E+10 ^{bcd}
DTH02			900	34.75±5.04 ^{cdefghi}	3.24E+11±2.40E+11 ^{cdefg}
DTH03			1350	27.50±5.26 ^{ghijk}	2.08E+11±1.04E+10 ^{defg}
DTA1		<i>T. asperellum</i>	450	49.50±15.22 ^c	4.15E+11±9.46E+10 ^{bcd}
DTA2			900	40.75±15.50 ^{cdefgh}	3.98E+11±3.07E+10 ^{bcd}
DTA3			1350	35.75±14.19 ^{cdefghi}	2.74E+11±1.09E+10 ^{cdefg}
DTHR4		<i>T. harzianum</i>	600	29.75±4.31 ^{efghij}	1.28E+11±3.18E+10 ^{efg}
DTHR5			1200	26.56±4.97 ^{ghijkl}	9.00E+10±1.06E+10 ^{fg}
DTHR6			1800	22.31±1.95 ^{ijklm}	5.63E+10±1.30E+10 ^g
DTK4	Mancozeb	<i>T. konigiopsis</i>	600	47.13±9.55 ^{cd}	3.47E+11±1.16E+11 ^{bcd}
DTK5			1200	45.81±2.12 ^{cde}	1.13E+11±6.29E+10 ^{efg}
DTK6			1800	41.44±2.88 ^{cdefgh}	1.13E+11±6.29E+10 ^{efg}
DTH4		<i>T. hamatum</i>	600	36.00±2.71 ^{cdefghi}	3.21E+11±7.92E+10 ^{defg}
DTH5			1200	34.81±5.32 ^{cdefghi}	1.58E+11±1.01E+11 ^{defg}
DTH6			1800	10.75±0.96 ^{lmn}	1.13E+11±6.29E+10 ^{efg}
DTA4		<i>T. asperellum</i>	600	66.50±12.12 ^b	2.94E+11±1.86E+11 ^{cdefg}
DTA5			1200	30.50±1.34 ^{efghij}	5.25E+10±6.12E+09 ^g
DTA6			1800	11.00±0.82 ^{klmn}	2.06E+10±1.55E+10 ^g
DTHR7		<i>T. harzianum</i>	450	12.50±3.42 ^{klmn}	3.84E+11±8.23E+10 ^{bcd}
DTHR8			900	11.75±1.71 ^{klmn}	2.84E+11±1.01E+10 ^{cdefg}
DTHR9			1350	10.50±1.29 ^{lmn}	2.59E+11±9.93E+10 ^{cdefg}
DTK7		<i>T. konigiopsis</i>	450	17.00±2.58 ^{ijklmn}	5.48E+11±6.06E+10 ^{bcd}
DTK8			900	14.75±2.50 ^{ijklmn}	5.03E+11 ± 6.93E+10 ^{bcd}
DTK9			1350	11.50±1.91 ^{klmn}	4.26E+11±4.98E+10 ^{bcd}
DTH7	Clorotalonil	<i>T. hamatum</i>	450	1.50±0.58 ⁿ	2.00E+11±2.58E+04 ^{defg}
DTH8			900	1.25±0.50 ⁿ	2.00E+11±2.58E+04 ^{defg}
DTH09			1350	1.50 ± 0.58 ⁿ	1.13E+11 ± 6.29E+10 ^{efg}
DTA7		<i>T. asperellum</i>	450	12.50±1.29 ^{klmn}	7.39E+11 ± 1.05E+11 ^b
DTA8			900	6.50±2.38 ^{mn}	6.24E+11 ± 3.75E+10 ^{bc}
DTA9			1350	1.25±0.50 ⁿ	1.25E+11 ± 6.45E+10 ^{efg}

^xLetras iguales indican que no hay diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) entre los tratamientos. DE: desviación estándar.

mm a 1800 mg L⁻¹ en el ingrediente activo Mancozeb y 10.50 mm a 1350 mg L⁻¹ en Clorotalonil.

El ingrediente activo Captan mostró una reducción moderada en el diámetro, siendo menos efectivo a bajas concentraciones (450 mg L⁻¹) en comparación con los ingredientes Mancozeb y Clorotalonil. Sin embargo, la aplicación del ingrediente Clorotalonil mostró un fuerte impacto negativo sobre la capacidad de formación de conidios, especialmente en las especies *T. hamatum* y *T. asperellum*, que llegaron a tan solo 1.13E+11 y 1.25E+11 conidios mL⁻¹ respectivamente en la concentración de 1350 mg L⁻¹.

Par el ingrediente activo Mancozeb en concentraciones de 600 mg L⁻¹, logró mantener alta la esporulación en comparación con Clorotalonil, pero aun así mostró una reducción considerable respecto al control (Cuadro 3).

La Figura 1 revela el porcentaje de inhibición del crecimiento micelial (PI) de diferentes especies de *Trichoderma* a los ingredientes activos Captan, Mancozeb y

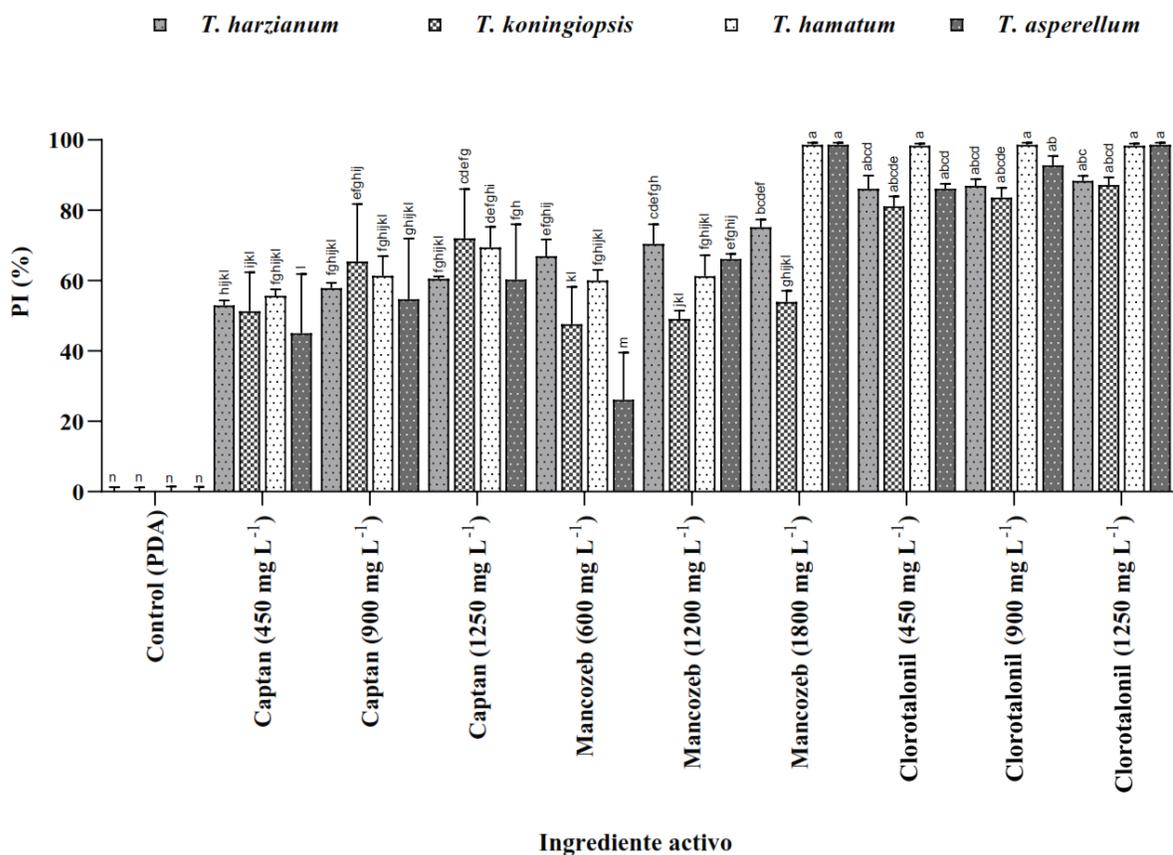


Figura 1. Porcentaje de inhibición del crecimiento micelial (PI) de cuatro especies de *Trichoderma* a diferentes concentraciones de fungicidas en condiciones controladas. *Letras iguales indican que no hay diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) entre los tratamientos.

Clorotalonil. Los tratamientos que muestran un rango de porcentaje de inhibición entre el 40 y 60% y mayor crecimiento micelial a los diferentes ingredientes activos de los fungicidas son DTH1-3, DTK1, DTHR1-2, al ingrediente activo Captan en las tres concentraciones evaluadas, seguido de DTA4-6 y DTHR1 para Mancozeb a la concentración 600 mg L⁻¹.

Estos resultados sugieren una capacidad moderada para el fenómeno estudiado en comparación con el al ingrediente activo Clorotalonil, que presenta una mayor eficacia para inhibir el crecimiento micelial de las diferentes especies de *Trichoderma* spp., evaluadas. Clorotalonil muestra ser efectivo en inhibir el crecimiento micelial en sus tres concentraciones evaluadas.

Estos hallazgos resaltan la importancia de la concentración de fungicida en la regulación del porcentaje de inhibición (PI) de las especies de *Trichoderma* estudiadas. Además, revelan diferencias en la respuesta de cada especie a los diferentes ingredientes químicos de cada fungicida, lo que subraya la necesidad de considerar la variabilidad intraespecífica de las especies de *Trichoderma*, al diseñar estrategias de control, resistencia y compatibilidad hacia la transición de prácticas agrícolas para el combate de fitopatógenos.

En el presente estudio, la compatibilidad de diferentes concentraciones de fungicidas con los antagonistas aislados nativos de la rizósfera de aguacate reveló variaciones altamente significativas ($p = 0.0001$). Se observó una reducción de compatibilidad con el incremento en la concentración de los diferentes fungicidas, lo cual sugiere una potencial tolerancia diferencial de las especies de *Trichoderma* evaluadas. El análisis de componentes principales mostró una agrupación de tratamientos de acuerdo con la escala establecida por Alves *et al.* (1998), predefinida de compatibilidad y toxicidad específicas (Figura 2).

Este análisis reveló que el 93.1% de la variabilidad puede ser explicada por dos componentes principales: los ejes están etiquetados como “Dim 1 (73.9%)” y “Dim 2 (19.2%)”, indicando las dimensiones del análisis principal. Además, se destacó que aproximadamente el 65% de los tratamientos fueron clasificados como compatibles, seguidos por aquellos moderadamente compatibles (15.6%) y los considerados muy tóxicos (13.1%). La categoría de clasificación toxico presentó el menor porcentaje de distribución de grupos, representando solo el 6.3% de los casos analizados.

Finalmente, se realizó un meta-análisis utilizando la diferencia de la \bar{x} y la SD de los diferentes tratamientos $K=40$ como medida de resultado en el análisis. Se observaron diferencias de medias de (T) que oscilaron entre 1.38 y 99.98, con la gran mayoría de las estimaciones siendo positivas (100%). La diferencia media promedio estimada, basada en el modelo de efectos aleatorios, fue de $\mu^{\wedge} = 60.04$ (IC del 95%: 49.00 a 71.08). Este valor promedio difirió significativamente de cero ($t(39) = 10.99, p < 0.0001$), indicando una notable tendencia en los resultados.

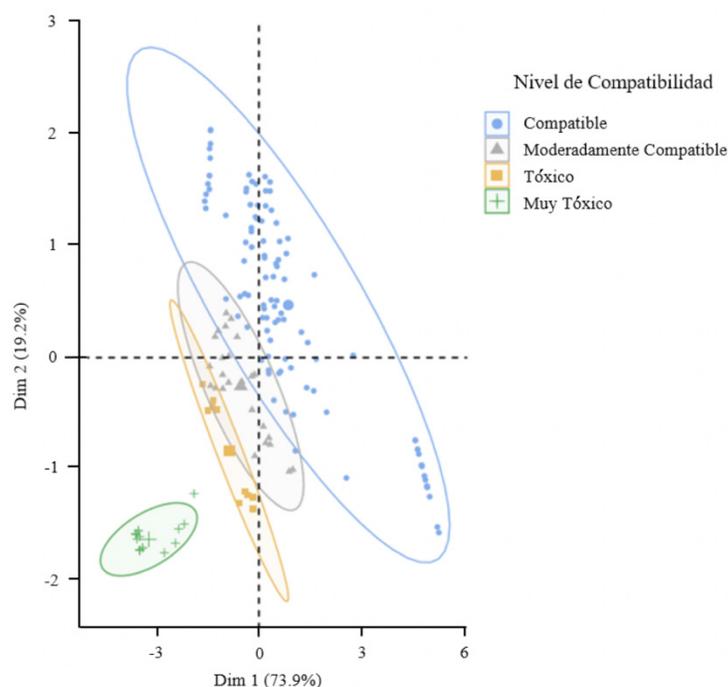


Figura 2. Análisis de componentes principales explicó el 93.1% de la varianza en dos componentes respecto a la compatibilidad de cuatro cepas nativas de *Trichoderma* en diferentes concentraciones de fungicidas de acuerdo con una escala establecida por Alves *et al.* (1998).

Además, la prueba de heterogeneidad reveló resultados significativos ($Q(39) = 411015.47$, $p < 0.0001$, $\tau^2 = 1184.30$, $i^2 = 100\%$), lo que sugiere una variabilidad sustancial entre los estudios incluidos en el análisis, brindando una comprensión detallada de la variabilidad de los efectos observados con un intervalo de predicción del 95% (Figura 3).

El meta-análisis reveló que las cepas de T-H4 de *T. harzianum*, T-K11 de *T. koningiopsis*, T-AS1 de *T. asperellum* y T-A12 de *T. hamatum* exhibieron una compatibilidad global del 60.04%.

Entre los ingredientes activos evaluados, el ingrediente activo Captan (Captan 50®) en concentraciones de 450, 900 y 1350 mg L⁻¹, demostró el mayor porcentaje de compatibilidad (79.87%), en contraste con otros ingredientes activos como Mancozeb (Mancosol 80®) y Calonil (Talonil 75®), que presentaron 72.24% y 14.82% de compatibilidad, respectivamente.

La cepa T-A12 de *T. hamatum* mostró una mayor resistencia al ingrediente activo Captán a una concentración de 1350 mg L⁻¹, mientras que la cepa T-AS1 de *T. asperellum* exhibió una menor resistencia a la misma concentración. En cuanto al ingrediente activo Mancozeb, la cepa T-H4 de *T. harzianum* mostró una alta compatibilidad en las concentraciones de 600, 1200 y 1800 mg L⁻¹, mientras que la

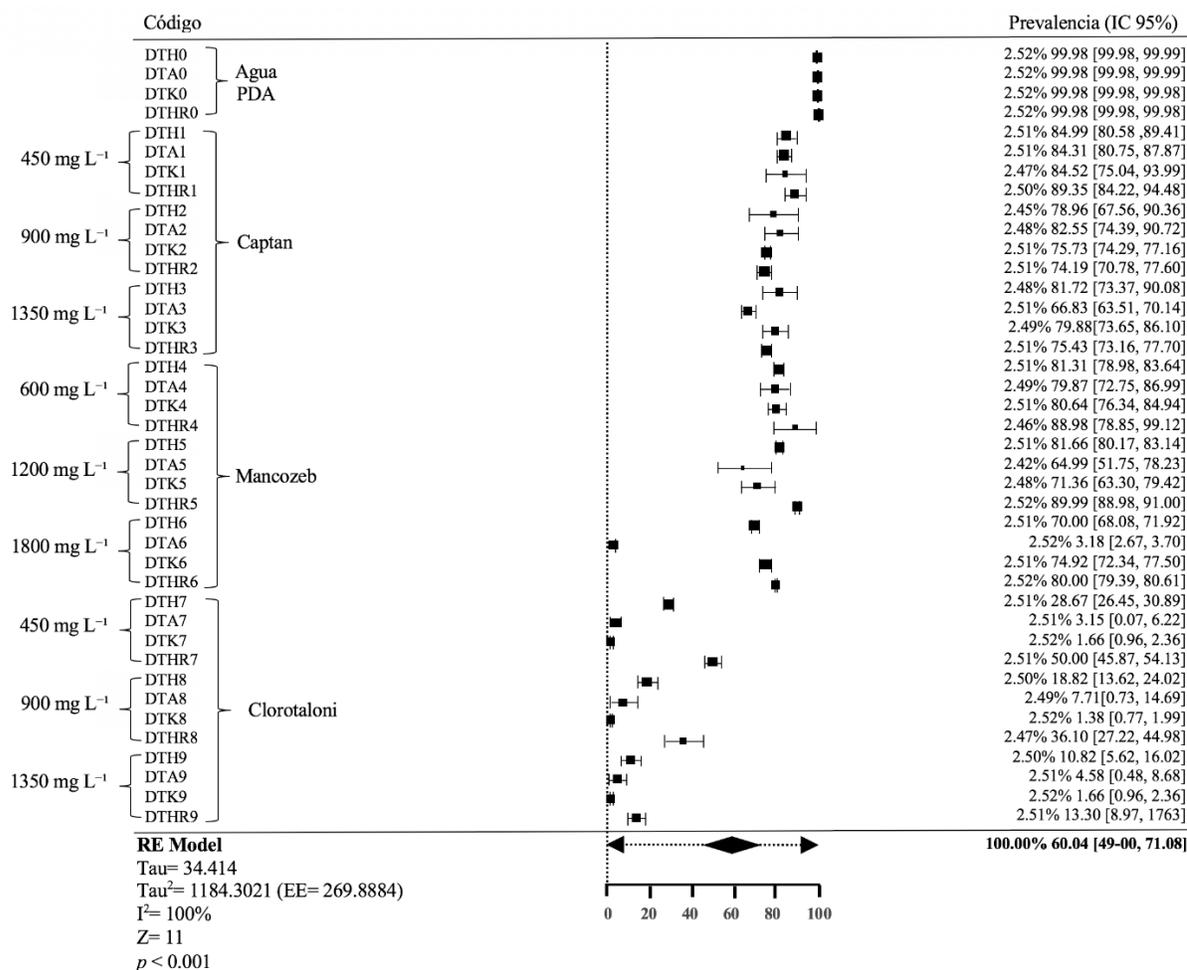


Figura 3. Forest plot representa la compatibilidad C (%), indicada por las medias y sus intervalos de confianza del 95%, asociados con cada combinación de cepa y concentración de fungicida indicando la resistencia relativa y toxicidad.

cepa T-AS1 de *T. asperellum* presentó alta toxicidad a una concentración de 1800 mg L⁻¹. Por otro lado, las cepas de T-H4 de *T. harzianum* mostró una toxicidad moderadamente al ingrediente activo Clorotalonil a una concentración de 450 mg L⁻¹, sin embargo, las cepas T-AS1 de *T. asperellum*, T-K11 de *T. koningiopsis* y T-A12 de *T. hamatum* demostraron ser tóxicas en sus tres concentraciones evaluadas, observando que la cepa T-K11 de *T. koningiopsis* exhibió la menor resistencia a este fungicida como se muestra en la Figura 3.

DISCUSIÓN

El control biológico de patógenos en plantas se ha convertido en un área prometedora en la fitosanidad. Esta estrategia no solo minimiza la dependencia de pla-

guicida sintéticos, sino que también son comparativamente económicos y factibles (Kumar *et al.*, 2023). En la agroecología, la mejora de la producción agrícola mediante tecnologías combinadas, como estrategias de protección vegetal, desempeña un papel importante, mejorando así la producción y productividad de los cultivos (Deguine *et al.*, 2023). *Trichoderma* spp., está siendo ampliamente empleado para el manejo de patógenos de las plantas y constituye un componente esencial del manejo integrado de fitopatógenos (Maheshwary *et al.*, 2020).

Las especies del género *Trichoderma* son de gran interés por sus beneficios en la agricultura y ecosistemas naturales. Tiene actividad antagonista contra varios patógenos de plantas; principalmente hongos como *Fusarium oxysporum*, *F. solani*, *B. cinerea*, *S. sclerotiorum*, *S. minor*, *Rhizoctonia solani*, *Phytophthora capsici*, *Phytophthora parasitica*, *Chondrostereum purpureum*, *Macrophomina phaseolina*, *Podosphaera xanthii*, *Alternaria alternata*, *Pythium aphanidermatum* y *Pythium ultimum* entre otros (Aceves *et al.*, 2001; Guigón-López *et al.*, 2010; Ruiz-Cisneros *et al.*, 2017; Correa-Pacheco *et al.*, 2018; Miguel-Ferrer *et al.*, 2021; Sánchez-Montesinos *et al.*, 2021).

Los resultados obtenidos proporcionan información crucial para la selección y aplicación de fungicidas, permitiendo una gestión eficiente y específica de enfermedades. Además, el análisis de componentes principales y el metaanálisis ofrecen herramientas robustas para comprender la estructura de la variabilidad en la respuesta de los tratamientos, lo que puede informar estrategias futuras de manejo integrado de enfermedades en sistemas agrícolas.

Peláez-Álvarez *et al.* (2016) mencionan el uso integrado de *T. asperellum* (T8a) y una dosis baja de Captán (100 mg/L^{-1}), donde obtuvieron una mayor inhibición del crecimiento de *C. gloeosporioides* (ATCC MYA 454) en condiciones *in vitro*, una cepa patógena que causa antracnosis en el cultivo de mango. Sin embargo, el Captan en Europa tiene condiciones de uso específicas por su asociación con enfermedades cancerígenas en humanos y Mancozeb está restringido lo que justifica este tipo de estudios (Gensch *et al.*, 2024).

En el presente estudio, la cepa T-K11 de *T. koningiopsis* mostró una moderada compatibilidad con el ingrediente activo Mancozeb. Estos hallazgos están de acuerdo con González *et al.* (2020), quienes demostraron en condiciones *in vitro* que, cuando se añade Mancozeb al medio de cultivo en concentraciones inferiores a 5 mg/mL , el crecimiento micelial de *Trichoderma* no se inhibe significativamente. *Trichoderma* puede resistir concentraciones relativamente altas de una variedad de compuestos tóxicos sintéticos y naturales, lo que depende de un complejo sistema de bombas de membrana a través del cual se llevan a cabo mecanismos eficientes de desintoxicación celular (Ruocco *et al.*, 2009; Asad, 2022).

Se ha reportado la compatibilidad de *T. harzianum* con fungicidas como el Mancozeb en evaluaciones *in vitro* en medios basales, observando nula inhibición en el

crecimiento radial a 25 y 50 mg L⁻¹ después de 192 y 240 h de incubación, respectivamente (Ajay *et al.*, 2018). Es destacable que Huilgol *et al.* (2022) observaron la compatibilidad de *T. harzianum* con Mancozeb (71.80%), como se observa en la presente investigación. Existen factores que causan la tolerancia de las cepas de *Trichoderma* a los pesticidas, como el cambio en la función de los genes de la oxidorreductasa y los genes transportadores ABC que resultan en la tolerancia de *Trichoderma* spp. a diclorvos, mancozeb, tiram, tebuconazol y carbendazim (Hu *et al.*, 2016; Hirpara *et al.*, 2018; Sun *et al.*, 2019).

Estos resultados, en concordancia con investigaciones anteriores, enfatizan el potencial de cepas de *Trichoderma* en combinación con ingredientes activos Captan y Mancozeb con potencial en el manejo integrado, contribuyendo así a la transición de prácticas agrícolas respetuosas con el agroecosistema. Sin embargo, estos estudios fueron realizados *in vitro* por lo que se requieren aun estudios en entornos productivos diversos y bajo presión de fitopatógenos específicos, además de comprender la ecología de los hongos antagonistas, así como realizar experimentos en un ambiente libre de fungicidas. En este sentido, evaluar la tolerancia/resistencia a los fungicidas químicos es un prerrequisito para que *Trichoderma* spp., se considere en los programas de control biológico (Garman *et al.*, 2006; Adnan *et al.*, 2019; Alfiky *et al.*, 2021; Parraguirre *et al.*, 2023; Zapata-Narváez *et al.*, 2023).

La incompatibilidad entre *Trichoderma* spp. y el ingrediente activo Clorotalonil, plantea desafíos significativos en la implementación de prácticas agrícolas para la producción de alimentos sanos (Elshahawy *et al.*, 2016). Los hallazgos de esta investigación revelaron que las cuatro cepas de *Trichoderma* spp. evaluadas mostraron incompatibilidad con el fungicida Clorotalonil en diversas concentraciones (450, 900 y 1350 mg L⁻¹). Este resultado coincide con investigaciones previas realizadas por Gangopadhyay *et al.* (2009), donde reportaron una alta toxicidad de Clorotalonil para *T. viride*, corroborando los hallazgos de la presente investigación al demostrar la incompatibilidad a Clorotalonil con la cepa T-A12 de *T. hamatum*, aun cuando es una especie diferente.

Se destaca que el ingrediente activo Clorotalonil es un fungicida foliar ampliamente utilizado en todo el mundo, actúa como un componente aromático policlorado de amplio espectro que interfiere con la respiración celular y la síntesis de ATP en los hongos, lo que puede resultar en la muerte celular (Cruz *et al.*, 2022). Estas observaciones subrayan la importancia de comprender la toxicidad de fungicidas en agentes de control biológico como *Trichoderma* spp., como el caso de Clorotalonil, que puede comprometer el desarrollo de estrategias de manejo integrado y la capacidad de los agricultores para gestionar eficazmente enfermedades de cultivos. La integración de tecnologías en protección vegetal, desempeña un papel destacado en la mejora de la productividad agrícolas (Shang *et al.*, 2019; Bokade *et al.*, 2021).

De acuerdo a los resultados obtenidos, es importante explorar un rango más am-

plio de concentraciones de los fungicidas (Captan, Mancozeb y Clorotalonil) para identificar dosis óptimas que balanceen la toxicidad y compatibilidad con más especies de *Trichoderma* provenientes de diferentes regiones geográficas. Así mismo, investigar los mecanismos enfocados en la expresión génica, actividad enzimática y la fisiología celular subyacentes a la tolerancia o susceptibilidad de las cepas de *Trichoderma* frente a fungicidas, estos estudios podrían revelar adaptaciones específicas y ayudar a predecir la evolución de la resistencia. Por otro lado, es primordial, llevar los resultados en condiciones de campo para validar los resultados de laboratorio, con el fin de evaluar factores como suelo, microbiota nativo y condiciones climáticas que afectan la compatibilidad entre los fungicidas y *Trichoderma* en un ecosistema agrícola más complejo.

La presente investigación en torno a la toxicidad y compatibilidad entre fungicidas y *Trichoderma* spp., nativos de rizósfera de aguacate (*Persea americana*) y canela (*Cinnamomun verum*) adquiere una relevancia significativa en el contexto de la agricultura. Este enfoque permite evaluar de manera integral la interacción entre agentes de control biológico y químico, con el objetivo de desarrollar prácticas agrícolas que minimicen los impactos ambientales y que permitan la efectividad y la selección de agentes microbianos con fines de control biológico.

CONCLUSIONES

Los tratamientos con diferentes concentraciones de los fungicidas Captan, Mancozeb y Clorotalonil evidenciaron una marcada variabilidad en términos de prevalencia y toxicidad hacia las especies evaluadas de *Trichoderma*. Las concentraciones más altas demostraron ser significativamente más tóxicas, mientras que las dosis bajas permitieron una mayor prevalencia de los organismos evaluados.

En el caso del fungicida Mancozeb, a la dosis de 1800 mg L⁻¹, resultó ser altamente tóxica para la cepa de *T. asperellum*. Este fungicida de contacto es efectivo en general para un amplio espectro de hongos que causan infección en órganos vegetales aéreos.

El fungicida Captan, aplicado a bajas concentraciones, mostró una disminución variable en la prevalencia de las cuatro cepas de *Trichoderma*, lo que sugiere que la compatibilidad está directamente influenciada por la dosis utilizada. Entre las cepas evaluadas, *T. harzianum* presentó la mayor compatibilidad (89.35 %), seguido de *T. koningiopsis* y *T. asperellum*, particularmente a una dosis de 450 mg L⁻¹, donde se observó una menor toxicidad. Estos resultados destacan la importancia de ajustar las dosis de Captan para maximizar la eficacia del fungicida sin comprometer la actividad biológica de *Trichoderma*, lo que resulta esencial para su integración en programas de manejo integrado.

Respecto al Clorotalonil, la cepa T-H4 de *T. harzianum* mostró una mayor tolerancia a una concentración de 450 mg L⁻¹; sin embargo, se observó una alta toxicidad a concentraciones superiores (900 y 1350 mg L⁻¹), clasificadas como niveles 2 y 1, respectivamente. En contraste, la cepa T-K11 se identificó como la más susceptible a este ingrediente activo.

La variabilidad observada en las respuestas de las especies evaluadas resalta que no todas han desarrollado mecanismos efectivos de resistencia o tolerancia a ciertos ingredientes activos, posiblemente debido a presiones selectivas específicas en sus ambientes locales. Este hallazgo refuerza la importancia de evaluar de manera integral la interacción entre fungicidas químicos y agentes biológicos como *Trichoderma*. Una comprensión más profunda de estas interacciones permitirá diseñar estrategias de manejo integrado, minimizando la dependencia de productos químicos y promoviendo la compatibilidad entre agentes biológicos y fungicidas.

Conflicto interés

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Fondos

Esta investigación no recibió financiación externa

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONA-CyT) No. 4746 y al Laboratorio 204 del Centro de Agroecología de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

Contribuciones de Autores

Concepción O.R.-A. y C.P.L.; conceptualización, O.R.-A. y A.C.C.; metodología, C.A.C.P., C.P.L. y O.R.-A.; software, A.M.G. y A.C.C.; validación, O.R.-A., A.R.T.; análisis formal, A.R.T., A.M.G. y O.R.-A.; investigación A.C.C., A.M.G. y O.R.-A.; recursos, O.R.-A., C.P.L. y A.R.T.; redacción: preparación del borrador original, A.C.C., C.A.C.P. y A.M.G.; redacción, revisión y edición, C.P.L. y O.R.-A.; visualización, O.R.-A., C.A.C.P. y A.R.T.; supervisión, O.R.-A.; administración del proyecto, O.R.-A. y C.P.L.; adquisición de fondos, O.R.-A. y A.R.T. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

REFERENCIAS

- Abd-El-Khair H, Elshahawy IE and Haggag HE. 2019. Field application of *Trichoderma* spp., combined with thiophanate-methyl for controlling *Fusarium solani* and *Fusarium oxysporum* in dry bean. Bulletin of the National Research Centre 43:19. <https://doi.org/10.1186/s42269-019-0062-5>

- Aceves ACM, Domínguez OR, Gutiérrez RL, Moreno MEO, Escamilla JCM, and Samuels GJ. 2001. Especies de *Trichoderma* en suelos cultivados con mango afectados por Escoba de bruja y su potencial inhibitorio sobre *Fusarium oxysporum* y *F. subglutinans*. Revista Mexicana de Fitopatología 19(2):154-160.
- Adnan M, Islam W, Shabbir A, Khan KA, Ghramh HA, Huang Z, and Lu GD. 2019. Plant defense against fungal pathogens by antagonistic fungi with *Trichoderma* in focus. Microbial pathogenesis 129:7-18. <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2019.01.042>
- Ajay T, Ramji S and Durga P. 2018. Compatibility *Trichoderma harzianum* with systemic and two non-systemic fungicides of *in vitro*. Asian Journal of Crop Science 10:174-179. <https://dpi.org/10.3923/ajcs2018.174.179>
- Alfiky A, and Weisskopf L. 2021. Deciphering *Trichoderma*–Plant–Pathogen Interactions for Better Development of Biocontrol Applications. *J. Fungi* 7: 61. <https://doi.org/10.3390/jof7010061>
- Alves SB, Moino JA and Almeida JEM. 1998. Productos fitosanitarios y entomopatógenos. Controle microbiano de insectos. 2da. Edición. FEALQ. Piracicaba, SP Brasil. 1163 p.
- Andrade-Hoyos P, Rivera-Jiménez MN, Landero-Valenzuela N, Silva-Rojas HV, Martínez-Salgado SJ y Romero-Arenas O. 2023. Beneficios ecológicos y biológicos del hongo cosmopolita *Trichoderma* spp. en la agricultura: una perspectiva en el campo mexicano. Revista Argentina de Microbiología 55:366-377. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2023.06.005>
- Andrade-Hoyos, P., Silva-Rojas, H.V., Romero-Arenas, O. (2020). Endophytic *Trichoderma* species isolated from the roots of *Persea americana* and *Cinnamomum verum* reduce the symptoms caused by *Phytophthora cinnamomi* in avocado. Plants 9, 1220e. <https://doi.org/10.3390/plants9091220>
- Asad SA. 2022. Mechanisms of action and biocontrol potential of *Trichoderma* against fungal plant diseases-A review. Ecological Complexity 49:100978. <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2021.10098>
- Azza RE, Hala MI y Saná AM. 2021. El papel del almacenamiento en las formulaciones fungicidas de Mancozeb y su actividad antifúngica contra *Fusarium oxysporium* y *Rhizoctonia solani*. Arabian Journal of Chemistry 14:103322. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2021.103322>
- Balaska V, Adamidou Z, Vryzas Z and Gasteratos A. 2023. Sustainable crop protection via robotics and artificial intelligence solutions. Machines 11:774. <https://dx.doi.org/10.3390/machines11080774>
- Bokade P, Purohit HJ and Bajaj A. 2021. Myco-remediation of chlorinated pesticides: insights into fungal metabolic system. Indian Journal of Microbiology 61:237-249. <https://doi.org/10.1007/s12088-021-00940-8>
- Castellanos GL, Lorenzo NME, Muñoz BL, Hernández PR y Guillen SD. 2015. Efecto *in vitro* de plaguicidas comerciales sobre *Trichoderma harzianum* cepa A-34. Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo 47:185-196.
- Correa-Pacheco ZN, Bautista-Baños S, Hernández-López M, and Marquina-Valle MÁ. 2018. Evaluación de nanoformulaciones en el desarrollo *in vitro* de hongos fitopatógenos. Revista Mexicana de Fitopatología 36(3):457-467. <https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.1803-2>
- Cruz Coronel A, Parraguirre LC, Pacheco HY, Santiago TO, Rivera TA and Romero-Arenas O. 2022. Efficacy of four *in vitro* fungicides for control of wilting of strawberry crops in Puebla-Mexico. Applied Sciences 12: 3213. <https://doi.org/10.3390/app12073213>
- Deguine JP, Aubertot JN, Bellon S, Côte F, Lauri PE, Lescourret F and Lamichhane JR. 2023. Agroecological crop protection for sustainable agriculture. Advances in agronomy 178:1-59. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2022.11.002>
- Elshahawy IE, Haggag KHE and Abd-El-Khaira H. 2016. Compatibility of *Trichoderma* spp. with seven chemical fungicides used in the control of soil borne plant pathogens. Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences 7:1772-1785.
- Escudero-Leyva E, Alfaro-Vargas P, Muñoz-Arrieta R, Charpentier-Alfaro C, Granados-Montero MDM, Valverde-Madrigal KS and Mora-Villalobos JA. 2022. Tolerance and biological removal of fungicides by *Trichoderma* species isolated from the endosphere of wild Rubiaceae plants. Frontiers in Agronomy 3:772170. <https://doi.org/10.3389/fagro.2021.772170>
- Gangopadhyay S, Gopal R and Godara SL. 2009. Effect of fungicides and antagonists on *Fusarium* wilt of Cumin. Journal of Mycology and Plant Pathology 39:331-334.
- García HJ, Leyva MJB, Martínez RIE, Hernández OMI, Aldana MML, Rojas GAE, Betancourt LM, Pérez HNE y Perera RJH. 2018. Estado actual de la investigación sobre plaguicidas en México. Revista Internacional de Contaminación Ambiental 34:29-60. <https://doi.org/10.20937/RICA.2018.34.esp01.03>

- García-Gutiérrez C y Rodríguez-Meza GD. 2012. Problemática y riesgo ambiental por el uso de plaguicidas en Sinaloa. *Ra Ximhai* 8:1-10.
- Garman GE. 2006. Overview of Mechanisms and Uses of *Trichoderma* spp. *Phytopathology* 96(2):190-194.
- Gensch L, Jantke K, Rasche L, and Schneider U.A. 2024. Pesticide risk assessment in European agriculture: Distribution patterns, ban-substitution effects and regulatory implications. *Environmental Pollution* 348:123836. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.123836>
- González MF, Magdama F, Galarza L, Sosa D and Romero C. 2020. Evaluation of the sensitivity and synergistic effect of *Trichoderma reesei* and mancozeb to inhibit under *in vitro* conditions the growth of *Fusarium oxysporum*. *Communicative and Integrative Biology* 13:160-169. <https://doi.org/10.1080/19420889.2020.1829267>
- Guigón-López C, Guerrero-Prieto V, Vargas-Albores F, Carvajal-Millán E, Ávila-Quezada GD, Bravo-Luna L, and Lorito M. 2010. Identificación molecular de cepas nativas de *Trichoderma* spp. su tasa de crecimiento *in vitro* y antagonismo contra hongos fitopatógenos. *Revista Mexicana de Fitopatología* 28(2):87-96.
- Hensh S and Raheman H. 2022. An unmanned wetland paddy seeder with mechatronic seed metering mechanism for precise seeding. *Computers and Electronics in Agriculture* 203:107463. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107463>
- Hirpara DG and Gajera HP. 2018. Molecular heterozygosity and genetic exploitations of *Trichoderma* inter-fusants enhancing tolerance to fungicides and mycoparasitism against *Sclerotium rolfsii* Sacc. *Infection, Genetics and Evolution* 66:26-36.
- Hu X, Roberts DP, Xie L, Yu C, Li Y, Qin L and Liao X. 2016. Use of formulated *Trichoderma* sp. Tri-1 in combination with reduced rates of chemical pesticide for control of *Sclerotinia sclerotiorum* on oilseed rape. *Crop Protection* 79:124-127. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2015.10.020>
- Huilgol SN, Pratibha MP, Hedge GM and Banu H. 2022. Evaluation and compatibility of new fungicides with *Trichoderma harzianum* for managing the charcoal rot of soybean. *The Pharma Innovation Journal* 11:659-664.
- Kumar V, Koul B, Taak P, Yadav D and Song M. 2023. Journey of *Trichoderma* from pilot scale to mass production: A Review. *Agriculture* 13:2022. <https://doi.org/10.3390/agriculture13102022>
- Lamichhane JR, Osdaghi E, Behlau F, Kohl J, Jones JB y Noel J. 2018. Trece décadas de compuestos de cobre antimicrobianos aplicados en la agricultura. Una revisión. *Agronomy for Sustainable Development* 38:28. <http://dx.doi.org/10.1007/s13593-018-0503-9>
- Maheshwary NP, Gangadhara NB, Amoghavarsha C, MK N, S KM and Nandish M. 2020. Compatibility of *Trichoderma asperellum* with fungicides. *The Pharma Innovation Journal* 9:136-140.
- Mannerucci F, D'Ambrosio G, Regina N, Schiavone D and Bruno GL. 2023. New potential biological limiters of the main esca-associated fungi in Grapevine. *Microorganisms* 11:2099. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11082099>
- Miguel-Ferrer L, Romero-Arenas O, Andrade-Hoyos P, Sánchez-Morales P, Rivera-Tapia JA, and Fernández-Pavía SP. 2021. Actividad antifúngica de *Trichoderma harzianum* y *T. koningiopsis* contra *Fusarium solani* asociado en la germinación y vigor de plántulas de chile Miahuateco. *Revista Mexicana de Fitopatología* 39(2):228-247. <https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.2101-5>
- Mishenin Y, Yarova I and Koblianska I. 2021. Ecologically harmonized agricultural management for global food security. Pp. 29-76. In: Jhariya MK, Meena RS, Banerjee A. (eds). *Ecological Intensification of Natural Resources for Sustainable Agriculture*. Springer. Singapore. 655p. https://doi.org/10.1007/978-981-33-4203-3_2
- Muhie SH. 2022. Novel approaches and practices to sustainable agriculture. *Journal of Agriculture and Food Research* 10:100446. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100446>
- Ortiz-Hernández ML, Rodríguez A, Sánchez-Salinas E, Castrejón-Godínez M.L. 2017. Bioremediation of soils contaminated with pesticides: experiences in Mexico. A. Alvarez, M. Polti (Eds.), *Bioremediation in Latin America*, Springer, Cham. pp. 69-99.
- PAN, Pesticide action network. 2016. PAN International list of highly hazardous pesticides. https://pan-international.org/wp-content/uploads/PAN_HHP_List.pdf (consulta, enero 2024).
- Parraguirre LC, Romero-Arenas O, Valencia de Ita MDLA, Rivera A, Sangerman JDM and Huerta-Lara M. 2023. *In vitro* study of the compatibility of four species of *Trichoderma* with three fungicides and their antagonistic activity against *Fusarium solani*. *Horticulturae* 9: 905. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9080905>

- Peláez-Álvarez A, Santos-Villalobos SDL, Yépez EA, Parra-Cota FI and Reyes-Rodríguez RT. 2016. Synergistic effect of *Trichoderma asperelleum* T8A and Captan against *Colletotrichum gloeosporioides* (Penz.). *Revista mexicana de ciencias agrícolas* 7:1401-1412.
- Rivera A, Cedillo RL, Parraguirre LC, Baez SA, Laug GB and Romero-Arenas O. 2022. Evaluation of cytotoxic and genotoxic risk derived from exposure to pesticides in corn producers in Tlaxcala, Mexico. *Applied Sciences* 12:9050. <https://doi.org/10.3390/app12189050>
- Rodríguez AO, May De Mio LL and Soccol CR. 2023. *Trichoderma* as a powerful fungal disease control agent for a more sustainable and healthy agriculture: recent studies and molecular insights. *Planta* 257:31. <https://doi.org/10.1007/s00425-022-04053-4>
- Rosas-Sánchez J, Saldarriaga-Noreña H, Chávez-Almazán LA, Murillo-Tovar MA, Ramírez-Bustos II, Leon-Hernández VA, Reyes PG, Vergara-Sánchez J and Fernández-Herrera E. 2023. Occurrence of pesticide residues in fig crops (*Ficus carica* L.), in Morelos, Mexico. *Revista internacional de contaminación ambiental* 39:54711. <https://doi.org/10.20937/rica.54711>
- Ruano-Rosa D, Arjona-Girona I and López-Herrera CJ. 2018. Integrated control of avocado white root rot combining low concentrations of fluazinam and *Trichoderma* spp. *Crop Protection*. 112:363-370. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2017.06.024>
- Ruiz-Cisneros MF, Rios-Velasco C, Berlanga-Reyes DI, Ornelas-Paz JDJ, Acosta-Muñoz CH, Romo-Chacón A, and Fernández-Pavía SP. 2017. Incidence and causal agents of root diseases and its antagonists in apple orchards of Chihuahua, Mexico. *Revista Mexicana de Fitopatología* 35(3):437-462. <https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.1704-3>
- Ruocco M, Lanzuise S, Viñale F, Marra R, Turrá D, Woo SL y Lorito M. 2009. Identificación de un nuevo gen de biocontrol en *Trichoderma atroviride*: el papel de una bomba de membrana transportadora ABC en la interacción con diferentes hongos fitopatógenos. *Molecular Plant-Microbe Interaction* 22:291-301. <https://doi.org/10.1094/MPMI-22-3-0291>
- Sánchez-Montesinos B, Santos M, Moreno-Gavira A, Marín-Rodulfo T, Gea FJ and Diánez F. 2021. Biological control of fungal diseases by *Trichoderma aggressivum* f. *europaeum* and its compatibility with fungicides. *Journal of fungi* 7:598. <https://doi.org/10.3390/jof708058>
- SEMARNAT, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2020. <http://www.semarnat.gob.mx/ml>. Consultado 30 de diciembre de 2023.
- Shang Y, Hasan MK, Ahammed GJ, Li M, Yin H and Zhou J. 2019. Applications of nanotechnology in plant growth and crop protection: a review. *Molecules* 24:2558. <https://doi.org/10.3390/molecules24142558>
- Sharma A, Kumar V, Shahzad B y Tanveer M. 2019. Uso mundial de pesticidas y sus impactos en el ecosistema. *SN Applied Sciences* 1:1446. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1485-1>
- Sun J, Zhang T, Li Y, Wang X and Chen J. 2019. Functional characterization of the ABC transporter TaPdr2 in the tolerance of biocontrol the fungus *Trichoderma atroviride* T23 to dichlorvos stress. *Biological Control* 129:102-108. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2018.10.04>
- Sundar AR, Das ND and Krishnaveni D. 1995. *In vitro* antagonism of *Trichoderma* sp. against two fungal pathogens of castor. *Indian Journal of Plant Protection* 23:152-155.
- Terrero-Yépez PI, Peñaherrera-Villafuerte SL, Solís-Hidalgo ZK, Vera-Coello DI, Navarret-Cedeño JB y Herrera-Defaz MA. 2018. Compatibilidad *in vitro* de *Trichoderma* spp. con fungicidas de uso común en cacao (*Theobroma cacao* L.). *Investigación Agraria* 20:146-151. <https://doi.org/10.18004/investig.agrar.2018.diciembre.146-151>
- Tyskiewicz R, Nowak A, Ozimek E and Jaroszek-Ścisel J. 2022. *Trichoderma*: the current status of its application in agriculture for the biocontrol of fungal phytopathogens and stimulation of plant growth. *International Journal of Molecular Sciences* 23:2329. <https://doi.org/10.3390/ijms23042329>
- Yao X, Guo H, Zhang K, Zhao M, Ruan J and Chen J. 2023. *Trichoderma* and its role in biological control of plant fungal and nematode disease. *Frontiers in Microbiology* 14:1160551. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1>
- Zapata-Narváez YA, and Botina-Azain BL. 2023. Effect of adjuvants, fungicides and insecticides on the growth of *Trichoderma koningiopsis* Th003. *Revista Mexicana de Fitopatología* 41(3):412-433. <https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.2305-1>
- Zhang W. 2018. Global pesticide use: Profile, trend, cost/benefit and more. *Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences* 8:1-27.
- Zin NA and Badaluddin NA. 2020. Biological functions of *Trichoderma* spp. for agriculture applications. *Annals of Agricultural Sciences* 65:168-178. <https://doi.org/10.1016/j.aoas.2020.09.003>