



Efecto *in vitro* e *in planta* del silicio y fosfitos en control de *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* causante de la marchitez en tomate

Magda Rocío Gómez-Marroquín^{1*}, Sandra L. Carmona¹, Diana Burbano-David¹, Andrea del Pilar Villarreal¹, Mauricio Soto-Suárez¹, Adriana González-Almario². ¹Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria. AGROSAVIA, Km 14 vía Mosquera-Bogotá, Mosquera 250047, Colombia, ²Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias Agrarias, Bogotá, Colombia.

***Autor de correspondencia:**

Magda Rocío Gómez-Marroquín
mrgomez@agrosavia.co

Sección:

Edición periódica

Revisado:

15 Julio, 2025

Aceptado:

07 Abril, 2026

Publicado:

29 Abril, 2026

Cita:

Gómez-Marroquín MR, Carmona SL, Burbano-David D, Villarreal A, Soto-Suárez M y González-Almario A. 2026. Efecto *in vitro* e *in planta* del silicio y fosfitos en control de *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* causante de la marchitez en tomate. Revista Mexicana de Fitopatología 44(2): 124. <https://doi.org/10.18781/R.ME.X.FIT.2401-3>

RESUMEN

Antecedentes/Objetivo. Las sustancias bioactivas como fosfitos y silicio representan una alternativa promisoría para el manejo de la marchitez vascular del tomate, debido a su potencial para inhibir el crecimiento del patógeno e inducir mecanismos de defensa en la planta. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de tres fuentes de fosfitos y una fuente de silicio sobre el aislamiento *Fol59* de *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* raza 2 mediante ensayos *in vitro* e *in planta*.

Materiales y Métodos. En condiciones *in vitro*, se determinó el porcentaje de inhibición del crecimiento radial (PICR) del aislamiento *Fol59* de *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* raza 2 en medio PDA suplementado con cada sustancia bioactiva en concentraciones entre 10 y 20 000 ppm, bajo un diseño completamente al azar (4×9), con cuatro tratamientos y nueve concentraciones, cinco réplicas técnicas y tres biológicas. En condiciones *in planta*, se evaluó el Área Bajo la Curva del Progreso de la Enfermedad (ABCPE) y el porcentaje de eficacia mediante un diseño completamente al azar (4×2), con cuatro tratamientos y dos concentraciones, considerando cuatro condiciones experimentales: control, control inoculado, tratamientos sin inoculación y tratamientos inoculados. Se utilizaron 20 unidades experimentales por tratamiento y tres réplicas biológicas.

Resultados. A los siete días, las sustancias bioactivas redujeron el crecimiento radial del hongo entre 70 y 100 %, con diferencias significativas entre las concentraciones. La mayor inhibición se registró con silicio a 10 000 ppm (100 %), seguido de fosfito de calcio a 2 000 ppm (99.4 %) y fosfito de potasio a 20 000 ppm (99 %). En ensayos *in planta*, a los 14 días después de inoculación, el control presentó una incidencia del 100 % y una severidad del 98 %. En contraste, el tratamiento con fosfito de potasio (KPhi1) a 2 000 ppm redujo la severidad al 56 %, lo que representa una eficacia del 42 % en comparación con el control.

Conclusión. Los fosfitos y el silicio mostraron un efecto inhibitorio sobre el crecimiento micelial del hongo bajo condiciones *in vitro*. En ensayos *in planta*, el fosfito de potasio, a 2 000 ppm fue el tratamiento más eficaz, reduciendo severidad de la marchitez vascular causada por *Fol59*.

Palabras clave: Sustancias bioactivas, Resistencia inducida, Inhibición *in vitro*, Manejo, Patógenos del suelo



INTRODUCCIÓN

El tomate (*Solanum lycopersicum*) es una de las hortalizas cultivadas de mayor importancia económica a nivel mundial. En Colombia, el cultivo mantiene una alta relevancia dentro del sector hortícola, con una producción anual cercana a 685 498 toneladas y un área sembrada estimada entre 8 500 ha, concentrada principalmente en departamentos de la región Andina como Boyacá, Antioquia, Cundinamarca y Santander (Agronet, 2024). Sin embargo, el cultivo enfrenta problemas fitosanitarios asociados a patógenos del suelo entre los que destaca la marchitez vascular causada por *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* (Fol), responsable de pérdidas superiores al 70 %, siendo una de las principales limitantes en la producción del cultivo a nivel mundial (Vásquez-Ramírez y Castaño-Zapata, 2017; Carmona *et al.*, 2020).

Este patógeno se caracteriza por su potencial destructivo y capacidad de supervivencia en el suelo, mediante la formación de estructuras de resistencia denominadas clamidosporas, las cuales pueden permanecer viables y en estado de latencia por periodos prolongados (Kang *et al.*, 2014; McGovern, 2015). El manejo de Fol se basa principalmente en la aplicación de fungicidas de síntesis química, los cuales, en su mayoría son aplicados de forma indiscriminada afectando los recursos naturales, los microorganismos benéficos e incrementando el riesgo fitosanitario (Brauer *et al.*, 2019; Trejo-Téllez *et al.*, 2024). En este contexto, y bajo una perspectiva de sostenibilidad del cultivo, es necesario plantear estrategias de manejo integrado de la enfermedad que sean más amigables con el medio ambiente y contribuyan a reducir el impacto del patógeno (Achary *et al.*, 2017).

Entre las alternativas más estudiadas, se encuentran los inductores de resistencia como las sales inorgánicas entre ellas fosfato monopotásico (KH_2PO_4), fosfitos (H_2PO_3) y silicio. Los fosfitos (Phi), derivados del ácido fosforoso (H_3PO_3), constituyen la forma reducida del fosfato (Pi) y se consideran como un análogo estructural. Estos compuestos pueden combinarse con otros elementos como calcio ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_3)_2$), potasio (KH_2PO_3), manganeso (MnHPO_3), magnesio ($\text{Mg}(\text{H}_2\text{PO}_3)_2$) o zinc ($\text{Zn}(\text{H}_2\text{PO}_3)_2$), formando sales ampliamente utilizadas como plaguicidas, fertilizantes y/o bioestimulantes en la horticultura (Gómez-Merino y Trejo-Téllez, 2015). Más allá de su papel en la nutrición vegetal, los fosfitos se estudian por su potencial en el control de enfermedades en plantas, mostrando eficacia cuando se aplican de manera preventiva (Yáñez-Juárez *et al.*, 2018). Las sales de Phi han demostrado su efectividad en el control de patógenos, entre los que se destacan oomycetes, bacterias y hongos (Puerari *et al.*, 2015), así como en la potenciación de mecanismos de defensa en las plantas (Cerqueira *et al.*, 2017).

Los fosfitos actúan mediante dos mecanismos de acción; el primero corresponde a un efecto directo, inhibiendo el crecimiento micelial y alterando el metabolismo del patógeno (Machinandiarena *et al.*, 2012; Felipini *et al.*, 2016; Rocha *et al.*, 2016; Mulugeta *et al.*, 2019). El segundo es un efecto indirecto, asociado con la inducción de mecanismos de defensa en las plantas, principalmente relacionados con la síntesis y señalización del ácido salicílico (AS). Entre las respuestas inducidas se incluyen la producción de fitoalexinas y fenilpropanoides (como el ácido clorogénico y ácido cafeico), la generación de especies reactivas del oxígeno (ROS), la activación de proteínas relacionadas con patogenicidad (PR) y el reforzamiento de la pared celular (Rey-Burusco *et al.*, 2019; Feldman *et al.*, 2020; Huang *et al.*, 2020).

En el patosistema *Solanum tuberosum* - *Phytophthora infestans*, se ha descrito la activación de rutas de defensa y regulación de genes tras la aplicación de fosfitos (Rey-

Burusco *et al.*, 2019; Feldman *et al.*, 2020). Asimismo, análisis transcriptómicos en otros sistemas han evidenciado respuestas sistémicas inducidas por fosfitos (Huang *et al.*, 2020). En tomate, se ha reportado que la defensa de la planta se activa mediante la síntesis de AS y la expresión de los genes *PRI* y *Bgl*; este último, involucrado en la biosíntesis de una β -1,3-glucanasa, la cual participa en la degradación o desestabilización de la pared celular de los patógenos (Vinas *et al.*, 2020).

Por otra parte, el silicio es uno de los elementos más abundantes en la corteza terrestre (Paye *et al.*, 2018; Islam *et al.*, 2020) y se encuentra en el suelo en tres formas: cristalina, semi-cristalina y amorfa, principalmente como dióxido de silicio (SiO_2). Las plantas lo asimilan mediante la absorción radicular en forma de ácido monosilícico (H_4SiO_4) (Paye *et al.*, 2018). Los beneficios del Si están asociados con el aumento de la resistencia a insectos, nematodos y enfermedades, así como a condiciones de estrés abiótico como sequía, salinidad y temperaturas extremas (Khan *et al.*, 2020). A pesar de los diferentes estudios que respaldan el potencial de fosfitos y silicio en la protección de las plantas frente a diversas enfermedades, persisten vacíos en el patosistema tomate-*Fol*, respecto a la comparación entre distintas fuentes comerciales y la diferenciación de sus efectos directos sobre el patógeno e indirecto sobre las plantas, tanto en condiciones *in vitro* como *in planta*. En este contexto, el objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto directo e indirecto de diferentes fuentes de fosfitos y silicio sobre *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*, mediante ensayos *in vitro* y en plantas de tomate, como base para su posible incorporación en estrategias de manejo integrado de la marchitez vascular.

MATERIALES Y MÉTODOS

Microorganismo. El hongo utilizado en los ensayos *in vitro* e *in planta*, correspondió al aislamiento *Fol59* de *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* raza 2, obtenido a partir de una planta de tomate con síntomas característicos de marchitez vascular. El aislamiento fue identificado morfológicamente y mediante pruebas de patogenicidad como Raza 2 (Carmona *et al.*, 2020).

Material biológico. Para las pruebas realizadas *in planta*, se utilizaron plantas de tomate de 30 días de edad de la variedad Santa Cruz Kada (Impulse semillas®), susceptible a *Fol*. Previo a la siembra, las semillas se desinfectaron con una solución de hipoclorito de sodio al 2 % durante 10 min, seguido de etanol al 70 % durante 1 min y tres lavados con agua destilada estéril. Posteriormente, las semillas se sumergieron durante 1 h en las soluciones correspondientes a cada tratamiento (Cuadro 1), y se germinaron sobre turba estéril.

Cuadro 1. Sustancias bioactivas evaluadas en ensayos *in vitro* e *in planta* en tomate (*Solanum lycopersicum*).

Tratamiento	Composición / Fuentes
Fosfito de Potasio (KPhi1)	P_2O_5 420 g L^{-1} y K_2O 280 g L^{-1}
Fosfito de Potasio (KPhi2)	P_2O_5 434 g L^{-1} y K_2O 403 g L^{-1}
Fosfito de Calcio (CaPhi)	P_2O_5 176 g L^{-1} y CaO 45.6 g L^{-1}
Silicio (Si)	SiO_2 179.4 g L^{-1}

Sustancias bioactivas. Se seleccionaron cuatro fuentes comerciales de fosfitos y silicio para la evaluación (Cuadro 1). La selección de los fosfitos de potasio se realizó con base en la disponibilidad comercial. Aunque ambos presentan concentraciones similares de

P₂O₅, KPhi2 contiene una mayor concentración de potasio. Para cada sustancia se preparó una solución stock, esterilizada mediante filtración con una membrana de 0.22 µm.

Evaluación de sustancias bioactivas sobre el crecimiento de *Fol59* in vitro. Se evaluó el efecto de las sustancias bioactivas seleccionadas (Cuadro 1) sobre el crecimiento de *Fol59*, incluyendo control hongo, correspondiente a medio Papa Dextrosa Agar (PDA) sin suplemento. El medio PDA fue suplementado con cada sustancia bioactiva en nueve concentraciones (Cuadro 2), ajustando el pH a 5.6 en todos los tratamientos. Discos de 7 mm de diámetro de PDA con micelio de *Fol59* (ocho días de crecimiento), se colocaron en el centro de cada caja Petri con medio suplementado. El control con el hongo consistió en PDA sin adición de sustancias bioactivas. Las cajas Petri se incubaron a 25 °C en oscuridad durante siete días.

Cuadro 2. Concentraciones de sustancias bioactivas evaluadas frente a *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* (*Fol59*) bajo condiciones in vitro.

Tratamientos	Concentraciones (ppm)								
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
KPhi1	0	100	500	1 000	2 000	5 000	10 000	20 000	ND _z
KPhi2	0	100	500	1 000	2 000	5 000	10 000	20 000	ND
CaPhi	0	10	50	100	250	500	750	1 000	2 000
Si	0	1 000	2 000	5 000	6 500	8 500	10 000	20 000	ND _z

ND_z: No definida

Medición del crecimiento. Al finalizar el periodo de incubación, se realizó un registro fotográfico de cada unidad experimental. Para cada tratamiento se establecieron cinco réplicas técnicas y tres réplicas biológicas. Las imágenes obtenidas se procesaron mediante el software imageJ (versión 1.52f), calculándose el porcentaje de inhibición del crecimiento radial (PICR) según la fórmula descrita por Lee *et al.* (2014):

$$PICR (\%) = \frac{(C-T)}{C} \times 100$$

Donde: *C* corresponde al área de la colonia del patógeno en el control inoculado y *T* al área de la colonia en el tratamiento.

Evaluación de la marchitez vascular en plantas de tomate. Para los bioensayos in planta, se seleccionaron dos concentraciones de cada sustancia bioactiva con base a los resultados obtenidos in vitro y en un ensayo preliminar (datos no mostrados). Las concentraciones correspondieron a la dosis recomendada del producto comercial y a la mitad de esta dosis (Cuadro 3).

Se establecieron cuatro condiciones experimentales: 1) control, correspondiente a plantas no inoculadas ni tratadas; 2) control inoculado (*Fol59*), correspondiente a plantas inoculadas únicamente con el aislamiento *Fol59* de *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* raza 2; 3) tratamientos sin inoculación, correspondientes a plantas tratadas con sustancias bioactivas; y 4) tratamientos inoculados, correspondientes a plantas tratadas con sustancias bioactivas e inoculadas con *Fol59*.

Se realizaron dos aplicaciones de las sustancias bioactivas en diferentes momentos: la primera mediante inmersión de las semillas durante 1 h y la segunda sobre plántulas de 30 días de edad en semillero. En ambos casos se aplicaron 10 mL de la solución

correspondiente por planta. A las 24 h posteriores a la segunda aplicación, las plántulas fueron inoculadas con el aislamiento *Fol59* mediante el método de inmersión de raíz (Carmona *et al.*, 2020), utilizando una suspensión de 1×10^6 conidios mL^{-1} durante 15 min. Posteriormente, las plántulas se trasplantaron a recipientes plásticos de 16 oz con suelo estéril. El ensayo se repitió tres veces en el tiempo (réplicas biológicas), con 20 repeticiones por tratamiento (una planta por repetición).

Cuadro 3. Concentraciones de sustancias bioactivas evaluadas en plantas de tomate bajo condiciones sin inoculación e inoculadas con *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*.

Tratamiento	Concentraciones (ppm)	
	C1	C2
Fosfito de Potasio (KPhi1)	1 000	2 000
Fosfito de Potasio (KPhi2)	5 000	10 000
Fosfito de Calcio (CaPhi)	1 000	2 000
Silicio (Si)	2 500	5 000

Evaluación de la enfermedad. Las plantas se evaluaron cada dos días, desde la aparición de los primeros síntomas (≈ 6 días después de inoculación) hasta los 14 días después de inoculación (ddi). Se evaluó: Incidencia y Severidad. La severidad se estimó mediante una escala visual modificada (Rongai *et al.*, 2017) con valores de 0 a 5, donde 0 corresponde a una planta sana y 5 a una planta muerta.

Adicionalmente, se calculó el Área Bajo la Curva del Progreso de la Enfermedad (ABCPE), mediante la ecuación descrita por Pedroza y Samaniego (2009), donde y , corresponde al % de la enfermedad (incidencia o severidad) y t al tiempo en días transcurrido de evaluación.

$$ABCPE = \sum_i \frac{y_i + y_{i+1}}{2} * (t_{i+1} - t_i)$$

Así mismo, con base en los valores finales de severidad, se calculó la eficacia de los tratamientos utilizando la fórmula propuesta por Abbott (1925), tomando como referencia el control inoculado.

$$Eficacia (\%) = \frac{C - T}{C} \times 100$$

Donde C , corresponde al valor de severidad en las plantas de control inoculado y T al valor obtenido en las plantas tratadas.

Análisis estadístico. Los datos fueron analizados mediante análisis de varianza (ANOVA). Para las variables evaluadas en el tiempo (severidad e incidencia), se utilizó un modelo de medidas repetidas, mientras que el Área Bajo la Curva del Progreso de la Enfermedad (ABCPE) y el porcentaje de eficacia fueron analizados mediante ANOVA simple. Cuando se detectaron diferencias significativas ($p \leq 0.05$), las medias fueron comparadas mediante la prueba de Tukey. Los análisis estadísticos se realizaron en SAS Enterprise Guide versión 7 (SAS Institute Inc., Cary, NC, EE. UU.).

RESULTADOS

Evaluación de sustancias bioactivas sobre el crecimiento de *Fol59* *in vitro*. Las sustancias bioactivas evaluadas mostraron una reducción del crecimiento radial de *Fol59*. El Fosfito de Potasio KPhi1 presentó un porcentaje del crecimiento radial (PICR) del 77.9 % a partir de la concentración de 1 000 ppm, alcanzando un 97.4 % de inhibición a concentraciones superiores de 10 000 ppm. Por su parte, el Fosfito de Potasio KPhi2, mostró una reducción significativa a partir de 1 000 ppm, con valores de PICR de 73.4 %, siendo inferior a los obtenidos con KPhi1, y alcanzando una inhibición del 90.4 % a concentraciones superiores a 10 000 ppm (Figura 1, Cuadro 4). En general, KPhi1 mostró una mayor eficacia en la reducción del crecimiento micelial en comparación con KPhi2.

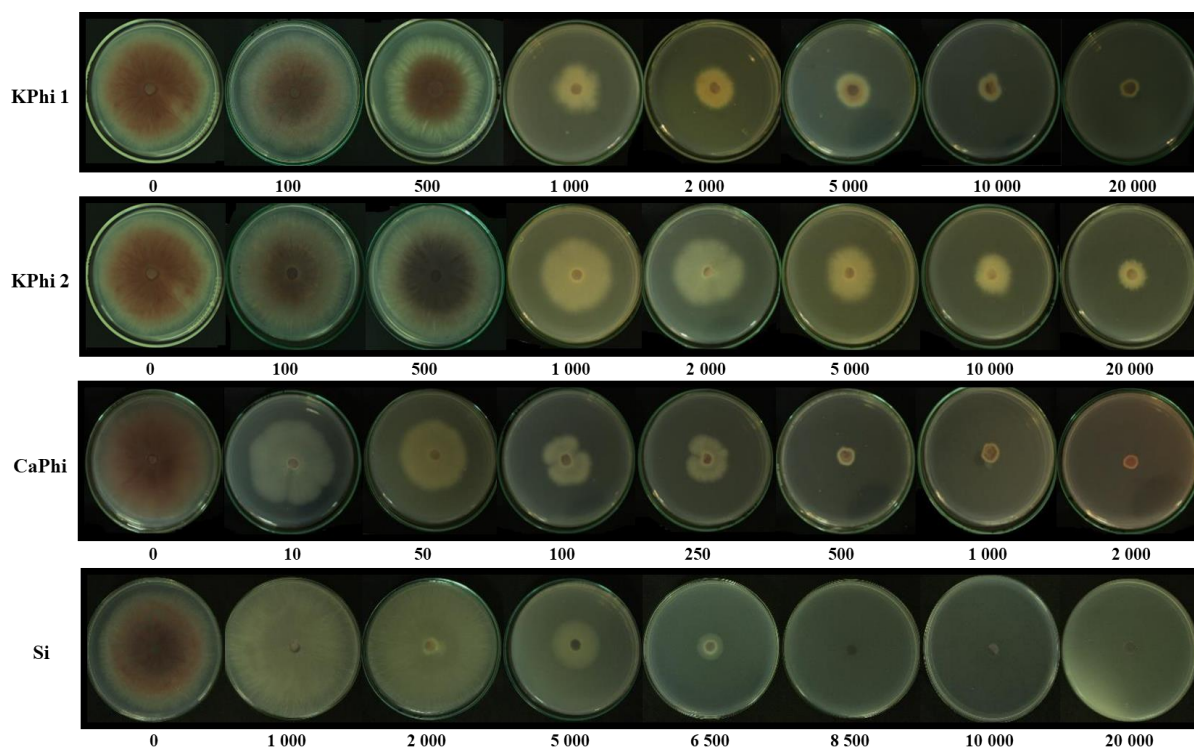


Figura 1. Efecto de diferentes concentraciones de fosfitos y silicio sobre el crecimiento micelial de *Fol59*, a los siete días de incubación.

Los resultados obtenidos bajo condiciones *in vitro* evidenciaron que el incremento en las concentraciones de CaPhi redujo significativamente el crecimiento micelial de *Fol59* (Figura 1), alcanzando hasta un 70 % de inhibición a una concentración de 50 ppm y un 99 % de inhibición a 2 000 ppm (Cuadro 4). Por otra parte, el tratamiento con silicio (Si) logró una inhibición del 100 % del crecimiento micelial de *Fol59* en concentraciones de 8 500 y 20 000 ppm (Figura 1). Sin embargo, las concentraciones más bajas de Si (1 000 y 2 000 ppm), no inhibieron el crecimiento del hongo, presentando valores negativos de inhibición del -37.3 y -35.6 %, respectivamente (Cuadro 4, Figura 1).

Cuadro 4. Porcentaje de inhibición de crecimiento radial (PICR) de *Fol59* usando fosfitos y silicio (KPhi1, KPhi2, CaPhi y Si) a diferentes concentraciones bajo condiciones *in vitro*.

Concentraciones *(ppm)	² PICR por tratamiento			
	KPhi 1	KPhi 2	CaPhi	Si
10	-	-	45.5±3.6 ^{ab}	-
50	-	-	70.6±3.4 ^b	-
100	15.8±5.4 ^b	7.6±4.9 ^b	80.6±4.3 ^a	-
250	-	-	92.3±2.1 ^a	-
500	24.5±5.5 ^{ab}	6.6±3.1 ^b	94.5±2.1 ^a	-
1 000	77.9±6.9 ^a	73.4±6.2 ^{ab}	96.9±2.2 ^a	-37.3±10.3 ^b
2 000	95.4±1.7 ^a	74.5±5.4 ^{ab}	99.4±0.2 ^a	-35.6±7.5 ^b
5 000	96.2±1.4 ^a	81.0±4.4 ^{ab}	-	77.1±16.3 ^{ab}
6 500	-	-	-	97.7±2.0 ^a
8 500	-	-	-	99.7±0.0 ^a
10 000	97.4±0.4 ^a	90.4±2.3 ^a	-	100±0.0 ^a
20 000	99.0±0.2 ^a	96.2±1.0 ^a	-	100±0.0 ^a

²Cada valor representa el promedio de tres réplicas biológicas y cinco réplicas técnicas expresado en PICR, ± desviación estándar (DE). Valores con la misma letra no presentan diferencias significativas entre concentraciones para cada tratamiento Tukey ($p \leq 0.05$).

Reducción de la marchitez vascular en plantas de tomate. Las plantas tratadas previamente con las sustancias bioactivas (KPhi1-C1, KPhi1-C2 y KPhi2-C1) mostraron una reducción significativa en el ABCPE causado por *Fol59* en comparación con el control inoculado, manteniendo esta tendencia hasta el último día de evaluación (14 ddi). Sin embargo, los tratamientos con silicio y CaPhi no presentaron diferencias significativas frente al control inoculado. Por otro parte, aunque a nivel *in vitro* algunos tratamientos mostraron mayor eficacia, en los ensayos *in planta* esta respuesta fue menor, posiblemente debido a la influencia de factores bióticos y abióticos propios del sistema *in vivo* (Figura 2).

Entre los productos que contenían fosfito de potasio como ingrediente activo, solo el tratamiento KPhi1 mostró una efectividad destacada en la reducción de la severidad de la enfermedad. Evaluado tanto en la dosis recomendada por el fabricante (C2) como en la mitad de la dosis (C1), KPhi1 redujo la severidad de la marchitez vascular en un 42 y 20 %, respectivamente, en plantas tratadas previa y posteriormente a la inoculación con *Fol59*.

El silicio evaluado bajo condiciones *in vitro* mostró, a la concentración recomendada, un porcentaje de inhibición del crecimiento de *Fol59* del 77 %. Sin embargo, los experimentos *in planta* en las dos concentraciones (C2 y C1) evidenciaron una menor eficacia en la reducción de la marchitez vascular causada por *Fol59*, con reducciones en la severidad de 22 y 20 %, respectivamente (Cuadro 5). En contraste, las plantas únicamente inoculadas con *Fol59* presentaron un avance progresivo de la enfermedad, alcanzando una severidad del 98 % y una incidencia del 100 % a los 14 ddi (Cuadro 5).

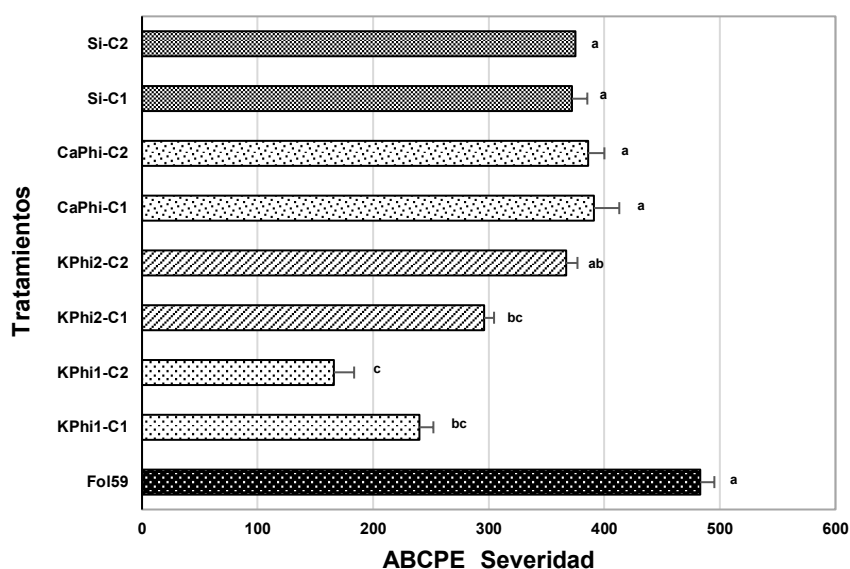


Figura 2. Área bajo la curva del progreso de la enfermedad (ABCPE) a los 14 días después de la inoculación, expresada como severidad en plantas de tomate previamente tratadas con sustancias bioactivas (KPhi, CaPhi y Si) e inoculadas con el aislamiento *Fol59*. Barras con la misma letra no presentan diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

En las tres réplicas biológicas, las sustancias bioactivas evaluadas mostraron un efecto en la reducción de la severidad de la marchitez vascular en plantas de tomate. El tratamiento KPhi1-C2 presentó la mayor reducción de la enfermedad, registrando una severidad del 56 %, en comparación con el control inoculado, que alcanzó una severidad del 98 % a los 14 días después de la inoculación (Cuadro 5). Este tratamiento representó una eficacia del 42 %, superior a la observada con CaPhi-C1 y CaPhi-C2, cuyos valores de eficacia fueron de 10 y 13 %, respectivamente.

La incidencia de la enfermedad fue superior al 90 % en todos los tratamientos evaluados y similar a la registrada en el control inoculado, el cual presentó una incidencia del 100 %. Estos resultados evidencian la alta agresividad del aislamiento *Fol59* en plantas de tomate bajo las condiciones del ensayo.

Cuadro 5. Porcentaje de incidencia y severidad causada por *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* (*Fol59*) en plantas de tomate a los 14 días después de inoculación (ddi).

Tratamiento	Incidencia		Severidad	
	% Inc	% Eficacia	% Sev	% Eficacia
Control inoculado (<i>Fol59</i>)	100		98	
KPhi1-C1	97	3	78	20
KPhi1-C2	92	8	56	42
KPhi2-C1	97	3	78	20
KPhi2-C2	97	3	80	27
CaPhi-C1	98	2	88	10
CaPhi-C2	100	0	85	13
Si-C1	98	2	78	20
Si-C2	98	2	76	22



Figura 3. Síntomas de marchitez vascular en plantas de tomate a los 14 días después de la inoculación (ddi). **A)** Plantas no inoculadas, incluyendo el control y tratamientos con sustancias bioactivas; **B)** Plantas inoculadas con *Fol59*, incluyendo el control inoculado y tratamientos con sustancias bioactivas.

Durante los bioensayos realizados *in planta* con las sustancias bioactivas silicio y fosfitos de potasio, las plantas de tomate no mostraron signos de fitotoxicidad. Sin embargo, las plantas control tratadas con fosfito de calcio presentaron síntomas de clorosis en las hojas del estrato inferior, así como enrollamiento y reducción del tamaño foliar, en ambas concentraciones evaluadas (Figura 3). Estos síntomas fueron consistentes en las tres réplicas biológicas, lo que sugiere un posible efecto fitotóxico asociado al tratamiento con CaPhi.

DISCUSIÓN

El manejo integrado de enfermedades representa un enfoque clave dentro de la agricultura sustentable, especialmente en el cultivo de tomate, donde son frecuentes las aplicaciones de agroquímicos, particularmente de fungicidas. Una de las estrategias más prometedoras se basa en la inducción de resistencia mediante la aplicación de sustancias compatibles con el medio ambiente y salud humana. En este contexto, diversos estudios han descrito el efecto protector de los fosfitos y silicio frente a patógenos y estrés abiótico en distintas especies vegetales, al inducir un estado fisiológico de alerta en la planta denominado *priming*, que incrementa la capacidad para activar mecanismos de defensa basal, además de ejercer una acción directa sobre el patógeno, afectando su crecimiento y esporulación (Trejo-Téllez y Gómez-Merino, 2018; Coskun *et al.*, 2019)

Bajo condiciones *in vitro*, el fosfito de potasio (KPhi) ha demostrado un efecto inhibitorio significativo sobre diversos fitopatógenos. Formulaciones de fosfito de potasio han mostrado una reducción cercana 94 % en el crecimiento micelial de *Colletotrichum gloeosporioides* (Araújo *et al.*, 2010), mientras que en *Fusarium circinatum* la reducción del crecimiento micelial puede alcanzar hasta un 53 % dependiendo de la dosis aplicada (Cerqueira *et al.*, 2017). De igual forma, en *Fusarium culmorum* y *F. graminearum*, el desarrollo del micelio se ha reducido entre un 60 y 80 % incluso con concentraciones bajas de 10 ppm de KPhi (Hofgaard *et al.*, 2010).

En conjunto, estos antecedentes sugieren que el efecto inhibitorio del fosfito no es específico de un patógeno, sino que responde a un mecanismo de acción directo que afecta procesos metabólicos esenciales para el crecimiento fúngico, como la fosforilación y el desarrollo del micelio (Machinandirena *et al.*, 2012; Felipini *et al.*, 2016). Esta acción antifúngica generalizada podría explicar los efectos observados frente a distintos géneros.

Aunque el mecanismo directo de acción de los fosfitos frente a los microorganismos no está completamente dilucidado, estudios recientes sugieren que estos compuestos pueden interferir con procesos celulares dependientes de fosfato al actuar como análogos funcionales del mismo (Trejo-Téllez *et al.*, 2024). Además, la actividad antimicrobiana del ion fosfito puede depender de la naturaleza del catión asociado, la concentración del anión fosfito y la acidificación del medio de cultivo bajo condiciones *in vitro* (Lobato *et al.*, 2010).

De manera similar, el silicio puede contribuir al manejo de patógenos mediante la formación de barreras físicas y bioquímicas que incrementan la resistencia de las plantas frente a plagas y enfermedades (Siddiq *et al.*, 2019). Bekker *et al.* (2009), reportaron que el silicato de potasio ejerció un efecto inhibitorio directo sobre *F. oxysporum*, alcanzando hasta un 96.2 % de inhibición del crecimiento micelial a concentraciones de 20 000 ppm y del 100 % a concentraciones mayores de 40 000 ppm. Sin embargo, concentraciones más bajas (5 000 y 10 000 ppm) muestra valores negativos de inhibición, lo que indica una posible estimulación del crecimiento del patógeno. Este comportamiento coincide con lo

observado en nuestro estudio y puede explicarse mediante el fenómeno de la hormesis; caracterizado por una respuesta bifásica donde bajas dosis estimulan el crecimiento del organismo y dosis elevadas ejercen un efecto inhibitorio (Dharma *et al.*, 2024).

En *FoI59* los resultados *in vitro* evidenciaron una inhibición del crecimiento micelial tras el tratamiento con fosfitos y silicio. No obstante, en los ensayos *in planta*, la reducción parcial de la severidad de la enfermedad se obtuvo con las aplicaciones de fosfito de potasio a la dosis recomendada (2 000 ppm). Se ha reportado que el tratamiento con Phi puede activar la vía de señalización del AS frente a la infección por patógenos, induciendo la expresión de genes asociados a la defensa, tales como *PRI*, *PR2* y genes y enzimas antioxidantes involucradas en la generación de especies reactivas de oxígenos (Massoud *et al.*, 2012; Feldman *et al.*, 2020).

Los fosfitos pueden actuar de forma eficiente como bioplaguicidas frente a diversos fitopatógenos del suelo (Puerari *et al.*, 2015; Mulugeta *et al.*, 2019; Morales-Morales *et al.*, 2022). Además, presentan alta movilidad sistémica al ser traslocados vía floema desde las hojas hacia la raíz, lo que favorece la protección integral de la planta (Yáñez-Juárez *et al.*, 2018). Esta capacidad de transporte, junto con su acumulación en algunos tejidos de reserva, contribuye a su eficacia como agentes de manejo fitosanitario (Gómez-Merino y Trejo-Téllez, 2015; Jost *et al.*, 2015). Por otra parte, la respuesta de la planta al fosfito puede depender de su estado nutricional en relación con el fósforo inorgánico (Pi). Cuando las plantas poseen niveles adecuados de Pi, la aplicación de Phi puede desencadenar mecanismos de defensa; sin embargo, en condiciones de deficiencia de Pi, altas concentraciones de Phi pueden acumularse y generar efectos fitotóxicos (Loera-Quezada *et al.*, 2015; Jost *et al.*, 2015).

La doble aplicación de KPhi1-C2 (en semilla y sobre el sustrato en semillero) sugiere un efecto protector en la reducción de la severidad de la marchitez causada por *FoI59* del 42 %. Esta reducción podría estar asociada con la activación de mecanismos de defensa en la planta después del tratamiento con KPhi. En este sentido, Feldman *et al.* (2020) determinaron mediante análisis molecular usando microarreglos de ADN, que 72 h después de la aplicación de fosfito de potasio, plantas de papa (*Solanum tuberosum*) infectadas con *P. infestans* sobre expresaron genes involucrados en la activación de vías de señalización de AS, así como la síntesis y modificación de polímeros de la pared celular, incluyendo suberinas y gomas.

Aunque ambos compuestos evaluados contenían el mismo ingrediente activo, KPhi2 no mostró una reducción de severidad comparable a la obtenida con KPhi1. Este comportamiento sugiere que la respuesta observada no depende únicamente del anión fosfito, sino también de características propias del preparado comercial, la dosis aplicada y los procesos de absorción y translocación en la planta. Las diferencias podrían estar relacionadas con la presencia de coadyuvantes como solventes, surfactantes o estabilizantes, capaces de modificar la disponibilidad y el desempeño biológico del ingrediente activo. Se ha documentado que estos componentes pueden influir en la estabilidad, persistencia, actividad biológica y posible fitotoxicidad de los insumos agrícolas, especialmente en sistemas complejos como el suelo (Knowles, 2008; Basílio *et al.*, 2024).

Los resultados obtenidos con silicio mostraron una eficacia entre el 20 y 22 % en la reducción de la severidad de la marchitez causada por *FoI59*. Aunque estos valores no presentaron un efecto comparable frente al control inoculado, el silicio podría considerarse como una alternativa complementaria de manejo preventivo en combinación con fosfitos

de potasio. Coskun *et al.* (2019) señalan que los efectos del silicio son generalmente más consistentes frente a patógenos biótrofos que a necrótrofos. En este sentido, dado que *F. oxysporum* presenta un comportamiento hemibiótrofo, la efectividad del silicio podría depender de la fase de infección en la que el patógeno interactúa con los tejidos de la planta.

Se ha demostrado que el silicio puede actuar como potenciador de defensa en distintas especies vegetales. Castro-Rosalez (2017) reportó que la aplicación de silicio en tomate redujo la severidad causada por *Fol* en un 13.2 %, además de inducir cambios en la micro morfología de raíz, tallo y hoja. Esta protección podría estar relacionada con la acumulación de silicio en las paredes celulares, formando barreras mecánicas que dificultan la colonización del patógeno (Siddiq *et al.*, 2019). Asimismo, Wang *et al.* (2017), describieron que aplicaciones de silicio en *Arabidopsis thaliana*, promovieron la acumulación de calosa en sitios de penetración del hongo *Golovinomyces cichoracearum* a través de la activación de respuestas de defensa dependientes del AS.

En el contexto agrícola actual, caracterizado por la necesidad de producir alimentos inocuos, con menor impacto ambiental, el uso de sustancias bioactivas surge como una alternativa complementaria dentro de estrategias de manejo integrado y contribuyen a reducir la dependencia de agroquímicos (Kim *et al.*, 2016).

Los resultados obtenidos en esta investigación sugieren que la aplicación de fosfitos puede ejercer un efecto combinado de inhibición de crecimiento de *Fol59* y de protección de las plantas de tomate. Un aspecto relevante de este estudio fue la diferencia observada entre formulaciones comerciales que contenían el mismo ingrediente activo, lo que sugiere que la eficacia del fosfito no depende únicamente del anión fosfito, sino también de componentes asociados a la formulación. Asimismo, la discrepancia entre los resultados obtenidos *in vitro* e *in planta* resalta la complejidad del patosistema *Fol*–tomate, particularmente considerando su naturaleza vascular y su interacción inicial a nivel radicular. Estas observaciones evidencian la necesidad de profundizar en estudios que evalúen la acumulación sistémica del fosfito y su interacción con la fisiología de la planta bajo condiciones más cercanas al campo. No obstante, para validar estos hallazgos bajo condiciones semi-comerciales, será necesario desarrollar estudios que permitan determinar la persistencia del fosfito de potasio en la planta y su capacidad protectora frente a *Fol*.

CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos, el fosfito de potasio a 2 000 ppm mostró mayor eficacia en la reducción de la severidad de la marchitez vascular causada por el aislamiento *Fol59* de *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* raza 2 en plantas de tomate. Las fuentes evaluadas de fosfitos y silicio mostraron capacidad de inhibición sobre el crecimiento del patógeno bajo condiciones *in vitro*, lo que respalda su potencial como herramientas complementarias dentro de estrategias de manejo integrado de la enfermedad.

Conflicto de interés. Todos los autores declaran no tener conflicto de interés en relación con esta investigación.

Financiamiento. Esta investigación fue financiada por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR) del Gobierno de Colombia.

Agradecimientos. Este trabajo contó con el apoyo de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA) y del Ministerio de Agricultura y Desarrollo

Rural (MADR). Los autores agradecen a los revisores anónimos por sus comentarios constructivos que contribuyeron a mejorar este artículo.

Contribuciones de los autores. Conceptualización: **MSS**; metodología: **MGM, SLC, DBD y APV**; análisis formal: **MGM, MSS y AGA**; investigación y obtención de datos: **MGM**; redacción (preparación del borrador original, revisión y edición): **MGM, SLC, DBD y APV**; administración del proyecto: **MSS**. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

REFERENCIAS

- Abbott WS. 1925. A method of computing the effectiveness of insecticide. *Journal of Economic Entomology* 18(2): 265-267. <https://doi.org/10.1093/jee/18.2.265a>
- Achary VMM, Ram B, Manna M, Datta D, Bhatt A, *et al.* 2017. Phosphite: a novel P fertilizer for weed management and pathogen control. *Plant Biotechnology Journal* 15 (12): 1493-1508. <https://doi.org/10.1111/pbi.12803>
- Agronet, 2024. Observatorio de información rural y agropecuaria - AGRONET. https://agronet.gov.co/estadisticas/agricola?producto_municipal=10010101#municipal
- Araújo L, Valdebenito-Sanhueza RM e Stadnik MJ. 2010. Avaliação de formulações de fosfito de potássio sobre *Colletotrichum gloeosporioides* in vitro e no controle pós-infeccional da mancha foliar de Glomerella em macieira. *Tropical Plant Pathology* 35 (1): 054-059. <https://doi.org/10.1590/s1982-56762010000100010>
- Basílio S, Oliveira J, Santos R, and Cunha M. 2024. Effect of adjuvants on physicochemical properties and spray performance of pesticide formulations. *Agriculture* 14: 2271. <https://doi.org/10.3390/agriculture14122271>
- Bekker TF, Kaiser C and Labuschagne N. 2009. The antifungal activity of potassium silicate and the role of pH against selected plant pathogenic fungi in vitro. *South African Journal of Plant and Soil* 26(1): 55-57. <https://doi.org/10.1080/02571862.2009.10639934>
- Brauer VS, Rezende CP, Pessoni AM, De Paula RG, Rangappa KS, *et al.* 2019. Antifungal agents in agriculture: Friends and foes of public health. *Biomolecules* 9 (10): 5-21. <https://doi.org/10.3390/biom9100521>
- Carmona SL, Burbano-David D, Gómez MR, Lopez W, Ceballos N, *et al.* 2020. Characterization of pathogenic and nonpathogenic *Fusarium oxysporum* isolates associated with commercial tomato crops in the Andean Region of Colombia. *Pathogens* 9 (1): 70. <https://doi.org/10.3390/pathogens9010070>
- Castro-Rosalez L. 2017. Efecto del Silicio en la Micromorfología de Plantas de Tomate (*Solanum lycopersicum* L) Inoculadas con *Fusarium oxysporum* f. sp *lycopersici*. [Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro]. <http://repositorio.uaan.mx:8080/xmlui/handle/123456789/42545>
- Cerqueira A, Alves A, Berenguer H, Correia B, Gómez-Cadenas A, *et al.* 2017. Phosphite shifts physiological and hormonal profile of Monterey pine and delays *Fusarium circinatum* progression. *Plant Physiology and Biochemistry* 114: 88-99. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.02.020>
- Coskun D, Deshmukh R, Sonah H, Menzies JG, Reynolds O, *et al.* 2019. The controversies of silicon's role in plant biology. *New Phytologist* 221 (1): 67-85. <https://doi.org/10.1111/nph.15343>
- Dharma KS, Suryanti and Widiastuti A. 2024. Hormesis in pathogenic and biocontrol fungi: From inhibition to stimulation. *Caraka Tani: Journal of Sustainable Agriculture* 39(2): 281-296. <https://doi.org/10.20961/carakatani.v39i2.83012>
- Felipini RB, Di Piero RM and Pascholati SF. 2016. Direct effects of phosphite on the development of plant pathogens. *Summa Phytopathologica* 42(1): 1-7.
- Feldman ML, Guzzo MC, Machinandiarena MF, Rey-Burusco MF, Beligni MV, *et al.* 2020. New insights into the molecular basis of induced resistance triggered by potassium phosphite in potato. *Physiological and Molecular Plant Pathology* 109: 101452. <https://doi.org/10.1016/j.pmp.2019.101452>
- Gómez-Merino FC and Trejo-Téllez LI. 2015. Biostimulant activity of phosphite in horticulture. *Scientia Horticulturae* 196: 82-90. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.035>
- Hofgaard IS, Ergon Å, Henriksen B and Tronsmo A. M. 2010. The effect of potential resistance inducers on development of *Microdochium majus* and *Fusarium culmorum* in winter wheat. *European Journal of Plant Pathology* 128 (2): 269-81. <https://doi.org/10.1007/s10658-010-9662-5>
- Huang Y, Cai S, Zhang G and Ruan S. 2020. Transcriptome-based analysis of phosphite-induced resistance against pathogens in rice. *Plants* 9(10), 1334. <https://doi.org/10.3390/plants9101334>
- Islam W, Tayyab M, Khalil F, Hua Z, Huang Z, *et al.* 2020. Silicon-mediated plant defense against pathogens and insect pests. *Pesticide Biochemistry and Physiology* 168: 104641. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2020.104641>
- Jost R, Pharmawati M, Lapis-Gaza HR, Rossig C, Berkowitz O, *et al.* 2015. Differentiating phosphate-dependent and phosphate-independent systemic phosphate-starvation response networks in *Arabidopsis thaliana* through the application of phosphite. *Journal of Experimental Botany* 66(9): 2501-2514. <https://doi.org/10.1093/jxb/erv025>
- Kang S, Demers J, Jimenez-Gasco MM and Rep M. 2014. *Fusarium oxysporum*. En R. Dean, A. Lichens-Park & C. Kole (Eds.), *Genomics of plant-associated fungi and oomycetes: Dicot pathogens*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-44056-8_5
- Khan A, Khan AL, Imran M, Asaf S, Kim Y, *et al.* 2020. Silicon-induced thermotolerance in *Solanum lycopersicum* L. via

- activation of antioxidant system, heat shock proteins, and endogenous phytohormones. BMC Plant Biology 20 (1): 248. <https://doi.org/10.1186/s12870-020-02456-7>
- Kim DS, Hwang BK. 2016. The role of silicon in plant resistance against biotic stress. Plant Pathology Journal 32(1): 1–10. <https://doi.org/10.5423/PPJ.RW.12.2015.0241>
- Knowles A. 2008. Recent developments of safer formulations of agrochemicals. Environmental Science and Pollution Research 15, 416–420. <https://doi.org/10.1065/espr2008.03.485>
- Lee J, Tan W and Ting A. 2014. Revealing the antimicrobial and enzymatic potentials of culturable fungal endophytes from tropical pitcher plants (*Nepenthes* spp.). Mycosphere 5(2): 364–377. <https://doi.org/10.5943/mycosphere/5/2/10>
- Lobato MC, Olivieri FP, Daleo GR and Andreu AB. 2010. Antimicrobial activity of phosphites against different potato pathogens. Journal of Plant Diseases and Protection 117(3): 102–109. <https://doi.org/10.1007/bf03356343>
- Loera-Quezada MM, Leyva-González MA, López-Arredondo D and Herrera-Estrella L. 2015. Phosphite cannot be used as a phosphorus source but is non-toxic for microalgae. Plant Science 231, 124–130. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2014.11.015>
- Machinandiarena MF, Lobato MC, Feldman ML, Daleo GR and Andreu AB. 2012. Potassium phosphite primes defense responses in potato against *Phytophthora infestans*. Journal of Plant Physiology 169(14), 1417–1424. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2012.05.005>
- Massoud K, Barchietto T, Le Rudulier T, Pallandre L, Didierlaurent L, et al. 2012. Dissecting phosphite-induced priming in Arabidopsis infected with *Hyaloperonospora arabidopsidis*. Plant Physiology 159 (1): 286–298. <https://doi.org/10.1104/pp.112.194647>
- McGovern RJ. 2015. Management of tomato diseases caused by *Fusarium oxysporum*. Crop Protection 73: 78–92. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2015.02.021>
- Morales-Morales EJ, et al. 2022. Phosphites and their applications in agriculture. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 13(2): 345–354.
- Mulugeta T, Abreha K, Tekie H, Mulatu B, Yesuf M, et al. 2019. Phosphite protects against potato and tomato late blight in tropical climates and has varying toxicity depending on the *Phytophthora infestans* isolate. Crop Protection 121: 139–146. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2019.03.019>
- Paye W, Tubana B, Harrell D, Babu T, Kanke Y, et al. 2018. Determination of critical soil silicon levels for rice production in Louisiana using different extraction procedures. Communications in Soil Science and Plant Analysis 49: 2091–2102. <https://doi.org/10.1080/00103624.2018.1495731>
- Pedroza A y Samaniego J. 2009. Análisis del área bajo la curva del progreso de las enfermedades (ABCPE) en patosistemas agrícolas. Tópicos selectos de estadística aplicados a la fitosanidad. <https://doi.org/10.13140/2.1.4475.7767>
- Puerari HH, Dias-Arieira CR, Cardoso MR, Hernandes I and Costa Brito OD. 2015. Resistance inducers in the control of root lesion nematodes in resistant and susceptible cultivars of maize. Phytoparasitica 43 (3): 383–89. <https://doi.org/10.1007/s12600-014-0447-9>
- Rey-Burusco MF, Daleo GR, Feldman ML, Machinandiarena M and Andreu AB. 2019. Identification of potassium phosphite responsive miRNAs and their targets in potato. PLOS ONE 14(9), e0222346. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0222346>
- Rocha SGG, Rodríguez GB, Santos A, Jesus Junior WC and Novaes QS. 2016. Efeito de fosfíto de potássio no crescimento e na densidade micelial do *Fusarium solani* do maracujazeiro. Summa Phytopathologica 42(2): 180–182. <https://doi.org/10.1590/0100-5405/2139>
- Rongai D, Pulcini P, Pesce B and Milano F. 2017. Antifungal activity of pomegranate peel extract against fusarium wilt of tomato. European Journal of Plant Pathology 147 (1): 229–38. <https://doi.org/10.1007/s10658-016-0994-7>
- Siddiq J, Abubakkar K, Kalpana EG, Ebenezar and Chinniah C. 2019. *In vitro* efficacy of soluble silicon against sesame charcoal rot disease caused by *Macrophomina phaseolina*. Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry 8(3): 3532–3536.
- Trejo-Téllez LI, Gómez-Merino FC, García-Morales S. 2024. Phosphite as a sustainable and versatile alternative for disease management and plant defense induction. Processes 12(12): 2764. <https://doi.org/10.3390/pr12122764>
- Trejo-Téllez LI and Gómez-Merino FC. 2018. Phosphite as an inductor of adaptive responses to stress and stimulator of better plant performance. En S. Vats (Ed.), Biotic and abiotic stress tolerance in plants. Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-10-9029-5_8
- Vásquez-Ramírez LM y Castaño-Zapata J. 2017. Manejo integrado de la marchitez vascular del tomate [*Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* (SACC.) W.C. Snyder & H.N. Hansen]: una revisión. Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica 20 (2): 363–374. <https://doi.org/10.31910/rudca.v20.n2.2017.394>
- Vinas M, Mendez JC and Jiménez VM. 2020. Effect of foliar applications of phosphites on growth, nutritional status and defense responses in tomato plants. Scientia Horticulturae 265 (November 2019): 109200. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109200>
- Wang M, Gao L, Dong S, Sun Y and Shen Q. 2017. Role of silicon on plant–pathogen interactions. Frontiers in Plant Science 8, 701. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00701>
- Yáñez-Juárez MG, López-Orona CA, Ayala-Tafuya F, Partida-Ruvalcaba L, Velázquez-Alcaraz T, et al. 2018. Los fosfitos como alternativa para el manejo de problemas fitopatológicos. Revista Mexicana de Fitopatología 36 (1): 79–94. <https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.1710-7>