



## Efecto de tratamientos biológicos y déficit hídrico en la infección por *Macrophomina phaseolina* en sorgo

Karina Kuri-Aguirre<sup>1</sup>, Maribel Leal-Castillo<sup>1</sup>, Jesús Gerardo García-Olivares<sup>2</sup>, Sanjuana Hernández-Delgado<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Tamaulipas, Unidad Académica Multidisciplinaria Reynosa-Rodhe. Carretera Reynosa-San Fernando, cruce con Canal Rodhe Col. Arcoiris, C.P. 88779, Reynosa, Tamaulipas, México; <sup>2</sup>Instituto Politécnico Nacional. Centro de Biotecnología Genómica. Blvd. del Maestro s/n esq. Elías Piña. C.P. 88710, Reynosa, Tamaulipas, México.

\*Autor de Correspondencia:  
Sanjuana Hernández-Delgado  
shernandezd@ipn.mx

Sección:  
Número Especial

Recibido:  
25 Noviembre, 2024

Aceptado:  
22 Septiembre, 2025

Publicado:  
25 Septiembre, 2025

Cita:  
Kuri-Aguirre K, Leal-Castillo M, García-Olivares JG, Hernández-Delgado S. 2025. Efecto de tratamientos biológicos y déficit hídrico en la infección por *Macrophomina phaseolina* en sorgo. Revista Mexicana de Fitopatología 43(4): 92. <https://doi.org/10.18781/R.MEX.FIT.2024-22>

### RESUMEN

**Antecedentes/Objetivo.** Tamaulipas es el principal productor de sorgo (*Sorghum bicolor*) en México, pero sus rendimientos unitarios son afectados por factores bióticos y abióticos donde destaca *Macrophomina phaseolina*, cuyo control es parcialmente efectivo. En este trabajo se evaluó el efecto de tratamientos biológicos en el desarrollo de *M. phaseolina* en plántulas de sorgo cultivadas en invernadero en Reynosa, Tamaulipas.

**Materiales y Métodos.** Dos experimentos se establecieron bajo un arreglo factorial en parcelas subdivididas 2 x 2 x 5 donde las parcelas grandes fueron los híbridos Pioneer 8282 y RB Patrón; las parcelas medianas los niveles de humedad, riego y déficit hídrico; y las parcelas chicas los tratamientos biológicos: cepa T808 de *Trichoderma koningiopsis*, cepa AF36 de *Aspergillus flavus*; agente quelante de micotoxinas Quali®; testigo inoculado con *M. phaseolina* y testigo absoluto.

**Resultados.** El híbrido RB-Patrón mostró los mayores daños *M. phaseolina* y el menor crecimiento (altura de planta: 10 %) y acumulación de biomasa seca (entre 35-40 %). El déficit hídrico incrementó la infección por pudrición carbonosa y redujo el crecimiento del sorgo La cepa T808 de *T. koningiopsis* redujo la severidad de la pudrición carbonosa (valor del 4.6) mientras los otros tratamientos biológicos exhibieron valores de severidad mayores a 6.0.

**Conclusión.** Los tratamientos con mejor crecimiento del sorgo y menos daños por *M. phaseolina* (T808, P-8282) deberán evaluarse en condiciones de campo para confirmar la viabilidad de su aplicación en la producción comercial de sorgo en el norte de Tamaulipas.

**Palabras clave:** *Sorghum bicolor*, *Aspergillus flavus*, *Trichoderma koningiopsis*, Control biológico, Pudrición carbonosa



## INTRODUCCIÓN

Tamaulipas es el principal productor de sorgo en México, con el 60 % del total nacional. En el 2023 se cultivaron 806 mil hectáreas con una producción de 2.3 millones de toneladas y un rendimiento promedio de 2.8 t ha<sup>-1</sup>. La productividad del cultivo es baja pues 73 % del sorgo en Tamaulipas se cultiva en condiciones de temporal, con promedios del rendimiento de 2.6 t ha<sup>-1</sup>, lejos del rendimiento del sorgo (más de 6 t ha<sup>-1</sup>) cultivado con riego en otras regiones de México (SIAP, 2024). Bajo las condiciones del temporal tamaulipeco ocurren frecuentemente períodos intermitentes de sequía y de altas temperaturas, que afectan el crecimiento y desarrollo del cultivo, así como el rendimiento y calidad de la producción. El estrés ambiental incrementa la incidencia y daños por enfermedades y plagas (Díaz-Franco y Montes-García, 2008).

Una de las enfermedades más importantes del sorgo en Tamaulipas es la pudrición carbonosa del tallo, cuyo agente causal es el hongo *Macrophomina phaseolina*. El hongo infecta principalmente tallos y raíces de la planta y causa el síntoma típico de ‘pudrición carbonosa’ o ‘tizón cenizo’ debido a la producción de microesclerocios y micelio (Little *et al.*, 2023). La preponderancia de la enfermedad y de las condiciones favorables para su desarrollo ha generado el interés en la producción de germoplasma de sorgo resistente tanto al estrés ambiental (sequía y altas temperaturas) como a la pudrición carbonosa, con el objetivo de incrementar la producción en la región (Williams-Alanís *et al.*, 2009; 2021; Montes-García *et al.*, 2020; 2021). Considerando que la mayor proporción de la superficie sembrada con sorgo se cultiva en condiciones de temporal y que los insumos que se utilizan para su producción en estas condiciones son escasos (Alejandro-Allende *et al.*, 2020), es conveniente desarrollar, evaluar y proponer alternativas económicas, no contaminantes y efectivas en el control de las enfermedades y plagas del cultivo

Las estrategias de biocontrol de enfermedades como opción de manejo están disponibles, de manera que si ofrecen resultados favorables podrían extrapolarse a la producción comercial del sorgo en Tamaulipas (Ángeles-Núñez *et al.*, 2018). Las opciones que se han manejado en el caso de *M. phaseolina*, son diversas (Márquez *et al.*, 2021; Rajput *et al.*, 2023). Una de ellas, quizá la más utilizada en sorgo y otros cultivos, son los hongos del género *Trichoderma* spp. que utilizan mecanismos variados como antibiosis, micoparasitismo, competencia, promoción del crecimiento vegetal, mejoramiento de la tolerancia del hospedante al estrés abiótico y la activación del sistema de defensa contra patógenos como *M. phaseolina*. Además, producen compuestos volátiles y no volátiles y/o sideróforos para desarrollar su biocontrol (Shahriar *et al.*, 2022, Rubayet y Bhuiyan, 2023; Rajpu *et al.*, 2023). Martínez-Salgado *et al.* (2021) reportaron que *T. koningiopsis* (T-K11) mostró la mayor tasa de crecimiento y de inhibición del crecimiento de *M. phaseolina* (71 %) *in vitro*; así como la mayor producción de cacahuete (*Arachis hypogaea*) (1.60±0.01 t ha<sup>-1</sup>) y menores daños por pudrición carbonosa en campo. Arispe-Vázquez *et al.* (2024) observaron la mayor inhibición del crecimiento de *M. pseudophaseolina* por cepas de *T. reesei* en plantas de chile cultivadas en invernadero.

Otra opción, cuya aplicación en el manejo de *M. phaseolina* no se ha reportado, es el hongo *Aspergillus flavus*. Aunque es conocido que el hongo produce aflatoxinas con potencial carcinogénico en humanos y afecta la calidad y la productividad de diversos cultivos, en contraparte se reportan aislamientos que de manera natural no producen aflatoxinas (atoxigénicos) y que, además, compiten por espacio y nutrientes con los aislamientos productores de aflatoxinas durante el desarrollo de los cultivos, reduciendo la

contaminación por aflatoxinas. La cepa AF36 de *A. flavus* es una estrategia de control biológico por exclusión competitiva de hongos aflatoxigénicos en algodónero (Cotty y Bayman, 1993). King *et al.* (2011) y Rangel-Muñoz *et al.* (2022) indican que AF36 controla la infección por hongos toxígenos en algodónero (*Gossypium hirsutum*), maíz (*Zea mays*) o cacahuete. También en frutales como pistache (*Pistacia vera*) y almendro de España (*Prunus dulcis*), la cepa AF36 de *A. flavus* reduce significativamente la contaminación por aflatoxinas (García-López *et al.*, 2018, 2024).

Finalmente, está la opción de los agentes químicos detoxificantes que suprimen o reducen la adsorción, incrementan la excreción o modifican el modo de acción de sustancias como las micotoxinas, debido a que éstas se adhieren al compuesto por adsorción química. Un caso sobresaliente son los aluminosilicatos de calcio y sodio (HSCAS), usados con éxito en algunos cultivos (Habschied *et al.*, 2021; Hassan y Afzal, 2022; Aloui *et al.*, 2023). La aplicación foliar o al suelo de silicatos de sodio reduce la infección por *M. phaseolina* en soya (Rajput *et al.*, 2023). Tampoco hay reportes previos del uso de HSCAS en el cultivo del sorgo para el manejo de *M. phaseolina*. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de tratamientos biológicos (hongos *T. koningiopsis* cepa T808 y *A. flavus* cepa AF36; y el agente quelante aluminosilicato de calcio y potasio, Quali®), en el desarrollo de *M. phaseolina* en sorgo cultivado en invernadero, bajo condiciones de déficit hídrico.

**Híbridos de sorgo.** El estudio incluyó dos híbridos de sorgo, el P-8282 de Pioneer® y el RB-Patrón® del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). P-8282 se distingue por su adaptación al noreste de México, su tolerancia al acame y a la sequía (Pioneer-Dupont, 2017); RB-Patrón es tolerante a las altas temperaturas y sequía, así como a la infección por *M. phaseolina* en el norte de Tamaulipas (Williams-Alanís *et al.*, 2004).

**Tratamientos biológicos.** En el estudio se evaluaron tres estrategias de biocontrol: 1) la cepa AF36 de *A. flavus* (Syngenta®; Arizona, EUA); 2) la cepa T808 de *T. koningiopsis* (Hernández-Mendoza *et al.*, 2011) y 3) el agente quelante de aflatoxinas Quali (Azul Natural®; Durango, México. <https://azulnatural.net/products/>), a base de aluminosilicato de calcio y potasio. En todos los casos, la forma de aplicación y las dosis usadas se basaron en las instrucciones de los fabricantes. Tanto T808 como AF36 se inocularon al momento de la siembra del sorgo, mientras que Quali se aplicó al follaje de las plantas a los 15 días después de la siembra (dds) (solución de Quali/aceite mineral estéril 5:1 p/v).

**Inoculación de *M. phaseolina*.** El inóculo de *M. phaseolina* se preparó a partir de la cepa HMP5, aislada de soya (*Glycine max*) en Altamira, México y con alta virulencia en plantas de frijol (*Phaseolus vulgaris*), sorgo (*Sorghum bicolor*) y soya (*Glycine max*) (Mayek-Pérez *et al.*, 2002). La cepa se creció en medio Papa-Dextrosa-Agar (PDA) a 30 °C durante siete días en oscuridad. Los microesclerocios y micelio se ‘rasparon’ de las placas completamente colonizadas y se preparó una solución en agua desionizada estéril. A los tratamientos correspondientes se aplicó una concentración de 10<sup>5</sup> unidades formadoras de colonia por unidad experimental al momento de la siembra del sorgo, junto a las semillas (De la Peña-Devesa *et al.*, 2009).

**Niveles de humedad.** Los tratamientos se sembraron bajo dos condiciones de humedad: riego y déficit hídrico. En riego, la humedad se mantuvo a capacidad de campo desde la siembra hasta concluir los experimentos; en déficit hídrico el riego se suspendió a los 25

dds hasta alcanzar el punto de marchitez permanente. Las plantas se mantuvieron en esa condición durante tres días y se aplicó un riego de recuperación a capacidad de campo. En el resto de los experimentos, las plantas se mantuvieron bajo condiciones de riego normal (Mayek-Pérez *et al.*, 2002).

Las semillas de los híbridos de sorgo se desinfectaron en una solución de hipoclorito de sodio 1 % durante 2.5 min. Las semillas se enjuagaron con agua desionizada estéril y se secaron con papel estéril; luego, se sembraron en charolas de plástico de 36 cavidades que contenían sustrato estéril (Topsoil®; Marisville, EUA) a razón de seis semillas por cavidad. Los 20 tratamientos evaluados resultaron de la combinación de los factores y niveles considerados: dos híbridos de sorgo x dos niveles de humedad (riego, déficit hídrico) x 5 tratamientos de inoculación (tres de biocontrol: T808, AF35, Quali más dos testigos: los híbridos sin inoculación con ningún agente de control y los híbridos inoculados con HMP5). Los tratamientos presentaron un arreglo factorial en parcelas subdivididas y se aleatorizaron en un diseño experimental completamente al azar con seis repeticiones. Las parcelas grandes correspondieron a los híbridos de sorgo, las medianas a los niveles de humedad y las chicas a los tratamientos de biocontrol. La unidad experimental fue una cavidad con seis semillas. El experimento se repitió dos veces.

**Altura de planta.** La variable se midió a los 10, 16, 22, 28, 34 y 40 dds en tres plantas de cada unidad experimental; se utilizó una regla y se midió la altura a partir de la base de las plantas en el suelo y hasta el ápice de las hojas.

**Severidad de la pudrición carbonosa.** En las mismas fechas de evaluación de la altura de planta se cuantificó la severidad de la pudrición carbonosa en las plantas de una unidad experimental por tratamiento. Las plantas se lavaron previamente con agua desionizada estéril. La severidad se evaluó con la escala de Abawi y Pastor-Corrales (1990) que incluye nueve valores (del 1 al 9, donde 1=sin síntomas visibles y 9=75 % o más de los tejidos con lesiones, decaimiento de la raíz y crecimiento extenso del hongo).

**Peso seco de biomasa.** Las plantas a las que se evaluó la severidad de *M. phaseolina* se utilizaron para estimar el peso seco de la raíz, de la parte aérea y total. Las plantas se colocaron en sobres de papel y se secaron en un horno de aire forzado a 60 °C durante cinco días (FX5, Shel-Lab; Cornelius, OR, EUA). Posteriormente, se determinó el peso seco en una balanza analítica (BP 2100S, Sartorius; Göttingen, Alemania).

Los datos de las variables medidas se sujetaron al análisis de la varianza (ANVA). En los casos que se detectaron diferencias significativas, se calcularon los valores de la diferencia mínima significativa honesta (DMSH,  $p=0.05$ ) de Tukey para la comparación de promedios entre tratamientos (Martínez-Garza, 1988). El análisis estadístico se realizó con el programa SAS versión 9.0 para Windows (SAS Institute; Cary, NC, EUA; [https://www.sas.com/es\\_mx/home.html](https://www.sas.com/es_mx/home.html)).

**Experimento 1.** El ANVA detectó diferencias significativas ( $p<0.05$ ) entre niveles de inoculación para todas las variables medidas; entre híbridos y niveles de humedad sólo para altura de planta en la primer evaluación, mientras que para la sexta evaluación se detectaron diferencias significativas ( $p<0.05$ ) entre híbridos, niveles de humedad y de inoculación para severidad de pudrición carbonosa; entre híbridos para altura de planta y peso seco de tallo; entre niveles de humedad para peso seco de tallo y de raíz. Las interacciones simples y triples no mostraron diferencias significativas ( $p>0.05$ ) en la primera evaluación para

ninguna variable, pero si se detectaron diferencias significativas en todas las variables medidas para la mayoría de las interacciones en la sexta evaluación (datos no incluidos).

En la primera evaluación el híbrido P-8282 exhibió mayor altura de planta (5.6 cm), mientras que la menor altura de planta se detectó en condiciones de riego (5.1 cm). Entre tratamientos biológicos el testigo absoluto no registró daños por *M. phaseolina* (1.0) y también exhibió la mayor altura de planta (5.9 cm). La aplicación de T808 mostró el menor peso seco de tallo (16 mg), mientras que el tratamiento con *M. phaseolina* exhibió mayor peso seco de raíz (30 mg). Para la sexta evaluación, RB-Patrón presentó los mayores daños por pudrición carbonosa (6.0), que se tradujo en el menor crecimiento de las plantas (menores promedios en altura de planta, peso seco de tallo y peso seco de raíz). La sequía incrementó el daño por pudrición carbonosa y redujo, además, el crecimiento del sorgo en cuanto a la altura de planta, peso seco de tallo y de raíz. Por su parte, la cepa T808 redujo la severidad de la pudrición carbonosa hasta 4.6, mientras que los otros tratamientos biológicos exhibieron valores de severidad mayores a 6.0 (Cuadro 1).

La interacción triple (híbridos x humedad x tratamientos biológicos) mostró una amplia variación en respuestas, pues la severidad de *M. phaseolina* pasó de un valor de 1 a 9 y, por ello, se redujo la acumulación de biomasa seca total, pues los valores no fueron mayores de 200 mg por unidad experimental. Los tratamientos biológicos con menores daños por pudrición carbonosa fueron Kualí en RB-Patrón bajo riego y T808 en RB-Patrón bajo déficit de humedad (Figura 1A).

**Experimento 2.** El ANVA detectó diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre híbridos para las variables severidad de *M. phaseolina*, altura de planta y peso seco de tallo (primera evaluación); para los pesos secos de tallo y de raíz (sexta evaluación). Entre niveles de humedad hubo diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) sólo para la severidad de la pudrición carbonosa (primera evaluación); mientras que en la sexta evaluación se detectaron diferencias ( $p < 0.05$ ) en todas las variables medidas. Entre tratamientos biológicos se observaron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) para severidad de pudrición carbonosa en ambas fechas de evaluación y para altura de planta sólo en la primera medición de la variable. Las interacciones simples y triples no mostraron diferencias significativas ( $p > 0.05$ ) en la primera evaluación en ninguna variable, pero si se detectaron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) en todas las variables medidas para todas las interacciones, en la sexta medición de variables (datos no incluidos).

El híbrido RB-Patrón mostró mayor severidad de daño (1.4) en comparación con P-8282 que exhibió un valor de 1; sin embargo, también presentó los mayores promedios en altura de planta y peso seco de tallo en la primera medición y los menores pesos secos de tallo y de raíz en la sexta evaluación. Los mayores daños por pudrición carbonosa se observaron en plantas bajo déficit hídrico en comparación con plantas bajo riego: 1.4 vs 1.0 en la primera medición y 2.8 vs 2.0 en la segunda, respectivamente. El déficit hídrico redujo la altura de planta en 10 % y la acumulación de biomasa al final del experimento entre 35 y 40 %. En la primera medición, el testigo no mostró daños por *M. phaseolina* pero si la mayor altura de planta. En contraste, en la sexta evaluación los menores daños por pudrición carbonosa correspondieron a T808 (2.2), mientras que los otros tratamientos biológicos presentaron valores de severidad mayores a 2.7 (Cuadro 2). La interacción triple (híbridos x humedad x tratamientos biológicos) mostró menor variación en la respuesta a *M. phaseolina*, con valores de severidad de 1 a 4; por ello, la acumulación de biomasa seca total fue más alta que la observada en el experimento 1 (valores de hasta 1800 mg por unidad experimental). Los tratamientos biológicos con los menores daños por pudrición

carbonosa fueron Quali, AF36 y T808 en el híbrido P-8282 con déficit hídrico; así como *T. koningiopsis* cepa T808 en RB-Patrón con riego (Figura 1B).

**Cuadro 1.** Comparación de medias de los efectos principales para severidad de daño por *M. phaseolina*, altura de planta y acumulación de biomasa en sorgo. Primera y sexta evaluaciones en el experimento 1.

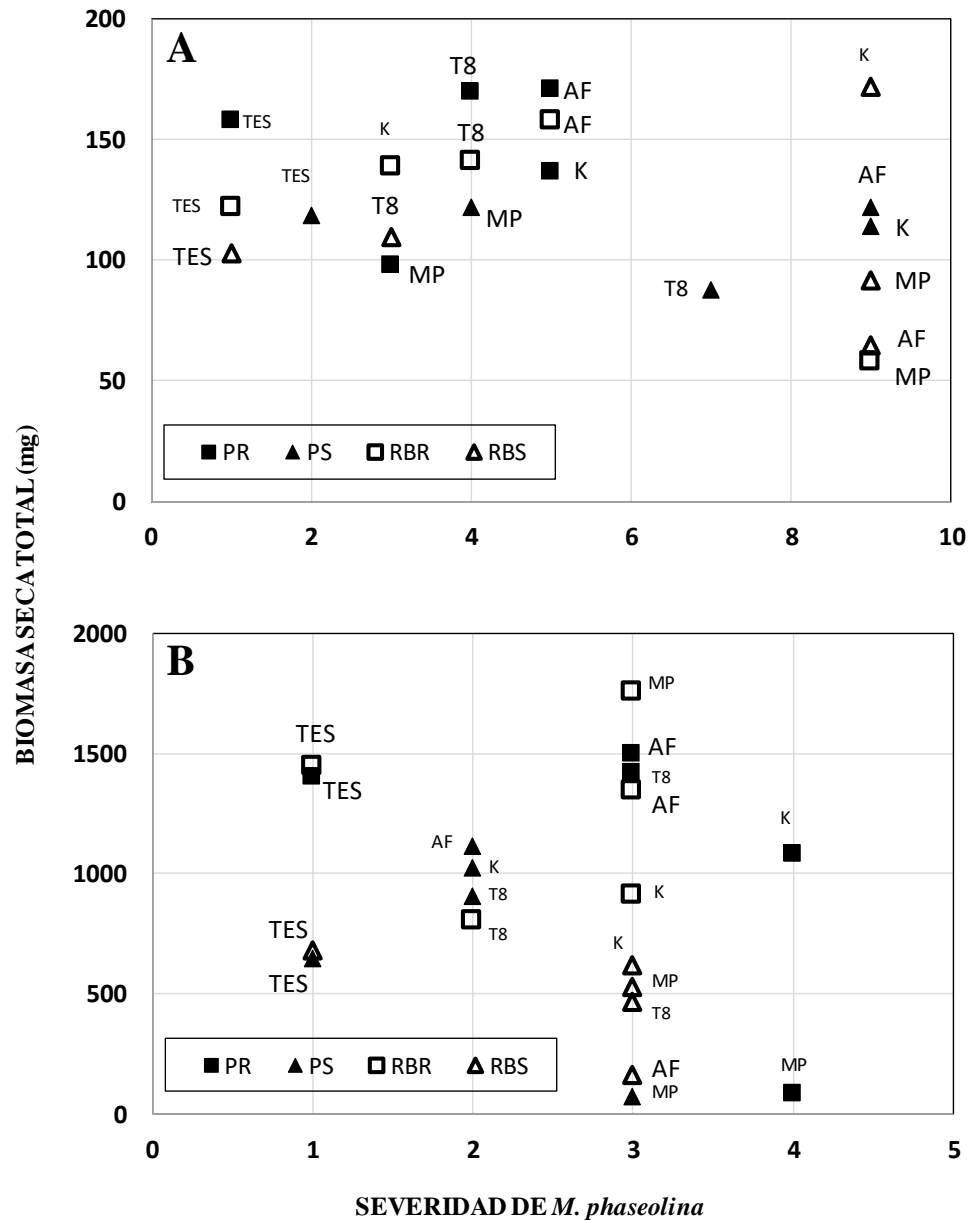
Tratamiento	Primera evaluación (10 dds)				Sexta evaluación (40 dds)			
	Severidad de daño	Altura planta (cm)	Peso seco tallo (mg)	Peso seco raíz (mg)	Severidad de daño	Altura planta (cm)	Peso seco tallo (mg)	Peso seco raíz (mg)
Híbridos	1.0	5.6	19	18	4.6	7.3	78	60
Pioneer 8282	1.3	5.1	20	20	6.0	6.8	66	54
RB-Patrón	0.3NS	0.3**	2NS	2NS	1.3**	0.4**	8**	11NS
DMS								
Humedad								
Riego	1.0	5.1	18	20	2.6	7.2	84	63
Déficit hídrico	1.3	5.6	20	20	8.0	6.9	59	50
DMS	0.3NS	0.3**	2NS	2NS	1.3**	0.4NS	8**	11**
Inoculación								
<i>M. phaseolina</i>	1.0	4.9	22	30	6.9	6.9	62	50
AF36	2.1	5.3	21	2	6.7	7.1	82	56
T808	1.2	4.8	16	19	4.2	6.7	68	58
Quali	1.0	5.5	20	18	7.9	7.1	71	67
Testigo	1.0	5.9	19	15	1	7.4	70	51
DMS	0.6**	0.7**	4**	4**	2.6**	0.8NS	18NS	25 NS

**Cuadro 2.** Comparación de medias de los efectos principales para severidad de daño por *M. phaseolina*, altura de planta y acumulación de biomasa en sorgo. Primer y sexto evaluaciones en el experimento 2.

Tratamiento	Primera evaluación (10 dds)				Sexta evaluación (40 dds)			
	Severidad de daño	Altura planta (cm)	Peso seco tallo (mg)	Peso seco raíz (mg)	Severidad de daño	Altura planta (cm)	Peso seco tallo (mg)	Peso seco raíz (mg)
Híbridos								
Pioneer 8282	1.0	10.6	105	14	2.3	17.3	720	360
RB-Patrón	1.4	11.4	88	15	2.5	17.2	586	223
DMS	0.3**	0.3**	10**	2NS	0.4NS	0.6NS	77**	43**
Humedad								
Riego	1.0	11.1	103	15	2.0	18.1	801	367
Déficit hídrico	1.4	10.9	90	13	2.8	16.5	513	221
DMS	0.3**	0.3NS	10NS	2NS	0.4**	0.6**	77**	43**
Inoculación								
<i>M. phaseolina</i>	1.4	10.9	99	15	3.0	16.5	550	313
AF36	1.8	10.6	92	13	2.7	17.7	742	315
T808	1.6	10.7	88	15	2.2	16.8	634	238
Quali	1.2	11.1	105	15	2.8	16.7	629	288
Testigo	1.0	11.6	97	15	1	18.0	700	335
DMS	0.4**	0.7**	25NS	4NS	0.7**	1.6NS	195NS	109NS

En ambos experimentos se observó que los mayores daños por pudrición carbonosa ocurrieron en el híbrido RB-Patrón, particularmente cuando se cultivó en condiciones de deficiencia hídrica; esto derivó en la menor acumulación de biomasa seca. Ambas condiciones de estrés, solas o combinadas (hongo/déficit de humedad), afectan negativamente el crecimiento y la acumulación de biomasa seca en los híbridos de sorgo

(Perumal *et al.*, 2020; Marquez *et al.*, 2021; Little *et al.*, 2023), particularmente durante la fase vegetativa del desarrollo de la especie, que fue el periodo que se estudió en este trabajo. La sequía reduce el crecimiento de la parte aérea y de las raíces del sorgo, así como la acumulación de biomasa seca debido a la reducción de la extensibilidad de la pared y la turgencia celular (Queiroz *et al.* 2019; Abreha *et al.*, 2022).



**Figura 1.** Relación entre la severidad de la pudrición carbonosa y la biomasa seca total acumulada en la sexta evaluación en sorgo cultivado en invernadero. (A) Experimento 1, (B) Experimento 2. PR=Pioneer 8282/Riego; PS=Pioneer 8282/Déficit hídrico; RBR=RB Patrón/Riego; RBS=RB Patrón/Déficit hídrico.

En general, el tratamiento con *T. koningiopsis* cepa 808 tuvo los mejores resultados de control de *M. phaseolina* en términos de los menores daños por pudrición carbonosa y el mayor crecimiento y acumulación de biomasa seca. Las combinaciones de Quali con RB-Patrón bajo riego y T808 con RB-Patrón bajo déficit de humedad, aunque con acumulación de biomasa intermedia (experimento 1) también ofrecieron resultados promisorios;

mientras que en el experimento 2 las mejores respuestas de biocontrol se obtuvieron con Kualí, AF36 o T808 en combinación con P-8282 bajo déficit hídrico y T808 con RB-Patrón bajo riego. Además, ciertas combinaciones específicas de tratamientos de biocontrol (*T. koningiopsis*, *A. flavus* atoxigénica, Kualí) exhibieron porcentajes de reducción de la severidad de la pudrición carbonosa en sorgo, así como la reducción de los efectos en el crecimiento y acumulación de biomasa seca.

Los reportes del efecto de cepas de *T. harzianum*, *T. viride*, *T. asperellum* o *T. koningiopsis* en la supresión del crecimiento *in vitro* y de los daños causados en campo por diversos hongos fitopatógenos, entre ellos *M. phaseolina*; así como en diversos cultivos, entre ellos en sorgo, han sido constantes y con resultados similares (Yassin *et al.*, 2021). Aislamientos del género *Trichoderma* y, en específico, cepas de *T. koningiopsis* han mostrado efectos positivos en sorgo, tanto mejorando su respuesta al estrés abiótico como en la defensa contra la infección de patógenos como *M. phaseolina* (Bhutada y Shinde, 2023; Kubiak *et al.*, 2023; Rubayet y Bhuiyan, 2023; Rajpu *et al.*, 2023). Por ejemplo, en cacahuete cultivado en Puebla, México Martínez-Salgado *et al.* (2021) reportaron que *T. koningiopsis* presentó la mayor tasa de crecimiento y la mayor inhibición del crecimiento de *M. phaseolina* (71 %) *in vitro*; así como la mayor producción de cacahuete ( $1.60 \pm 0.01$  t ha<sup>-1</sup>) y los menores daños por pudrición carbonosa en campo. Ruangwong *et al.* (2021) señalaron que *T. koningiopsis* contiene azetidina, 2-feniletanol y etil-hexadecanoato, compuestos asociados con la antibiosis y la supresión del crecimiento micelial de *M. phaseolina* reportados por Martínez-Salgado *et al.* (2021).

Aunque autores como Quiroz *et al.* (2008) observaron que cepas de *Aspergillus* sp. podrían constituirse como una opción en el control biológico de hongos como *M. phaseolina*, no recomendaron su aplicación en campo dado que se conoce la capacidad productora de aflatoxinas y de otras micotoxinas en las especies del género. Sin embargo, los resultados de Almeyda-León *et al.* (2020) son promisorios pues, a partir de 312 aislados obtenidos de suelos cultivados y no cultivados, identificaron 212 morfotipos fúngicos y de ellos tres morfotipos inhibieron el crecimiento de *M. phaseolina* en más del 60 %. Dos de esos morfotipos se identificaron como *Aspergillus* sp. y el otro como *Penicillium* sp. Los resultados demostraron que naturalmente ocurren cepas de hongos con una potencial actividad antagónica contra *M. phaseolina*. Entonces, los hongos del género *Aspergillus* nativos de suelos cultivados o no cultivados de México son potencialmente aptos para aplicarse en estrategias de control biológico de *M. phaseolina* en sorgo, solo que se debe asegurar la condición atoxigénica de las cepas con potencial para inhibir el desarrollo de la pudrición carbonosa en sorgo cultivado en el noreste de México.

En el caso del agente secuestrante fabricado con base en aluminosilicato de calcio y potasio (HSCAS), aunque en menor medida, también mostró resultados que permiten sugerir la necesidad de evaluaciones posteriores en campo que permitan definir si tiene posibilidades de usarse en la producción comercial de sorgo en el norte de Tamaulipas. Los aluminosilicatos se han evaluado y aplicado, con éxito, en el manejo de las aflatoxicosis derivadas del hongo *A. flavus*, particularmente en la industria de los alimentos balanceados que utilizan granos de sorgo y de maíz que, de estar contaminados con aflatoxinas, serían un importante problema de salud para el ganado y, posteriormente, para el consumidor de los productos de ese ganado, como la carne y la leche (Peng *et al.*, 2018).

El siguiente paso es extender estas evaluaciones al ciclo biológico completo del cultivo, en varios sitios experimentales en el norte de Tamaulipas y corroborar lo observado en condiciones controladas. Los resultados son promisorios en ese sentido, pues este es el

primer reporte que cuyos resultados indican que, tanto la cepa AF36 de *A. flavus* como el agente secuestrante Kualí muestran efectos positivos en el biocontrol de *M. phaseolina* en el patosistema que integra con el sorgo en condiciones de temporal.

El reto en el corto plazo es definir el modo de acción los microorganismos antagonistas o del agente secuestrante en el caso de *M. phaseolina* en sorgo, lo que permitirá avanzar en el desarrollo de biopesticidas potenciales a partir del establecimiento de las interacciones en sistemas dinámicos (agente de biocontrol-fitopatógeno, agente de biocontrol-planta o agente de biocontrol-planta-fitopatógeno). Además de comprobar las propiedades antagónicas y fitosanitarias del hongo, deberá evaluarse su toxicidad en los humanos y al medio ambiente. También, es importante poner atención en los métodos de tratamiento o aplicación tanto a suelo, como a planta o semillas; la formulación y la fermentación en gran escala de los biopesticidas. Una limitante es transferir efectivamente los resultados del laboratorio al campo, aunque el reto más importante para desarrollar productos biológicos es el generar conciencia pública sobre la eficacia y seguridad de los bioproductos basados en *Trichoderma* sp. (Navi y Yang, 2020; Kubiak *et al.*, 2023; Kumar *et al.*, 2023).

El híbrido de sorgo RB-Patrón mostró los mayores daños por pudrición carbonosa en comparación con P-8282, así como el menor crecimiento (altura de planta: 10 %) y acumulación de biomasa seca (entre 35-40 %). El déficit hídrico incrementa la severidad de la pudrición carbonosa y reduce el crecimiento del sorgo. La cepa T808 de *T. koningiopsis* redujo la severidad de la pudrición carbonosa (valor del 4.6) mientras los otros tratamientos biológicos exhibieron valores de severidad mayores a 6.0.

La interacción triple (híbridos x humedad x tratamientos biológicos) mostró resultados variables, pues los tratamientos biológicos con los menores daños por pudrición carbonosa fueron Kualí, AF36 y T808 en el híbrido P-8282 con déficit hídrico; así como T808 en RB-Patrón con riego. Estos tratamientos deberán evaluarse en condiciones de campo para confirmar la viabilidad de su aplicación en la producción comercial de sorgo en el norte de Tamaulipas.

### **Limitaciones**

Los resultados de este trabajo son válidos bajo las condiciones de prueba reportadas en este estudio.

### **Conflicto de interés**

Los autores declaran que no tienen ningún conflicto de interés.

### **Financiamiento**

Los autores agradecen al Instituto Politécnico Nacional el financiamiento del trabajo, a través del proyecto clave: SIP20131855.

### **Contribución de los autores**

K Kuri-Aguirre desarrolló los experimentos, registró la información estructuró la base de datos. J.G García-Olivares llevó a cabo el análisis estadístico e interpretación. M Leal-Castillo y S Hernández-Delgado planificaron el estudio, escribieron el manuscrito y editaron el manuscrito.

## REFERENCIAS

- Abawi GS and Pastor-Corrales MA. 1990. Root Rots of Beans in Latin America and Africa: Diagnosis, Research Methodologies and Management Strategies. CIAT. 114 p.
- Abreha KB, Enyew M, Carlsson AS, Vetukuri RR, Feyissa T, *et al.* 2022. Sorghum in dryland: morphological, physiological, and molecular responses of sorghum under drought stress. *Planta* 255:20. <https://doi.org/10.1007/s00425-021-03799-7>
- Alejandro-Allende F, García-Mata R, García-Sánchez RC, Mora-Flores JS y Sangerman-Jarquín DM. 2020. Competitividad de la producción de sorgo en el norte de Tamaulipas, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 11:139-150. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i1.1914>
- Almeyda-León IH, Rodríguez-Guerra R, López-Arroyo JI, Rodríguez-Villarreal RA, Robledo-Leal ER, *et al.* 2020. Caracterización funcional de hongos aislados de suelo por su capacidad antagonista contra *Macrophomina phaseolina*. *Biotecnología y Sustentabilidad* 5:62-74. <https://doi.org/10.57737/biotecnologiaysust.v5i1.920>
- Aloui A, Ben Salah-Abbès J, Zinedine A, Riba A, Durand N, *et al.* 2023. Prevention and detoxification of mycotoxins in human food and animal feed using bio-resources from South Mediterranean countries: a critical review. *Critical Reviews in Toxicology* 53:117–130. <https://doi.org/10.1080/10408444.2023.2211178>.
- Ángeles-Núñez JA, Herrera-Corredor C y Pecina-Quintero V. 2018. Efecto de *Trichoderma* sp. en el cultivo de sorgo. In: J Martínez-Herrera, MA Ramírez-Guillermo y J Cámara-Córdova (eds.). *Investigaciones Científicas y Agrotecnológicas para la Seguridad Alimentaria*, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Villahermosa, México. pp. 531-539. [https://www.researchgate.net/profile/JorgeHerrera19/publication/330401807Investigaciones\\_Cientificas\\_y\\_Agrotecnologicas\\_para\\_la\\_Seguridad\\_Alimentaria/links/5c3e792fa6fdcc6b5b049ce/Investigaciones-Cientificas-y-Agrotecnologicas-para-la-Seguridad-Alimentaria.pdf#page=544](https://www.researchgate.net/profile/JorgeHerrera19/publication/330401807Investigaciones_Cientificas_y_Agrotecnologicas_para_la_Seguridad_Alimentaria/links/5c3e792fa6fdcc6b5b049ce/Investigaciones-Cientificas-y-Agrotecnologicas-para-la-Seguridad-Alimentaria.pdf#page=544)
- Arispe-Vázquez JL, Díaz-Nájera JF, Ayvar-Serna S, Flores-Yáñez JA, Vargas-Hernández M, *et al.* 2024. Control of *Macrophomina pseudophaseolina* Crous, Sarr & Ndiaye with *Trichoderma* spp. and botanical and chemical pesticides. *Agroproductividad* 17. <https://doi.org/10.32854/agrop.v17i2.2804>
- Bhutada S and Shinde M. 2023. Biocontrol of charcoal rot by soil microorganisms, In: Kumar P and Dubey RC (eds.). *Macrophomina phaseolina*, Ecobiology, Pathology and Management. pp. 253-264, Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15443-0.00008-5>.
- Cotty PJ and Bayman P. 1993. Competitive exclusion of a toxigenic strain of *Aspergillus flavus* by an atoxigenic strain. *Phytopathology* 83:1283-1287. [https://www.apsnet.org/publications/phytopathology/backissues/Documents/1993Articles/Phyto83n12\\_1283.PDF](https://www.apsnet.org/publications/phytopathology/backissues/Documents/1993Articles/Phyto83n12_1283.PDF)
- De la Peña-Devesa D, Hernández-Delgado S, Cantú-Almaguer MA, Arroyo-Becerra AL, Villalobos-López MA, *et al.* 2009. Methods for *Macrophomina phaseolina* inoculation in common beans. Annual Report of the Bean Improvement Cooperative 52:94-95 [https://www.academia.edu/108991340/Methods\\_for\\_Macrophomina\\_Phaseolina\\_Inoculation\\_in\\_Common\\_Beans](https://www.academia.edu/108991340/Methods_for_Macrophomina_Phaseolina_Inoculation_in_Common_Beans)
- Díaz-Franco A y Montes-García N. 2008. La fitopatología en la región semiárida de Tamaulipas, México. *Revista Mexicana de Fitopatología* 26:62-70. <https://www.redalyc.org/pdf/612/61226110.pdf>
- García-López MT, Jaime R, Camiletti BX, Ortega-Beltrán A, Moral J y Michailides TJ. 2018. Contaminación de aflatoxinas en frutos secos: Un problema emergente. *Phytoma* 302:38-42. <https://biblio.iita.org/documents/S18ArtGarcialopezContaminacionNothomNodev.pdf-aecce88652ae90a76c38f82e57fcd366.pdf>
- García-Lopez MT, Meca E, Jaime R, Puckett RD, Michailides TJ, *et al.* 2024. Sporulation and dispersal of the biological control agent *Aspergillus flavus* AF36 under field conditions. *Phytopathology* 114:1118-1125. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-06-23-0200-KC>
- Habschied K, Krstanović V, Zdunić Z, Babić J, Mastanjević K, *et al.* 2021. Mycotoxins biocontrol methods for healthier crops and stored products. *Journal of Fungi* 7:348. <https://doi.org/10.3390/jof7050348>.
- Hassan SM and Afzal N. 2022. Assessment of aflatoxins production and its various control strategies: a review. *Lahore Garrison University Journal of Life Sciences* 6:68-82. DOI: <https://doi.org/10.54692/lgujls.2022.0601201>
- Hernández-Mendoza JL, Sánchez-Pérez MI, García-Olivares JG, Mayek-Pérez N, González-Prieto JM, *et al.* 2011. Caracterización molecular y agronómica de aislados de *Trichoderma* spp. nativos del noreste de México. *Revista Colombiana de Biotecnología* 13: 176-185. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=77621587017>
- King ED, Bassi AB, Ross DC and Druebbisch B. 2011. An industry perspective on the use of “atoxigenic” strains of *Aspergillus flavus* as biological control agents and the significance of cyclopiazonic acid. *Toxin Reviews* 30:33–41. <https://doi.org/10.3109/15569543.2011.588818>
- Kubiak A, Wolna-Maruwka A, Pilarska AA, Niewiadomska A and Piotrowska-Cyplik A. 2023. Fungi of the *Trichoderma* genus: future perspectives of benefits in sustainable agriculture. *Applied Sciences* 13:6434. <https://doi.org/10.3390/app13116434>
- 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> Little CR, Perumal R, Tesso T, Bandara YMAY and Noor A. 2023. Charcoal rot: a major root and stalk disease of sorghum. In: Kumar P, Dubey RC (eds.). *Macrophomina Phaseolina*, Ecobiology, Pathology and Management. Pp. 33-54. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15443-0.00018-8>
- Marquez N, Giachero ML, Declerck S and Ducasse DA. 2021. *Macrophomina phaseolina*: General characteristics of pathogenicity and methods of control. *Frontiers in Plant Science* 12:634397. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.634397>
- Martínez-Garza A. 1988. Diseños Experimentales. Métodos y Elementos de Teoría. Trillas. México. 756 p.

- Martínez-Salgado SJ, Andrade-Hoyos P, Parraguirre Lezama C, Rivera-Tapia A, Luna-Cruz A, *et al.* 2021. Biological control of charcoal rot in peanut crop through strains of *Trichoderma* spp., in Puebla, Mexico. *Plants* 10:2630. <https://doi.org/10.3390/plants10122630>
- Mayek-Pérez N, García-Espinosa R, López-Castañeda C, Acosta-Gallegos JA and Simpson J. 2002. Water relations, histopathology and growth of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) during pathogenesis of *Macrophomina phaseolina* under drought stress. *Physiological and Molecular Plant Pathology* 60: 185-195. <https://doi.org/10.1006/pmpp.2001.0388>
- Montes-García N, Williams-Alanís H, López-Cisneros MA, Pecina-Quintero V y Lara-Aranda U. 2020. Líneas progenitoras de híbridos comerciales de sorgo del INIFAP. Folleto técnico No. MX-0-310302-45-03-13-09-77. Campo Experimental Río Bravo, Instituto Nacional e Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Río Bravo, México. 36 p. <http://www.inifapcirne.gob.mx/Biblioteca/Publicaciones/1081.pdf>
- Montes-García N, Pecina-Quintero V, Williams-Alanís H, Hernández-Martínez M, Cisneros-López ME, *et al.* 2021. Mejoramiento genético de sorgo en el INIFAP. *Revista Mexicana De Ciencias Agrícolas* 12:59-62. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i25.2824>
- Navi SS and Yang, X.B. 2020. Use of *Trichoderma* in the management of diseases in North American row crops. In: Sharma A and Sharma P (eds) *Trichoderma*. Rhizosphere Biology. Springer, Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-3321-1\\_10](https://doi.org/10.1007/978-981-15-3321-1_10)
- Peng Z, Chen L, Zhu Y, Huang Y, Hu X, *et al.* 2018. Current major degradation methods for aflatoxins: A review. *Trends in Food Science & Technology* 80:155-166. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.08.009>
- Perumal R, Tomar SS, Bandara A, Maduraimuthu D, Tesso TT, *et al.* 2020. Variation in stalk rot resistance and physiological traits of sorghum genotypes in the field under high temperature. *Journal of General Plant Pathology* 86:350–359. <https://doi.org/10.1007/s10327-020-00940-4>
- Pioneer-Dupont. 2017. NORESTE, Folleto de Productos Otoño – Invierno 2017. Tlajomulco de Zúñiga, México. 16 p. [https://www.pioneer.com/CMRoot/International/Mexico\\_Intl/images/WEB-FOLLETO-NE-OI-2017.pdf](https://www.pioneer.com/CMRoot/International/Mexico_Intl/images/WEB-FOLLETO-NE-OI-2017.pdf)
- Queiroz MS, Oliveira CE, Steiner F, Zuffo AM, Zoz T, *et al.* 2019. Drought stresses on seed germination and early growth of maize and sorghum. *Journal of Agricultural Science* 11:310-318. <https://doi.org/10.5539/jas.v11n2p310>
- Quiroz-Sarmiento V, Ferrera-Cerrato R, Alarcón A y Lara M. 2008. Antagonismo *in vitro* de cepas de *Aspergillus* y *Trichoderma* hacia hongos filamentosos que afectan al cultivo del ajo. *Revista Mexicana de Micología* 26:27-34. <https://doi.org/10.33885/sf.2008.3.1013>
- Rajput LS, Kumar S, Nataraj V, Shivakumar M, Pathak K, *et al.* 2023. Recent advancement in management of soybean charcoal rot caused by *Macrophomina phaseolina*. In: *Macrophomina phaseolina*. pp. 55-74. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15443-0.00023-1>
- Rangel-Muñoz EJ, Valdivia-Flores AG, Hernández-Delgado S, Cruz-Vázquez C, de-Luna-López MC, *et al.* 2022. Assessment of the potential of a native non-aflatoxigenic *Aspergillus flavus* isolate to reduce aflatoxin contamination in dairy Feed. *Toxins* 14:437. <https://doi.org/10.3390/toxins14070437>
- Rubayet T and Bhuiyan KA. 2023. *Trichoderma* spp.: A bio-agent for sustainable management of *Macrophomina phaseolina*. In: Kumar P and Dubey RC (eds.). *Macrophomina phaseolina*, Ecobiology, Pathology and Management. pp. 265-290, Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15443-0.00020-6>
- Ruangwong OU, Pornsuriya C, Pitija K and Sunpapao A. 2021. Biocontrol mechanisms of *Trichoderma koningiopsis* PSU3-2 against postharvest anthracnose of chili pepper. *Journal of Fungi* 7:276. <https://doi.org/10.3390/jof7040276>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). 2024. Producción agrícola (cierre de la producción agrícola 1980-2023). Disponible en: <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agricola-33119> (Consulta: Junio 2024).
- Shahriar SA, Islam MN, Chun CNW, Kaur P, Rahim MA, *et al.* 2022. Microbial metabolomics interaction and ecological challenges of *Trichoderma* species as biocontrol inoculant in crop rhizosphere. *Agronomy* 12:900. <https://doi.org/10.3390/agronomy12040900>
- Williams-Alanís H, Pecina-Quintero V, Montes-García N, Zavala-García F, Arcos-Cavazos G, *et al.* 2009. Evaluación de híbridos de sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench.] para resistencia a pudrición carbonosa [*Macrophomina phaseolina* (Tassi) Goid.] en Tamaulipas, México. *Revista Mexicana de Fitopatología* 27: 69-72. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0185-33092009000100009&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-33092009000100009&lng=es&tlng=es)
- Williams-Alanís H, Pecina-Quintero V, Zavala-García F, Montes-García N. 2004. RB-Patrón, nuevo híbrido de sorgo para grano en el noreste de México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 27:291-293. <https://doi.org/10.35196/rfm.2004.3.291>
- Williams-Alanís H, Aranda-Lara U, Arcos-Cavazos G, Zavala-García F, Rodríguez-Vázquez MC, *et al.* 2021. Potencial productivo de variedades experimentales de sorgo blanco para el sur de Tamaulipas. *Nova Scientia* 13(26). <https://doi.org/10.21640/ns.v13i26.2688>
- Yassin MT, Mostafa AA and Al-Askar AA. 2021. *In vitro* antagonistic activity of *Trichoderma harzianum* and *T. viride* strains compared to carbendazim fungicide against the fungal phytopathogens of *Sorghum bicolor* (L.) Moench. *Egyptian Journal of Biological Pest Control* 31, 118. <https://doi.org/10.1186/s41938-021-00463-w>