

Efectividad biológica *in vitro* de extractos vegetales en especies de *Fusarium* aisladas de granos de maíz forrajero para la dieta del ganado

In vitro efficacy of plant extracts against *Fusarium* species isolated from forage maize grains used for livestock feed

Jazmín Janet Velázquez-Guerrero¹ , Ernesto Cerna-Chávez¹ , Yisa María Ochoa-Fuentes^{1*} 

¹ Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Departamento de Parasitología Agrícola, Calzada Antonio Narro 1923, Buenavista, 25315, Saltillo, Coahuila, México.

*Autor para correspondencia: yisa8a@yahoo.com

Fecha de recepción:

14 de noviembre de 2025

Fecha de aceptación:

17 de febrero de 2026

Disponible en línea:

21 de marzo de 2026

Este es un artículo en acceso abierto que se distribuye de acuerdo a los términos de la licencia Creative Commons.



Reconocimiento-
NoComercial-
CompartirIgual 4.0
Internacional
(CC BY-NC-SA 4.0)

Cómo citar:

Velázquez-Guerrero, J., Cerna-Chávez, E., & Ochoa-Fuentes, Y. M. (2026). Efectividad biológica *in vitro* de extractos vegetales en especies de *Fusarium* aisladas de granos de maíz forrajero para la dieta del ganado. *Acta Agrícola y Pecuaria*, 12, e0121015. <https://doi.org/10.30973/aap/2026.12.0121015>

RESUMEN

Debido al riesgo sanitario que representa la contaminación por *Fusarium* en maíz forrajero (*Zea mays* L.) para ensilaje, el objetivo de este estudio fue evaluar *in vitro* el efecto inhibitorio de extractos de mostaza, gobernadora, canela y cítricos sobre cepas aisladas de *F. oxysporum*, *F. verticillioide*s y *F. chlamydosporum*. Los resultados mostraron que el extracto de mostaza logró un control micelial superior al 91 % y de inhibición de esporas de 85 % (250 ppm), el extracto de gobernadora presentó eficacia del 99.99 % contra *F. chlamydosporum*. Aunque los extractos de canela y cítricos alcanzaron niveles de control cercanos al 90 %, requirieron dosis muy altas (30,000 ppm). La efectividad biológica se atribuye a compuestos como cinamaldehído y flavonoides, que alteran la estructura celular del hongo. Estos extractos representan una alternativa natural sostenible comparada con fungicidas químicos, permitiendo mitigar pérdidas económicas y reduciendo el riesgo de contaminación por micotoxinas en la alimentación del ganado.

PALABRAS CLAVE

Maíz quebrado, actividad antifúngica, extractos botánicos.

ABSTRACT

Due to the health risk posed by *Fusarium* contamination in forage maize (*Zea mays* L.) intended for silage, the objective of this study was to evaluate *in vitro* the inhibitory effect of mustard, governor, cinnamon, and citrus extracts on strains of *F. oxysporum*, *F. verticillioide*s, and *F. chlamydosporum* isolated from maize grains. The results showed that mustard extract achieved mycelial control greater than 91 % and spore inhibition of 85 % (250 ppm), while governor extract exhibited 99.99 % efficacy against *F. chlamydosporum*. Although cinnamon and citrus extracts reached control levels close to 90 %, they required very high doses (30,000 ppm). The biological effectiveness is attributed to compounds such as cinnamaldehyde and flavonoids, which alter the cellular structure of the fungus. These extracts represent a sustainable natural alternative compared with chemical fungicides, allowing the mitigation of economic losses and reducing the risk of mycotoxin contamination in livestock feed.

KEYWORDS

Broken corn, antifungal activity, botanical extracts.

INTRODUCCIÓN

El maíz forrajero (*Zea mays* L.) representa un pilar estratégico en la industria pecuaria, pues constituye aproximadamente el 40 % de la dieta del ganado en forma de ensilaje. Su relevancia como fuente primordial de carbohidratos, aminoácidos y nutrientes esenciales exige un manejo estricto que garantice su integridad y calidad nutricional (Kulazhanov et al., 2024; Preciado-Ortiz & Vázquez-Carrillo, 2022). A nivel global, este cereal lidera la producción con un estimado de 1.23 millones de toneladas, mientras que en el ámbito nacional mexicano se alcanza los 15.4 millones de toneladas, consolidándose como un recurso indispensable para la seguridad alimentaria del sector ganadero (Sistema de Información Agroalimentario y Pesquero, 2024; United States Department of Agriculture, s. f.).

Sin embargo, la productividad y la calidad de este grano se ven seriamente comprometidas por la infestación de agentes fúngicos, entre los que destaca el género *Fusarium*. Especies como *F. oxysporum*, *F. verticillioides* y *F. chlamydosporum* no solo afectan el rendimiento del cultivo, con pérdidas que pueden oscilar entre el 50 % y el 80 %, sino que alteran drásticamente las propiedades organolépticas y estructurales del grano mediante la emisión de compuestos volátiles y la modificación del microambiente de almacenamiento (Dinolfo et al., 2022; Mesterhazy, 2024; Viljoen et al., 2025).

El riesgo más crítico asociado a la presencia de *Fusarium* es la síntesis de metabolitos secundarios conocidos como micotoxinas que pueden ser fumonisin, zearalenona y tricotecenos (Kochiieru et al., 2021). La ingestión de estos compuestos por el ganado provoca efectos adversos severos incluyendo genotoxicidad, hepatotoxicidad, fallos renales, trastornos reproductivos e incluso la muerte (Serrano-Coll & Cardona-Castro, 2015; Wigmann et al., 2019). Estas patologías no solo vulneran el bienestar animal, sino que derivan en pérdidas económicas considerables debido a la reducción en la eficiencia productiva y la degradación del valor comercial del insumo forrajero (Pizzo et al., 2016).

Ante este escenario, el control convencional basado en métodos químicos ha mostrado limitaciones, principalmente por la generación de residuos tóxicos que pueden transferirse a la cadena alimen-

ticia (Habschied et al., 2021). En consecuencia, los extractos de origen vegetal, como los obtenidos de mostaza (*Sinapsis alba* L.), gobernadora [*Larrea tridentata* (DC.) Coville], canela (*Cinnamomum zeylanicum* Nees) y cítricos (*Citrus sinensis* L.), surgen como una alternativa biotecnológica valiosa. Estos bioinsumos destacan por su alta eficacia inhibitoria, nula residualidad y sostenibilidad ambiental (Gwad et al., 2024; Kursu et al., 2022). Por lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue evaluar *in vitro* el potencial antifúngico de estos cuatro extractos vegetales sobre cepas de *F. oxysporum*, *F. verticillioides* y *F. chlamydosporum* aisladas de maíz forrajero, con el fin de determinar su capacidad para mitigar el desarrollo micelial y la producción de esporas.

MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación se llevó a cabo en el Laboratorio de Toxicología del Departamento de Parasitología Agrícola de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, en Saltillo, Coahuila, México. El estudio consistió en la evaluación de cuatro extractos comerciales proporcionados por la empresa CULTA S.A. de C.V., aplicados en distintas concentraciones según el tipo de extracto: gobernadora en 700 ppm, 1,500 ppm, 2,500 ppm y 3,500 ppm; mostaza en 10 ppm, 50 ppm, 100 ppm y 250 ppm; canela en 10,000 ppm, 15,000 ppm, 20,000 ppm y 30,000 ppm, y cítricos en 10,000 ppm, 15,000 ppm, 20,000 ppm y 30,000 ppm.

Los extractos fueron probados contra tres especies de hongos, aplicando cada uno de los tratamientos con tres repeticiones y un testigo absoluto correspondiente a cada hongo por cada uno de los cuatro extractos. Este diseño experimental permitió generar un total de 12 cajas Petri por cada uno de los extractos por cada especie fúngica.

Las cepas evaluadas (*F. oxysporum*, *F. verticillioides* y *F. chlamydosporum*) se obtuvieron de muestras de maíz forrajero (3 g por muestra). Estas muestras se desinfectaron con NaClO al 1 % (1 min), posteriormente se enjuagaron en tres ocasiones con agua destilada estéril (1 min en cada enjuague) y se secaron en ambiente aséptico. La siembra se realizó en medio PDA (Papa-Dextrosa-Agar) acidificado (200 µL de ácido láctico al 85 %), con un periodo de incu-

bación de dos a tres días a 27 ± 2 °C. Para asegurar la pureza de los aislamientos, se transfirieron por punta de hifa a nuevas cajas Petri de PDA, incubándolas por siete días a 27 °C. La caracterización morfológica se realizó mediante montajes con azul de lactofenol y observación microscópica, empleando las claves taxonómicas de Barnett y Hunter (1998), además de las de Leslie y Summerell (2006).

Para las pruebas *in vitro*, se usó la técnica de dilución en agar, donde se adicionaron al medio PDA las concentraciones ya mencionadas para cada uno de los extractos. Se colocó un explante de cada especie del agente fúngico por caja Petri, cada uno midiendo 5 mm de diámetro, además de un testigo; estas se mantuvieron en incubación a temperatura de 27 °C. Se realizaron lecturas radiales cruzadas en cada una de las cepas y sus respectivos tratamientos con ayuda de un vernier digital cada 24 horas hasta que el testigo de cada tratamiento llenó la caja correspondiente. El porcentaje de inhibición correspondió a los valores finales y se reportó en centímetros, calculándose con la fórmula empleada por Bautista Zúñiga et al. (2004):

$$\% \text{ Inhibición} = \left(\frac{dc - dt}{dc} \right) \times 100$$

Donde dc = diámetro promedio del crecimiento micelial del testigo, y dt = diámetro del crecimiento micelial correspondiente a los tratamientos (extractos).

El procedimiento para el conteo de esporas se llevó a cabo una vez que el testigo llenó la caja Petri con micelio. Para ello, se utilizaron tubos Falcon en los que se colocaron 10 mL de agua destilada previamente esterilizada; mediante el uso de un sacabocados de 5 mm de diámetro, se extrajeron cinco explantes de cada unidad experimental (caja Petri) correspondiente a los diferentes tratamientos, depositándose cada conjunto de explantes en un tubo individual. Los tubos que contenían los explantes se agitaron vigorosamente utilizando un mezclador vórtex, de manera que se favoreciera la liberación de esporas en la suspensión acuosa. Posteriormente, se tomó un alícuota de 15 μ L de la suspensión obtenida y se colocó en una cámara de Neubauer; el conteo de esporas se realizó bajo el microscopio empleando el objetivo ocular de 40X, permitiendo

así cuantificar la producción de esporas para cada uno de los tratamientos evaluados.

Para analizar los resultados obtenidos en cuanto a los porcentajes de inhibición del crecimiento micelial en las diferentes especies de hongos evaluadas, se llevó a cabo un análisis de comparación de medias empleando la prueba de Tukey con un nivel de significancia de 0.05. Este procedimiento permitió identificar diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos y concentraciones evaluadas para cada uno de los extractos probados.

Posteriormente, las medias resultantes de los tratamientos se sometieron a un análisis Probit con la finalidad de determinar la concentración letal media (CL_{50}) y la concentración letal al 95 % (CL_{95}) para cada hongo y tratamiento. Para este análisis, se utilizó el *software* SAS versión 9.0, lo que permitió obtener estimaciones precisas de las concentraciones de extracto requeridas para inhibir el crecimiento micelial en el 50 % y 95 % de los casos, respectivamente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez completadas las lecturas de porcentaje de inhibición se procedió a realizar el análisis estadístico para la estimación de la CL_{50} para cada especie de fitopatógeno y sus respectivos tratamientos. Los resultados para *F. oxysporum* se muestran en los Cuadros 1 y 2.

De acuerdo con los resultados del Cuadro 1, el extracto de mostaza presentó mayor actividad biológica contra *F. oxysporum*, logrando una inhibición superior al 91 % desde apenas 100 ppm y alcanzando un máximo de 92.84 % a 250 ppm. Esta respuesta refleja una eficiencia significativamente mayor respecto a lo reportado por Cerna Chávez et al. (2023), quienes señalaron que las formulaciones de mostaza combinadas con nanopartículas de SiO_2 y ZnO requirieron concentraciones considerablemente más altas para alcanzar un efecto de control, con valores de DL_{50} de entre 821.31 ppm y 1,567 ppm. En el caso de la canela, esto coincide con lo reportado por Ramírez-Mejía et al. (2024), quienes evaluaron el extracto de *C. zeylanicum* contra *Fusarium* spp., logrando inhibiciones entre 37.22 % a 71.22 % a dosis de 200 ppm y 1,000,000 ppm, respectivamente. Para los cítricos, los resultados coinciden con lo reportado por Elgat

Cuadro 1. Porcentaje de inhibición de crecimiento micelial de *F. oxysporum*, evaluado con extracto de mostaza, gobernadora, canela y cítricos a diferentes concentraciones.

<i>F. oxysporum</i>							
Conc.	Mostaza	Conc.	Gober.	Conc.	Canela	Conc.	Cítricos
10 ppm	76.52 ^{b*}	700 ppm	50.19 ^b	10,000 ppm	55.07 ^c	10,000 ppm	61.46 ^c
50 ppm	82.13 ^a	1,500 ppm	68.15 ^a	15,000 ppm	69.10 ^b	15,000 ppm	76.54 ^b
100 ppm	91.69 ^a	2,500 ppm	69.68 ^a	20,000 ppm	71.46 ^b	20,000 ppm	82.63 ^b
250 ppm	92.84 ^a	3,500 ppm	72.24 ^a	30,000 ppm	90.66 ^a	30,000 ppm	90.09 ^a
TA	0.0	TA	0.0	TA	0.0	TA	0.0

Conc. = concentración, ppm= partes por millón, TA= testigo absoluto.

*Letras distintas indican diferencias significativas ($P < 0.05$) entre concentraciones de extractos (columnas).

Cuadro 2. Concentración letal media (ppm), límites fiduciales y ecuación de predicción de los extractos sobre *F. oxysporum*.

<i>F. oxysporum</i>						
	CL ₅₀	LFI	LFS	CL ₉₅	Ec. predicción	P-valor
Mostaza	3.06	0.56	6.95	1,840	Y= -0.375 + 0.770	< 0.0001
Gobernadora	594.46	108.95	976.29	70,745	Y= -2.198 + 0.792	0.0012
Canela	9,522	-	-	43,176	Y= -9.968 + 2.505	0.0004
Cítrico	7,620	4,920	9,537	36,932	Y= -9.315 + 2.399	< 0.0001

CL₅₀ = concentración letal 50, LFI = límite fiducial inferior, LFS = límite fiducial superior, Ec. predicción = ecuación de predicción.

et al. (2020), donde evaluaron tres extractos de origen vegetal: *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh., *Citrus X aurantium* L. y *C. sinensis* contra el género *Fusarium*, logrando inhibiciones miceliales de 100 % con el primer extracto, y de 65.66 % para los cítricos, lo cual denota que el efecto de *E. camaldulensis* estuvo por encima de los cítricos. Finalmente, el extracto de gobernadora presentó el control más limitado con un 72.24 % a 3,500 ppm, aunque este valor es superior al 43 % reportado por Bamidele et al. (2024) para *L. tridentata* contra *F. oxysporum*.

De acuerdo con la información presentada en el Cuadro 2, con los extractos evaluados para la cepa de *F. oxysporum*, la CL₅₀ más eficiente para la inhibición del crecimiento del hongo fue el extracto de mostaza con una CL₅₀ de 3.06 ppm, seguido del extracto de gobernadora con 594.46 ppm. Los extractos de canela y cítricos presentaron las CL₅₀ más altas con 9,522 ppm y 7,620 ppm, respectivamente.

El caso de *F. verticillioides* y sus respectivos tratamientos con los distintos extractos se muestran a continuación en los Cuadros 3 y 4.

Los resultados muestran la eficacia del extracto de mostaza frente a *F. verticillioides*, logrando una inhibición máxima del 94.83 % a una concentración de 250 ppm, con un control del 81.79 % desde las 100

ppm. Estos resultados son superiores a lo reportado por Torrijos et al. (2022), quienes evaluaron el extracto de mostaza contra *F. verticillioides in vitro*, fermentado por la bacteria *Lactiplantis plantarum* y donde usaron dosis significativamente mayores (7,600-15,600 ppm), alcanzando un 90 % de inhibición. En un segundo nivel de efectividad, el extracto de cítricos mostró un desempeño progresivo y superior a la canela, alcanzando un 88.58 % de inhibición a 30,000 ppm. Este resultado coincide con la efectividad del extracto de *Citrus maxima* (Burm.) Merr. contra *F. verticillioides* señalado por Mangoba y Alvindia (2025). Por el contrario, el extracto de canela registró un 83.24 % en la misma dosis, valor que contrasta con el reportado por Castro et al. (2020), quienes usaron los extractos de *C. zeylanicum*, *Zingiber officinale* Roscoe y *Cymbopogon martini* (Roxb.) Will. Watson contra *F. verticillioides* y lograron una inhibición efectiva del desarrollo micelial, en donde destaca la canela por encima de las otras plantas, pues estimaron la CL₅₀ en 2,500 ppm, 5,000 ppm y 2,000 ppm, respectivamente para cada extracto, contrastando el valor del extracto de canela cuya CL₅₀ de 2,500 ppm fue considerablemente menor a la obtenida en este estudio (10,641 ppm). Finalmente, el extracto de gobernadora alcanzó un 75.01 % a 3,500 ppm, superando ampliamente los

Cuadro 3. Porcentaje de inhibición del crecimiento micelial de *F. verticillioides* evaluado con extracto de mostaza, gobernadora, canela y cítricos a diferentes concentraciones.

<i>F. verticillioides</i>							
Conc.	Mostaza	Conc.	Gober.	Conc.	Canela	Conc.	Cítricos
10 ppm	50.09 ^{b*}	700 ppm	45.31 ^c	10,000 ppm	48.24 ^c	10,000 ppm	66.29 ^d
50 ppm	65.90 ^{ab}	1,500 ppm	63.97 ^b	15,000 ppm	67.70 ^b	15,000 ppm	77.86 ^c
100 ppm	81.79 ^a	2,500 ppm	67.86 ^{ab}	20,000 ppm	74.63 ^b	20,000 ppm	82.92 ^b
250 ppm	94.83 ^a	3,500 ppm	75.01 ^a	30,000 ppm	83.24 ^a	30,000 ppm	88.58 ^a
TA	0.0	TA	0.0	TA	0.0	TA	0.0

Conc. = concentración, ppm = partes por millón, TA = testigo absoluto.

*Letras distintas indican diferencias significativas ($P < 0.05$) entre concentraciones de extractos (columnas).

Cuadro 4. Concentración letal media (ppm), límites fiduciales y ecuación de predicción de los extractos sobre *F. verticillioides*.

<i>F. verticillioides</i>						
	CL ₅₀	LFI	LFS	CL ₉₅	Ec. predicción	P-valor
Mostaza	11.42	4.74	19.01	1,447	$Y = -0.827 + 0.782$	< 0.0001
Gobernadora	898.30	497.40	1,212	27,199	$Y = -3.279 + 1.110$	< 0.0001
Canela	10,641	8,729	12,117	38,154	$Y = -11.944 + 2.966$	< 0.0001
Cítrico	6,129	2,832	8,465	42,980	$Y = -7.364 + 1.944$	< 0.0001

CL₅₀ = concentración letal 50, LFI = límite fiducial inferior, LFS = límite fiducial superior, Ec. predicción = ecuación de predicción.

hallazgos de Maidana Ojeda et al. (2022), quienes evaluaron el extracto de *L. tridentata* al 95 % contra *F. verticillioides* obteniendo apenas un 39 % de inhibición con una dosis mayor (10,000 ppm). En términos generales, *F. verticillioides* presenta una alta susceptibilidad a dosis bajas de mostaza, mientras que los demás extractos requieren concentraciones más altas para aproximarse al control.

En el Cuadro 4 se puede observar que el extracto de mostaza presentó la mejor inhibición del crecimiento de *F. verticillioides* con una CL₅₀ de 11.42 ppm, seguida del extracto de gobernadora, la cual presentó una CL₅₀ inhibitoria de 898.30 ppm. Los extractos de cítricos y canela presentaron las CL₅₀ más altas, 6,123 ppm y 10,647 ppm, respectivamente.

Para *F. chlamydosporum*, los resultados se encuentran en los Cuadros 5 y 6.

Los resultados revelan que *F. chlamydosporum* es altamente susceptible a todos los tratamientos evaluados, logrando inhibiciones superiores al 93 % en sus dosis máximas. Destaca el extracto de gobernadora, que alcanzó un control prácticamente total (99.99 %) a 3,500 ppm, manteniendo una eficacia constante y estadísticamente similar desde los 700 ppm. Este hallazgo coincide con lo reportado por Morales-Ubaldo et al. (2022), quienes señalan que los extractos de esta planta,

tanto comerciales como elaborados con diversos solventes, pueden alcanzar el 100 % de inhibición; sin embargo, señalan que la efectividad puede variar dependiendo del método de extracción y la parte empleada, pero que en general es un elemento eficaz contra el género *Fusarium*. Por su parte, el extracto de mostaza demostró mayor inhibición a la reportada por Drakopoulos et al. (2020), donde evaluaron extractos de mostaza sobre *Fusarium graminearum* y reportaron una inhibición del desarrollo micelial de 96 % a una concentración de 2,000 ppm; porcentaje equivalente 95.53 % de control con apenas 250 ppm en este estudio. En cuanto a canela y cítricos, ambos lograron alta eficacia a partir de las 20,000 ppm con inhibiciones del 95.25 % y 93.74 %, respectivamente. Martinko y Mioč (2024) mencionan que la canela es una opción viable, ya que en su estudio reportaron una inhibición del 70 % sobre *F. sporotrichioides* a una concentración de 5,000 ppm. Por su parte, Mshari et al. (2022) evaluaron extractos de diversas especies de cítricos [*Citrus aurantiifolia* (Christm.) Swingle, *C. sinensis*, *C. maxima*, *C. limon* (L.) Osbeck y *C. reticulata* Blanco] frente a dos especies de *Fusarium* (*F. solani* y *F. equiseti*). Los resultados mostraron que el extracto de *C. maxima* logró inhibiciones máximas de 72 % y 53 %, respectivamente para cada especie de hongo.

Cuadro 5. Porcentaje de inhibición del crecimiento micelial de *F. chlamydosporum* evaluado con extracto de mostaza, gobernadora, canela y cítricos a diferentes concentraciones.

<i>F. chlamydosporum</i>							
Conc.	Mostaza	Conc.	Gober.	Conc.	Canela	Conc.	Cítricos
10 ppm	73.17 ^{a*}	700 ppm	94.98 ^a	10,000 ppm	63.75 ^c	10,000 ppm	72.33 ^c
50 ppm	82.14 ^a	1,500 ppm	94.61 ^a	15,000 ppm	72.96 ^b	15,000 ppm	85.09 ^b
100 ppm	84.51 ^a	2,500 ppm	95.35 ^a	20,000 ppm	94.67 ^a	20,000 ppm	91.83 ^a
250 ppm	95.53 ^a	3,500 ppm	99.99 ^a	30,000 ppm	95.25 ^a	30,000 ppm	93.74 ^a
TA	0.0	TA	0.0	TA	0.0	TA	0.0

Conc. = concentración, ppm = partes por millón, TA = testigo absoluto.

*Letras distintas indican diferencias significativas ($P < 0.05$) entre concentraciones de extractos (columnas).

Cuadro 6. Concentración letal media (ppm), límites fiduciales y ecuación de predicción de los extractos sobre *F. chlamydosporum*.

<i>F. chlamydosporum</i>						
	CL ₅₀	LFI	LFS	CL ₉₅	Ec. Predicción	P-valor
Mostaza	0.92	0.01	3.91	939.24	$Y = 0.019 + 0.546$	0.0002
Gobernadora	6.62	2.60	11.41	395.03	$Y = -0.760 + 0.926$	< 0.0001
Canela	8.96	-	-	1,401	$Y = -0.71 + 0.749$	0.2778
Cítrico	6422	-	-	28,879	$Y = -9.592 + 2.519$	0.0195

CL₅₀ = concentración letal 50, LFI = límite fiducial inferior, LFS = límite fiducial superior, Ec. predicción = ecuación de predicción.

En el Cuadro 6 se observan las concentraciones inhibitorias de los extractos evaluados para *F. chlamydosporum*, los extractos que mostraron una mejor eficiencia de inhibición son los de mostaza, gobernadora y canela con CL₅₀ de 0.92 ppm, 6.62 ppm, 8.96 ppm, respectivamente, siendo el extracto de cítricos el que presentó la CL₅₀ más alta con 6,422 ppm.

Efectos en la esporulación de los agentes fúngicos

En el Cuadro 7 se aprecia que el extracto de mostaza presentó la mayor inhibición de esporas con una concentración de 4.9×10^5 esporas/mL en la dosis de 250 ppm, lo que representa la mayor disminución observada. Por otro lado, la gobernadora alcanzó un nivel de control similar (9.8×10^5 esporas/mL), pero a una concentración significativamente mayor de 3,500 ppm. En contraste, los extractos de canela y cítricos mostraron la menor inhibición de esporas, que van de 2.2×10^6 a 2.3×10^6 , respectivamente, a dosis de 30,000 ppm. Cabe destacar que, estadísticamente, no se registraron diferencias significativas entre las dosis dentro de cada tratamiento.

En el Cuadro 8 se observa que el extracto de gobernadora presentó la mayor inhibición de esporas, logrando reducir la concentración hasta 9.6×10^5

esporas/mL en su dosis de 3,500 ppm. Por su parte, el extracto de mostaza demostró una eficiencia destacable por su baja concentración, ya que con solo 250 ppm limitó la producción a 1.4×10^6 esporas/mL. En contraste, los extractos de canela y cítricos exhibieron un comportamiento dosis-dependiente más marcado, requiriendo concentraciones máximas de 30,000 ppm para alcanzar una reducción significativa de 1.7×10^6 y 2.0×10^6 esporas/mL, respectivamente.

En el Cuadro 9 se observa que el extracto de mostaza destacó nuevamente por su eficiencia, alcanzando la mayor inhibición de producción de esporas (3.4×10^5 esporas/mL) con apenas 250 ppm. De manera notable, los extractos de gobernadora, canela y cítricos mostraron una respuesta dosis-dependiente estadísticamente significativa, logrando sus mejores niveles de control a las concentraciones más altas (3,500 ppm para gobernadora, y 30,000 ppm para canela y cítricos), con valores que oscilaron entre 4.8×10^5 esporas/mL y 6.3×10^5 esporas/mL.

En relación con la inhibición de hongos del género *Fusarium* mediante el uso de extractos vegetales, Drakopoulos et al. (2019) demostraron que el tratamiento con extracto de mostaza reduce significativamente la esporulación de *F. graminearum*. El estudio

Cuadro 7. Comparación de número de esporas/mL de *F. oxysporum* ante los diferentes tratamientos.

<i>F. oxysporum</i> (esporas)							
Conc.	Mostaza	Conc.	Gobe.	Conc.	Canela	Conc.	Cítricos
10 ppm	1.1×10^6 a*	700 ppm	4.2×10^6 a	10,000 ppm	4.4×10^6 a	10,000 ppm	4.6×10^6 a
50 ppm	8.7×10^5 a	1,500 ppm	2.4×10^6 a	15,000 ppm	4.0×10^6 a	15,000 ppm	4.2×10^6 a
100 ppm	7.8×10^5 a	2,500 ppm	2.2×10^6 a	20,000 ppm	3.0×10^6 a	20,000 ppm	3.0×10^6 a
250 ppm	4.9×10^5 a	3,500 ppm	9.8×10^5 a	30,000 ppm	2.2×10^6 a	30,000 ppm	2.3×10^6 a
TA	5.1×10^6	TA	5.1×10^6	TA	5.1×10^6	TA	5.1×10^6

Conc. = concentración, TA = testigo absoluto.

*Letras distintas indican diferencias significativas ($P < 0.05$) entre concentraciones de extractos (columnas).**Cuadro 8. Comparación de número de esporas/mL de *F. verticillioides* ante los diferentes tratamientos.**

<i>F. verticillioides</i>							
Conc.	Mostaza	Conc.	Gober.	Conc.	Canela	Conc.	Cítricos
10 ppm	2.0×10^6 a*	700 ppm	4.6×10^6 a	10,000 ppm	4.9×10^6 a	10,000 ppm	5.1×10^6 a
50 ppm	1.9×10^6 a	1,500 ppm	4.4×10^6 a	15,000 ppm	3.4×10^6 ab	15,000 ppm	4.2×10^6 a
100 ppm	1.7×10^6 a	2,500 ppm	1.6×10^6 a	20,000 ppm	2.2×10^6 b	20,000 ppm	4.0×10^6 a
250 ppm	1.4×10^6 a	3,500 ppm	9.6×10^5 a	30,000 ppm	1.7×10^6 b	30,000 ppm	2.0×10^6 b
TA	5.5×10^6	TA	5.5×10^6	TA	5.5×10^6	TA	5.5×10^6

Conc. = concentración, TA = testigo absoluto.

*Letras distintas indican diferencias significativas ($P < 0.05$) entre concentraciones de extractos (columnas).**Cuadro 9. Comparación de número de esporas/mL de *F. chlamydosporum* ante los diferentes tratamientos.**

<i>F. chlamydosporum</i>							
Conc.	Mostaza	Conc.	Gober.	Conc.	Canela	Conc.	Cítricos
10 ppm	1.3×10^6 a*	700 ppm	1.4×10^6 a	10,000 ppm	1.6×10^6 a	10,000 ppm	2.1×10^6 a
50 ppm	1.1×10^6 a	1,500 ppm	1.2×10^6 a	15,000 ppm	1.0×10^6 b	15,000 ppm	1.4×10^6 a
100 ppm	9.5×10^5 a	2,500 ppm	7.6×10^5 ab	20,000 ppm	8.7×10^5 bc	20,000 ppm	7.6×10^5 a
250 ppm	3.4×10^5 a	3,500 ppm	4.8×10^5 b	30,000 ppm	5.0×10^5 c	30,000 ppm	6.3×10^5 b
TA	2.9×10^6	TA	2.9×10^6	TA	2.9×10^6	TA	2.9×10^6

Conc. = concentración, TA = testigo absoluto.

*Letras distintas indican diferencias significativas ($P < 0.05$) entre concentraciones de extractos (columnas).

destaca que tanto el tipo de solvente empleado como la concentración de compuestos específicos como ácido gálico, ácido tánico y galotaninos son factores determinantes en la eficacia del extracto, ya que estos componentes son responsables de disminuir la producción de esporas en *F. graminearum*.

Por su parte, Holguín-Peña et al. (2021) determinaron que el extracto de gobernadora reduce la esporulación de *F. oxysporum* hasta en 81 %, atribuyendo dicha actividad al solvente con el que se elaboró el extracto y a compuestos bioactivos como eugenol, carvacrol, timol y P-cymeno, que afectarían, dependiendo de su concentración, en mayor o menor medida a la esporulación de las especies del género *Fusarium*, así como otros géneros fúngicos, por ejemplo, *Aspergillus*

spp., *Penicillium* spp. y *Rhizoctonia* spp. (Rodríguez-Guadarrama et al., 2018).

Respecto al extracto de canela, Carmello et al. (2022) confirmaron su efectividad en reducción de esporas sobre *F. oxysporum* y *Alternaria alternata*, atribuyendo este resultado al cinamaldehído, principal componente del extracto y cuyo efecto sobre la esporulación estaría relacionado al tipo de solvente y concentración empleada en cada especie de hongo (Zhou et al., 2024).

Finalmente, la respuesta en la esporulación de los fitopatógenos ante el extracto de cítricos puede verse influida por la variabilidad en el contenido de compuestos, dependiendo de la parte vegetal utilizada; principalmente, los flavonoides y los ácidos fenólicos

presentes en el extracto tendrían un efecto directo sobre la estructura celular del hongo, lo que repercute en la esporulación, que varía según la especie evaluada (Hernández et al., 2021).

CONCLUSIONES

Esta investigación confirma que el uso de extractos naturales como mostaza y gobernadora son alternativas naturales altamente efectivas para combatir al hongo del género *Fusarium* en el maíz forrajero. El extracto de mostaza destacó, ya que con dosis mínimas (250 ppm) logró frenar casi por completo el crecimiento micelial en un 90 %, además de obtener la mayor inhibición de producción de esporas. Por su parte el extracto de gobernadora fue eficaz contra *F. chlamydosporum*, eliminándola prácticamente en su totalidad. La importancia de estos resultados es que permiten sustituir los químicos tóxicos por opciones naturales que no dejan residuos, protegiendo así la economía del agricultor y la salud del ganado. Al usar extractos botánicos, se asegura un alimento de mayor calidad para los animales y se reduce el riesgo de enfermedades provocadas por las toxinas que estos hongos producen.

AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación por el apoyo para la realización de la estancia postdoctoral de Jazmín Janeth Velázquez Guerrero.

LITERATURA CITADA

- Bamidele, M. O., Álvarez Pérez, O. B., Sandoval-Cortes, J., Flores-López, M. L., Chavez-González, M. L., & Aguilar, C. N. (2024). *Polyphenolic bioactive compounds from Larrea tridentata* (DC.) Coville: Extraction, characterization, antioxidant, and antifungal activities. *Research Square*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4370220/v1>
- Bautista Zúñiga, F., Delfín González, H., Palacio Prieto, J. L., & Delgado Carranza, M. del C. (2004). *Técnicas de muestreo para manejadores de recursos naturales*. Universidad Nacional Autónoma de México; Universidad Autónoma de Yucatán; Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología; Instituto Nacional de Ecología.
- Barnett, H. L., & Hunter, B. B. (1998). *Illustrated genera of imperfect fungi*. APS Press.
- Carmello, C. R., Magri, M. M. R., & Cardoso, J. C. (2022). Cinnamon extract and sodium hypochlorite in the *in vitro* control of *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* and *Alternaria alternata* from tomato. *Journal of Phytopathology*, 170(11-12), 802-810. <https://doi.org/10.1111/jph.13143>
- Castro, J. C., Pante, G. C., Centenaro, B. M., De Almeida, R. T. R., Pilau, E. J., Dias Filho, B. P., Mossini, S. A. G., De Abreu Filho, B. A., Mاتيoli, G., & Machinski Junior, M. (2020). Antifungal and antimycotoxigenic effects of *Zingiber officinale*, *Cinnamomum zeylanicum* and *Cymbopogon martinii* essential oils against *Fusarium verticillioides*. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 37(9), 1531-1541. <https://doi.org/10.1080/19440049.2020.1778183>
- Cerna-Chávez, E., Malacara-Herrera, I. del R., Ochoa-Fuentes, Y. M., & Hernández-Juárez, A. (2023). Evaluación *in vitro* de extractos vegetales adicionados con nanopartículas para el control de *Fusarium oxysporum*. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 10(2), e3424. <https://doi.org/10.19136/era.a10n2.3424>
- Dinolfo, M. I., Martínez, M., Castañares, E., & Arata, A. F. (2022). *Fusarium* in maize during harvest and storage: a review of species involved, mycotoxins, and management strategies to reduce contamination. *European Journal of Plant Pathology*, 164, 151-166. <https://doi.org/10.1007/s10658-022-02548-0>
- Drakopoulos, D., Luz, C., Torrijos, R., Meca, G., Weber, P., Bänziger, I., Voegelé, R. T., Six, J., & Vogelgsang, S. (2019). Use of botanicals to suppress different stages of the life cycle of *Fusarium graminearum*. *Phytopathology*, 109(12), 2116-2123. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-06-19-0205-R>
- Drakopoulos, D., Meca, G., Torrijos, R., Marty, A., Kägi, A., Jenny, E., Forrer, H.-R., Six, J., & Vogelgsang, S. (2020). Control of *Fusarium graminearum* in wheat with mustard-based botanicals: From *in vitro* to in planta. *Frontiers in microbiology*, 11, 1595. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01595>
- Elgat, W. A. A. A., Kordy, A. M., Böhm, M., Černý, R., Abdel-Megeed, A., & Salem, M. Z. M. (2020). *Eucalyptus camaldulensis*, *Citrus aurantium*, and *Citrus sinensis* essential oils as antifungal activity against *Aspergillus flavus*, *Aspergillus niger*, *Aspergillus terreus*, and *Fusarium culmorum*. *Processes*, 8(8), 1003. <https://doi.org/10.3390/pr8081003>

- Gwad, M. M. A., El-Sayed, A. S.A., Abdel-Fattah, G. M., Abdelmoteleb, M., & Abdel-Fattah, G. G. (2024). Potential fungicidal and antiaflatoxicogenic effects of cinnamon essential oils on *Aspergillus flavus* inhabiting the stored wheat grains. *BMC Plant Biology*, 24(1), 394. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05065-w>
- Habschied, K., Krstanović, V., Zdunić, Z., Babić, J., Mastanjević, K., & Šarić, G. K. (2021). Mycotoxins bio-control methods for healthier crops and stored products. *Journal of Fungi*, 7(5), 348. <https://doi.org/10.3390/jof7050348>
- Hernández, A., Ruiz-Moyano, S., Galván, A. I., Merchán, A. V., Pérez Nevado, F., Aranda, E., Serradilla, M. J., de Guía Córdoba, M., & Martín, A. (2021). Anti-fungal activity of phenolic sweet orange peel extract for controlling fungi responsible for post-harvest fruit decay. *Fungal Biology*, 125(2), 143-152. <https://doi.org/10.1016/j.funbio.2020.05.005>
- Holguín-Peña, R. J., Medina-Hernández, D., Vázquez-Islas, G., Nieto-Navarro, F., & Rueda Puente, E. O. (2021). Anti-infective properties of medicinal plants from the Baja California peninsula, Mexico for the treatment of *Fusarium oxysporum* f. sp. *basilici* in organic sweet basil (*Ocimum basilicum*). *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias UNCuyo*, 53(1), 234-244. <https://doi.org/10.48162/rev.39.022>
- Kochiieru, Y., Mankevičienė, A., Cesevičienė, J., Semaškienė, R., Ramanauskienė, J., Gorash, A., Janavičienė, S., & Venslovas, E. (2021). The impact of harvesting time on *Fusarium* mycotoxins in spring wheat grain and their interaction with grain quality. *Agronomy*, 11(4), 642. <https://doi.org/10.3390/agronomy11040642>
- Kulazhanov, T., Uazhanova, R., Baybolova, L., Yerzhigitov, Y., Kemberbekova, A., Tyutebayeva, K., Izembayeva, A., & Zhengiskyzy, S. (2024). Ensuring quality and safety in the production and storage of grain crops. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 22(5), 1279-1284. <https://doi.org/10.22124/cjes.2024.8343>
- Kursa, W., Jamiółkowska, A., Wyrostek, J. & Kowalski, R. (2022). Antifungal effect of plant extracts on the growth of the cereal pathogen *Fusarium* spp. - An *in vitro* study. *Agronomy*, 12(12), 3204. <https://doi.org/10.3390/agronomy12123204>
- Leslie, J. F., & Summerell, B. A. (2006). *The Fusarium laboratory manual*. Blackwell Publishing.
- Maidana Ojeda, M., Acosta Ramos, M., Cabrera, M. G., Quintana Viedma, L., Enciso Maldonado, G., & Mongelós Franco, Y. (2022). Evaluación *in vitro* de inhibidores contra hongos micotoxigénicos del maíz. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 6(2), 3289-3302. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i2.2088
- Mangoba, M. A. A., & Alvindia, D. de G. (2025). Promising antifungal effects of *Citrus maxima* peel for the control of banana fruit rot. *European Journal of Plant Pathology*, 714, 367-376. <https://doi.org/10.1007/s10658-025-03135-9>
- Martinko, K., & Mioč, E. (2024). Antifungal effect of cinnamon bark extract on the phytopathogenic fungus *Fusarium sporotrichioides*. *Food Technology and Biotechnology*, 62(4), 458-464. <https://doi.org/10.17113/ftb.62.04.24.8448>
- Mesterhazy, A. (2024). What Is *Fusarium* head blight (FHB) resistance and what are its food safety risks in wheat? Problems and solutions - A review. *Toxins*, 16(1), 31. <https://doi.org/10.3390/toxins16010031>
- Morales-Ubaldo, A. L., Rivero-Perez, N., Valladares-Carranza, B., Madariaga-Navarrete, A., Higuera-Piedrahita, R. I., Delgadillo-Ruiz, Bañuelos-Valenzuela, R., L. & Zaragoza-Bastida, A. (2022). Phytochemical compounds and pharmacological properties of *Larrea tridentata*. *Molecules*, 27(17), 5393. <https://doi.org/10.3390/molecules27175393>
- Mshari, A., Alrudainy, A. M., & Abu-Mejdad, N. M. J. A. (2022). Study the effect of some citrus peel extracts against plant pathogenic fungi. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*, 19(6), 103-110. <https://doi.org/10.3233/AJW220094>
- Preciado-Ortiz, R. E., & Vázquez-Carrillo, M., G. (2022). Generación de maíces especializados para mejorar la salud y nutrición en México. *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías*, 14(1), 2489. <https://doi.org/10.18272/aci.v14i1.2489>
- Pizzo, F., Caloni, F., Schreiber, N. B., Cortinovis, C., & Spicer, L. J. (2016). *In vitro* effects of deoxynivalenol and zearalenone major metabolites alone and combined, on cell proliferation, steroid production and gene expression in bovine small-follicle granulosa cells. *Toxicon*, 109, 70-83. <https://doi.org/10.1016/j.toxicon.2015.11.018>
- Ramírez-Mejía, J. M., Aguilera-Galvez, C., Kema, G. H. J., Valencia-Riascos, L. M., Zapata-Henao, S., Gómez, L. A., & Villegas-Escobar, V. (2024). Combining cyclic lipopeptides and cinnamon extract enhance antifungal activity against *Fusarium oxysporum* strains pathogenic to banana and delay *Fusarium* wilt under greenhouse

- conditions. *Tropical Plant Pathology*, 49, 838-849. <https://doi.org/10.1007/s40858-024-00677-x>
- Rodríguez-Guadarrama, A. H., Guevara-González, R. G., de Jesús, R. G. S., & Feregrino-Pérez, A. A. (2018). Antifungal activity of Mexican endemic plants on agricultural phytopathogens: a review. *xiv International Engineering Congress*. Querétaro, México.
- Serrano-Coll, H. A., & Cardona-Castro, N. (2015). Micotoxicosis y micotoxinas: generalidades y aspectos básicos. *CES Medicina*, 29(1), 143-151.
- Sistema de Información Agroalimentario y Pesquero. (2024). *Panorama agroalimentario. La ruta de la transformación agroalimentaria (2018-2024)*. SIAP. <https://online.pubhtml5.com/rsarc/ywrn/>
- Torrijos, R., Nazareth, T. de M., Vila-Donat, P., Mañes, J., & Meca, G. (2022). Use of mustard extracts fermented by lactic acid bacteria to mitigate the production of fumonisin B1 and B2 by *Fusarium verticillioides* in corn Ears. *Toxins*, 14(2), 80. <https://doi.org/10.3390/toxins14020080>
- United States Department of Agriculture. (s. f.). *Production - Grains Summary*. <https://www.fas.usda.gov/data/production/commodity-group/grains>
- Viljoen, J. J. F., Truter, M., & Kritzing, Q. (2025). Mycoflora and mycotoxins associated with stored cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp) seeds from smallholder farmers in South Africa. *Phytoparasitica*, 53, 44. <https://doi.org/10.1007/s12600-025-01267-6>
- Wigmann, É. F., Behr, J., Vogel, R. F., & Niessen, L. (2019). MALDI-TOF MS fingerprinting for identification and differentiation of species within the *Fusarium fujikuroi* species complex. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 103, 5323-5337. <https://doi.org/10.1007/s00253-019-09794-z>
- Zhou, L.-R., Hu, H.-J., Wang, J., Zhu, Y.-X., Zhu, X.-D., Ma, J.-W., & Liu, Y.-Q. (2024). Cinnamaldehyde acts as a fungistat by disrupting the integrity of *Fusarium oxysporum* Fox-1 cell membranes. *Horticulturae*, 10(1), 48. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10010048>