

Inhibidores de hongos micotoxigénicos en granos de maíz almacenados bajo diferentes niveles de humedad y períodos de tiempo

Inhibitors of mycotoxigenic fungi in corn grains stored under different humidity levels and time periods

Marco Maidana-Ojeda¹, Lidia Quintana-Viedma², Daniela Inés Haupenthal³, Gerónimo Arámbula-Villa⁴, Guillermo Andrés Enciso-Maldonado³ y Yerutí Mongelós-Franco^{5*}

¹ Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Texcoco, México.

² Universidad Nacional de Itapúa. Encarnación, Paraguay.

³ Universidad Católica "Nuestra Señora de la Asunción" Unidad Pedagógica Hohenau, Paraguay.

⁴ Centro de Investigación y de Estudios Avanzados, Instituto Politécnico Nacional. Santiago de Querétaro, México.

⁵ Centro de Desarrollo e Innovación Tecnológica. Hohenau, Paraguay.

*Autor para correspondencia:

yeruti91@gmail.com

Conflictos de interés:

No existe ningún tipo de conflicto a declarar.

Contribución de autores:

M.M.O. realizó los experimentos y participó en la redacción—revisión y edición del manuscrito; L.Q.V., D.I.H. y G.A.V. asesoraron la metodología de trabajo y el diseño experimental (supervisión); G.A.E.M. redactó el borrador original; Y.M.F. efectuó el análisis estadístico y colaboró en la redacción—revisión y edición. Todos los autores leyeron y aprobaron la versión final del manuscrito.

Financiamiento:

Ninguno

Historial:

Recibido: 09-01-2025;

Aceptado: 30-09-2025;

Publicado: 12-12-2025.

Disponibilidad de datos: Todo el conjunto de datos que apoya los resultados de este estudio se encuentra publicado y de acceso abierto en Figshare: DOI 10.6084/m9.figshare.30265084.

Editor responsable:

Arnaldo Esquivel Fariña
Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ciencias Agrarias. San Lorenzo, Paraguay.

Licencia:

Artículo publicado en acceso abierto bajo una licencia Creative Commons CC-BY 4.0

RESUMEN

La producción de maíz se ve comprometida por hongos micotoxigénicos como *Fusarium*, *Aspergillus* y *Penicillium*, que reducen el rendimiento y la calidad desde el campo hasta la comercialización, causando riesgos gastrointestinales y carcinogénicos en humanos y animales. El objetivo de este trabajo fue evaluar la eficacia de cuatro inhibidores fúngicos en granos de maíz almacenados bajo diferentes condiciones de humedad y tiempo. Se evaluaron extracto de *Larrea tridentata* (10 mL L⁻¹), azadiractina (20 mL L⁻¹), fosforo de aluminio (3 mg L⁻¹) y mezcla de ácidos orgánicos (ascórbico 1%, cítrico 0,25%, láctico 0,25%) contra *A. flavus*, *A. fumigatus* y *F. verticillioides* en granos almacenados a 12, 15 y 18% de humedad durante 120 días. Se utilizó un diseño factorial (tres hongos × tres humedades × cinco tratamientos) en arreglo completamente al azar. Los inhibidores mostraron residualidad menor a diez días. En cámara húmeda, la incidencia fúngica aumentó de 8–19% a diez días de incubación hasta superar 96% a treinta días. Tras noventa días de almacenamiento, *A. flavus* presentó la menor incidencia (9,5%) en granos con 12% de humedad, mientras que *A. fumigatus* y *F. verticillioides* alcanzaron 42,0% y 15,0%, respectivamente. Las aflatoxinas se detectaron únicamente en granos con 18% de humedad, alcanzando concentraciones máximas de 6,5 mg kg⁻¹ (*A. flavus*) y 11,0 mg kg⁻¹ (*A. fumigatus*). Los resultados subrayan la necesidad de mantener la humedad por debajo del 12% y aplicar inhibidores fúngicos tempranos para prevenir la producción de micotoxinas durante el almacenamiento del maíz.

Palabras clave: aflatoxinas, *Aspergillus*, *Fusarium*, micotoxinas.

ABSTRACT

Corn production is compromised by mycotoxigenic fungi such as *Fusarium*, *Aspergillus*, and *Penicillium*, which reduce yield and quality from field to commercialization, causing gastrointestinal and carcinogenic risks in humans and animals. The objective of this work was to evaluate the efficacy of four fungal inhibitors in corn grains stored under different humidity and time conditions. *Larrea tridentata* extract (10 mL L⁻¹), azadirachtin (20 mL L⁻¹), aluminum phosphide (3 mg L⁻¹), and organic acid mixture (ascorbic 1%, citric 0.25%, lactic 0.25%) were evaluated against *Aspergillus flavus*, *Aspergillus fumigatus*, and *Fusarium verticillioides* in grains stored at 12, 15, and 18% humidity for 120 days. A factorial design (three fungi × three humidities × five treatments) in a completely randomized arrangement was used. The inhibitors showed residual activity of less than ten days. In humid chamber, fungal incidence increased from 8–19% at ten days of incubation to over 96% at thirty days. After ninety days of storage, *A. flavus* showed the lowest incidence (9.5%) in grains with 12% humidity, while *A. fumigatus* and *F. verticillioides* reached 42.0% and 15.0%, respectively. Aflatoxins were detected only in grains with 18% humidity, reaching maximum concentrations of 6.5 mg kg⁻¹ (*A. flavus*) and 11.0 mg kg⁻¹ (*A. fumigatus*). The results underscore the need to maintain humidity below 12% and apply early fungal inhibitors to prevent mycotoxin production during corn storage.

Keywords: aflatoxins, *Aspergillus*, *Fusarium*, mycotoxins.

INTRODUCCIÓN

México es el sexto mayor productor de maíz a nivel mundial, con una producción de 27 millones de toneladas en 2022 (OECD/FAO, 2023), y constituye un pilar de la economía rural con cerca de tres millones de productores dedicados a su cultivo (Zuki-Orozco, Batres-Esquivel, Ortiz-Pérez, Juárez-Flores y Díaz-Barriga, 2018). Sin embargo, la colonización por hongos micotoxigénicos (*Fusarium*, *Aspergillus*, *Penicillium*) reduce significativamente el rendimiento y la calidad de los granos, provocando pudriciones de mazorca y deterioro de semilla (Glenn, 2007).

Estos hongos sintetizan micotoxinas, como aflatoxinas, fumonisinas y ocratoxinas, que pueden causar trastornos gastrointestinales, inmunosupresión y efectos carcinogénicos en humanos y animales (Liew y MohdRedzwan, 2018; Gong, Watson y Routledge, 2016). Diversas especies, especialmente del género *Aspergillus* y *Fusarium*, se han asociado con la síntesis de estas toxinas, que afectan la calidad e inocuidad del maíz y representan un serio desafío para la seguridad alimentaria mundial (Bryla et al., 2022; Chilaka, Obidiegwu, Chilaka, Atanda y Mally, 2021; Soares, Calado y Venancio, 2013).

En respuesta a estos riesgos, se han establecido regulaciones estrictas como el Reglamento (CE) N.º 1881/2006 que fija límites máximos de 2 µg kg⁻¹ para AFB₁ (aflatoxina B1) y 4 µg kg⁻¹ para aflatoxinas totales en cereales (European Commission, 2006), mientras que la NOM-187-SSA1/SCFI-2002 en México establece un máximo de 20 µg kg⁻¹ de AFB₁ en tortillas y derivados (Zuki-Orozco, Batres-Esquivel, Ortiz-Pérez, Juárez-Flores y Díaz-Barriga, 2018).

El crecimiento fúngico y la consecuente producción de micotoxinas están determinados por factores críticos como la humedad, la temperatura, el manejo poscosecha y el tiempo de almacenamiento (Magan y Aldred, 2007; Zain, 2011).

Tradicionalmente, el fosfuro de aluminio (AIP) ha sido ampliamente empleado por su eficacia, pero libera gas fosfina (PH₃) con una tasa de mortalidad superior al 50% en casos de exposición humana y animal, planteando graves riesgos toxicológicos y de manejo (Peña Pérez, Pérez Zaldivar y Serranio Oduardo, 2019; Yadav, Bhattacharyya y Banerjee, 2021). Ante esta problemática, en la última década han emergido estrategias más ecológicas para el control de hongos micotoxigénicos, como el uso de aceites esenciales y biopesticidas derivados de plantas, que son menos tóxicos, biodegradables y no generan residuos nocivos (Li, Qiao & Zhang, 2025; EFSA Panel on Plant Health (P.L.H.) et al., 2022; Nešić, Habschied y Mastanjević, 2021).

Entre las alternativas promisorias se encuentran los extractos etanólicos de *Coriandrum sativum*, *Mentha piperita* y *Trigonella foenum-graecum*, que mostraron inhibición significativa del crecimiento de *Aspergillus niger* y *Fusarium oxysporum* en ensayos *in vitro* (Prathibha, Vanekar y Banu, 2023). Los compuestos fenólicos de plantas medicinales han demostrado capacidad para alterar la membrana fúngica y reducir la viabilidad de

esporas de *Aspergillus fumigatus* (Zhou et al., 2023). La azadiractina, extraída del árbol de neem, se degrada completamente en menos de cien horas bajo condiciones de luz y agua, y muestra baja toxicidad hacia mamíferos (DL₅₀ > 3.540 mg kg⁻¹), convirtiéndola en una opción segura (Kilani-Morakchi, Morakchi-Goudjil y Sifi, 2021; Hassan, Sand, y El-Kadi et al., 2012). Por su parte, la mezcla de ácidos orgánicos reduce el pH superficial de los granos a valores próximos a cuatro, creando un entorno inhóspito para hongos micotoxigénicos sin dejar residuos nocivos (Alcalde, 2025; Hassan et al., 2012).

La eficacia de estos inhibidores depende de factores como la formulación, la residualidad y la compatibilidad con las condiciones de almacenamiento, aspectos que requieren evaluación específica bajo diferentes condiciones de humedad y tiempo (Magan y Olsen, 2004). Considerando la urgencia de encontrar alternativas seguras debido al aumento de la resistencia de *Fusarium* a fungicidas convencionales (Li, Qiao y Zhang, 2025), el objetivo de este trabajo fue evaluar la eficacia de cuatro inhibidores fúngicos en granos de maíz almacenados bajo distintos niveles de humedad y períodos de almacenamiento. La investigación se centró en la incidencia de los hongos micotoxigénicos *Fusarium verticillioides*, *Aspergillus flavus* y *A. fumigatus*, y la producción de aflatoxinas, con el fin de generar recomendaciones prácticas que contribuyan a garantizar la calidad e inocuidad de los granos de maíz destinados al consumo humano y animal.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización y periodo de investigación

Este estudio se llevó a cabo entre julio de 2014 y septiembre de 2015 en el Laboratorio de Fitopatología de la Universidad Autónoma de Chapingo, ubicado en Texcoco, Chapingo, Estado de México, y en el Laboratorio de Materiales Orgánicos del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, en Querétaro, Estado de Querétaro, México.

Diseño experimental

Se utilizó un diseño completamente al azar con un arreglo factorial 3 × 3 × 5 y tres repeticiones. Los factores incluyeron las especies de hongos *A. flavus*, *A. fumigatus* y *F. verticillioides*, las cuales fueron provistas por el Laboratorio de Fitopatología del Departamento de Protección Vegetal de la Universidad Autónoma de Chapingo; el segundo factor fue el contenido de humedad del grano: 12, 15 y 18%; y el tercero, los tratamientos fúngicos: extracto de *L. tridentata* (10 mL L⁻¹), azadiractina (20 mL L⁻¹), fosfuro de aluminio (3 mg L⁻¹), mezcla de ácidos (ascórbico 1%, cítrico 0,25% y láctico 0,25%) y un control sin aplicación de inhibidor.

Las unidades experimentales consistieron en botellas plásticas de 600 mL con 350 g de granos de maíz variedad Criolla, previamente desinfectados mediante un desinfectante orgánico de amplio espectro (Virkon®), a dosis de 0,5 g L⁻¹.

Inoculación de hongos e incorporación de inhibidores

La inoculación de *A. flavus*, *A. fumigatus* y *F. verticillioides* se realizó añadiendo tres mililitros de una suspensión de 500.000 conidios mL⁻¹ a cada unidad experimental. Veinticuatro horas después de esta inoculación, se aplicaron tres mililitros de cada tratamiento por unidad experimental. Posteriormente, las muestras se mantuvieron durante veinte horas a 4°C para favorecer la homogenización de la humedad.

El ajuste final de la humedad a 12, 15 y 18% se llevó a cabo mediante la fórmula descrita por Pixton y Griffith (1971), según la cual se determinó cuánta agua añadir en función de la masa de los granos y su humedad inicial (porcentaje en base húmeda). Se calculó la cantidad de agua necesaria para que la humedad final fuera la deseada, añadiendo cuidadosamente el volumen resultante y distribuyéndolo de manera homogénea mediante agitación manual, realizando movimientos circulares suaves durante aproximadamente dos minutos. Finalmente, las unidades experimentales se incubaron a 27°C (\pm 2°C), selladas con película de polietileno para evitar la pérdida de humedad.

Variables evaluadas

Se determinó la incidencia de hongos en cámara húmeda a los 10, 20 y treinta días después de la inoculación (DDI). Para ello se seleccionaron veinticinco granos de cada unidad experimental y se colocaron en cámara húmeda con cuatro repeticiones por tratamiento. La cámara húmeda consistió en recipientes plásticos herméticos de 15 × 10 × 5 cm, con una base de papel filtro humedecido con agua destilada estéril y una rejilla plástica para evitar el contacto directo de los granos con el agua. Las cámaras se mantuvieron a 25 \pm 2°C y humedad relativa cercana al 95%, condiciones que favorecen el desarrollo fúngico. Luego de siete días de incubación, se cuantificó el porcentaje de crecimiento fúngico.

Además, se determinó la incidencia de hongos en los granos almacenados a los 30, 60 y noventa DDI, tomando cien granos de cada unidad experimental. A los noventa días de almacenamiento, se evaluó la concentración de aflatoxinas (B1, B2, G1 y G2) de *A. flavus* y *A. fumigatus*. Se tomaron veinte gramos de granos, los cuales se molieron y pesaron, y luego se mezclaron con un solvente metanol:agua (1:1, v/v) para extraer las aflatoxinas. La suspensión se agitó mecánicamente en un agitador orbital (IKA® KS 130 basic, Alemania) a 150 rpm durante cinco minutos y posteriormente se filtró para eliminar partículas sólidas. El filtrado se pasó por una columna de inmunoafinidad con anticuerpos monoclonales específicos para aflatoxinas (Aflatest®, VICAM, Estados Unidos). La columna se lavó con agua destilada para eliminar impurezas y las aflatoxinas se eluyeron con 1,0 mL de metanol HPLC grado. El eluato se analizó mediante cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) en un equipo Agilent 1260 Infinity II (Agilent Technologies, Estados Unidos) equipado con detector de fluorescencia, empleando una columna C18 (4,6 × 150 mm, 5 μ m) y fase móvil agua:metanol (60:40, v/v) a un flujo de 1,0 mL min⁻¹.

Análisis de datos

Se realizó un análisis de varianza (ANAVA) y, cuando se detectaron diferencias significativas entre los tratamientos, se aplicó la prueba de comparación múltiple de medias de Tukey (α = 0,05). En los casos de interacción significativa entre factores, se procedió al desdoblamiento de la interacción para facilitar la interpretación de los resultados. El análisis estadístico se efectuó con el software SAS® versión 9.3.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Incidencia de hongos en cámara húmeda

El ANAVA indicó que la interacción entre los tres factores evaluados no fue significativa para la incidencia de hongos en los granos sometidos a cámara húmeda. Sin embargo, las interacciones dobles inhibidor × hongo (Tabla 1) y humedad × hongo (Tabla 2) fueron significativas, por lo que se procedió al desdoblamiento de las interacciones para una mejor interpretación de los resultados.

La evaluación en cámara húmeda evidenció que, durante los primeros diez días después de la inoculación (DDI), los inhibidores aplicados lograron reducir parcialmente la incidencia de hongos, particularmente en *A. flavus*, mientras que *A. fumigatus* y *F. verticillioides* mostraron una elevada capacidad de colonización incluso bajo tratamientos antifúngicos. Esto concuerda con lo reportado por Magan y Aldred (2007) y Bryła et al. (2022), quienes señalan que la velocidad de germinación y crecimiento de *Fusarium* y *Aspergillus* spp. depende tanto de la disponibilidad hídrica como de la tolerancia intrínseca de cada especie a compuestos inhibitorios.

En este estudio, la mezcla de ácidos orgánicos y el fosforo de aluminio mostraron los valores más bajos de incidencia en *A. flavus* a los diez DDI, pero sin diferencias significativas respecto al testigo a los veinte y treinta DDI. Esta pérdida de eficacia se asocia a la baja residualidad de los productos, que según Hassan et al. (2012) y Rivera-Escareño et al. (2025), puede ser inferior a diez días en condiciones favorables para el desarrollo fúngico. El rápido incremento de incidencia en las evaluaciones posteriores refleja que la cámara húmeda favorece un ambiente cercano a la saturación de humedad (cerca de 95 % HR), condición óptima para la esporulación de estos hongos (Milani, 2013; Suleiman, Rosentrater y Bern, 2013).

Asimismo, *A. flavus* presentó consistentemente menores valores de incidencia que las otras especies, lo que coincide con observaciones previas de Mureithi (2010), quien documentó que esta especie presenta un crecimiento más lento en grano entero que *A. fumigatus* o *F. verticillioides* bajo alta humedad. No obstante, su capacidad de producir aflatoxinas incluso a bajas tasas de colonización resalta la importancia de su control temprano (Gong et al., 2016).

Tabla 1. Incidencia (%) de hongos micotoxigénicos en granos de maíz tratados con inhibidores fúngicos, sometidos a cámara húmeda. Texcoco de Mora, Estado de México, México, 2015.

Inhibidores	Especies de hongos	Incidencia (%)*					
		10 DDI		20 DDI		30 DDI	
Ác. ascórbico 1 % + Ác. cítrico 0,25 % + Ác. láctico 0,25 %	<i>A. flavus</i>	5,4	a	29,3	a	91,1	a
	<i>A. fumigatus</i>	89,7	d	94,9	b	99,7	bc
	<i>F. verticillioides</i>	87,3	d	99,0	b	99,3	bc
Azadiractina 85 %	<i>A. flavus</i>	19,6	b	30,8	a	96,9	bc
	<i>A. fumigatus</i>	88,3	d	91,5	b	99,0	bc
	<i>F. verticillioides</i>	85,8	d	98,0	b	98,0	bc
Extracto de <i>L. tridentata</i> 95%	<i>A. flavus</i>	9,1	ab	32,6	a	97,0	bc
	<i>A. fumigatus</i>	89,3	d	97,0	b	99,0	bc
	<i>F. verticillioides</i>	90,8	d	96,2	b	99,7	bc
Fosfuro de aluminio	<i>A. flavus</i>	8,4	a	26,1	a	95,2	ab
	<i>A. fumigatus</i>	89,4	d	93,9	b	97,7	bc
	<i>F. verticillioides</i>	73,7	c	98,7	b	99,7	bc
Testigo (sin inhibidor)	<i>A. flavus</i>	16,0	ab	20,7	a	100,0	c
	<i>A. fumigatus</i>	89,7	d	98,3	b	98,0	bc
	<i>F. verticillioides</i>	92,8	d	99,3	b	99,3	bc
CV (%)**		14,0		14,4		3,4	

* Medias con una letra común no son significativamente diferentes por la prueba de Tukey ($p>0,05$).

**Coeficiente de variación de los datos, en porcentaje.

Tabla 2. Incidencia (%) de hongos micotoxigénicos en granos de maíz bajo diferentes contenidos de humedad (%), sometidos a cámara húmeda. Texcoco de Mora, Estado de México, México, 2015.

Humedad (%)	Especies de hongos	Incidencia (%)*					
		10 DDI		20 DDI		30 DDI	
12	<i>A. flavus</i>	11,0	a	36,9	b	96,1	ab
	<i>A. fumigatus</i>	86,0	c	94,5	c	99,0	bc
	<i>F. verticillioides</i>	70,7	b	96,1	c	98,4	abc
15	<i>A. flavus</i>	8,4	a	21,2	a	95,7	a
	<i>A. fumigatus</i>	89,7	cd	98,2	c	98,4	abc
	<i>F. verticillioides</i>	90,3	cd	98,6	c	99,2	bc
18	<i>A. flavus</i>	15,8	a	25,6	a	96,3	ab
	<i>A. fumigatus</i>	92,2	cd	92,7	c	98,6	abc
	<i>F. verticillioides</i>	97,3	d	100,0	c	100,0	c
CV (%)**		14,0		14,4		3,4	

* Medias con una letra común no son significativamente diferentes por la prueba de Tukey ($p>0,05$).

**Coeficiente de variación de los datos, en porcentaje.

En la interacción humedad x hongo (Tabla 2), se observó que el efecto del contenido de humedad en granos sobre la incidencia de *F. verticillioides* fue significativo, donde el valor de incidencia se redujo en un 7,2% cuando la humedad bajó de 18% a 15%, y en un 21,7% cuando la humedad bajó de 15% a 12% a los diez DDI. La incidencia de *A. flavus* y *A. fumigatus* no se redujo significativamente con la reducción de la humedad en granos.

A los veinte DDI, el ANAVA detectó que solamente la

interacción humedad x hongo fue significativa, por lo que no se observaron diferencias significativas entre los productos; aún se observaron diferencias significativas entre la interacción inhibidor x hongo, pero se debió a una mayor influencia del factor hongo. Esto se puede observar claramente en los grupos formados en la comparación múltiple de medias (Tabla 1), donde, para todos los inhibidores, *A. flavus* presentó los menores valores de incidencia comparado con las otras especies.

A los treinta DDI se evidenciaron resultados similares, pero con tendencias menos claras, debido a que todos los valores de incidencia registrados fueron iguales o cercanos al 100 %. Es importante recalcar que la residualidad de estos productos disminuye con el transcurso del tiempo. Cuando se analizó la interacción humedad x hongo, la tendencia fue similar a lo ocurrido con la interacción inhibidor x hongo. Las diferencias estadísticas observadas se debieron principalmente a los hongos inoculados, con valores de incidencia muy bajos en *A. flavus*, mientras que entre *A. fumigatus* y *F. verticillioides* no se presentaron diferencias significativas

En los primeros diez DDI hubo una mayor influencia de los inhibidores aplicados, lo que no se evidenció en las evaluaciones posteriores. Esto se debe a que, los productos limitan el crecimiento de los hongos, pero no eliminan el inóculo, por lo cual, al colocarse en cámara húmeda, el desarrollo micelial continúa y se puede detectar rápidamente. Las diferencias detectadas entre los hongos se deben a que, durante el almacenamiento, *A. flavus* presentó un crecimiento mucho más lento que *A. fumigatus* y *F. verticillioides*, tanto en medio de cultivo como durante su desarrollo en granos inoculados.

Estos resultados confirman que, aunque los inhibidores evaluados pueden retrasar el inicio del crecimiento, el control efectivo en condiciones de alta humedad requiere estrategias complementarias, como el secado rápido de granos, el uso de envases herméticos y la aplicación de inhibidores con mayor persistencia, en línea con las recomendaciones de Magan y Olsen (2004) y EFSA Panel on Plant Health et al. (2022).

Incidencia de hongos en almacenamiento

El ANAVA detectó diferencias estadísticas significativas entre los factores, en la interacción triple inhibidor x hongo x humedad, y en la interacción doble inhibidor x hongo. Considerando la interacción inhibidor x hongo, la mayor influencia se debió al factor hongo. Se registró el crecimiento más lento en *A. flavus* en almacenamiento, de modo similar a lo registrado en condiciones de cámara húmeda (Tabla 3). Los inhibidores aplicados no tuvieron efecto en el desarrollo de los hongos inoculados, inclusive, el efecto de éstos no arrojó diferencias con el testigo sin aplicación de inhibidor. Entre los hongos inoculados, la menor incidencia se observó en *A. flavus*, seguido de *A. fumigatus* y *F. verticillioides*, puesto que estos dos últimos presentaron promedios de incidencia estadísticamente similares (Figura 1a).

Además, no se observaron diferencias significativas en el crecimiento micelial a los treinta ni a los sesenta DDI; sin embargo, a los noventa DDI se detectaron diferencias significativas en el crecimiento y esporulación bajo todos los tratamientos (Tabla 3). Estudios recientes respaldan estos tiempos de latencia en condiciones similares, por ejemplo, Shi et al. (2023) reportaron cambios en la comunidad fúngica y producción de micotoxinas en maíz almacenado en rangos de temperatura de 20–30°C, confirmando el desarrollo tardío de *A. flavus* durante almacenamiento prolongado. Asimismo, Muga, Marenya y Workneh (2019) demostraron que la contaminación por aflatoxinas aumenta considerablemente cuando la humedad del grano supera el 18%, especialmente si se prolonga el almacenamiento, coherente con las observaciones de mayor incidencia y esporulación a los noventa DDI.

Tabla 3. Incidencia (%) de hongos micotoxigénicos en granos de maíz almacenados, tratados con inhibidores fúngicos bajo diferentes contenidos de humedad (%). Texcoco de Mora, Estado de México, México, 2015.

Inhibidor	Humedad (%)	Incidencia (%)* 90 DDI					
		<i>A. flavus</i>		<i>A. fumigatus</i>		<i>F. verticillioides</i>	
Extracto <i>L. tridentata</i> 95%	12	9,5	a	13,0	a	15,0	ab
	15	11,0	a	38,0	abcd	21,0	abc
	18	9,0	a	35,5	abcd	52,5	cd
Azadiractina 85%	12	19,5	abc	19,0	abc	13,5	a
	15	27,5	abcd	11,5	a	40,0	abcd
	18	39,0	abcd	43,5	abcd	49,0	bcd
Fosfuro de aluminio	12	11,0	a	12,0	a	11,5	a
	15	14,0	a	21,5	abc	24,0	abc
	18	29,5	abcd	31,0	abcd	25,0	abcd
Ác. asc. 1% + Ác. cit. 0,25% + Ác. lac. 0,25%	12	13,5	a	12,0	a	11,0	a
	15	13,0	a	18,0	abc	22,0	abc
	18	27,0	abcd	35,5	abcd	59,5	d
Testigo (sin aplicación)	12	10,5	a	10,0	a	14,0	a
	15	17,0	ab	24,0	abc	21,0	abc
	18	35,0	abcd	42,0	abcd	35,0	abcd
CV (%)**		34,6					

*Medias con una letra común no son significativamente diferentes por la prueba de Tukey (p>0,05).
**Coeficiente de variación de los datos, en porcentaje.

Aunque *A. flavus* presentó un crecimiento más lento, este hongo se puede desarrollar a partir de 13% de humedad, al igual que otras especies de *Aspergillus*, sin embargo, el contenido óptimo de humedad para su desarrollo es de 18% (Mureithi, 2010), mientras que las especies de *Fusarium* requieren niveles de humedad más altos. Según Birzele y Prange (2003), el desarrollo de especies de *Fusarium* en granos con contenido de humedad de 15% depende del tiempo de almacenamiento, pero se desarrolla rápidamente a partir de 18% de contenido de humedad.

Las diferencias estadísticas fueron altamente significativas entre los diferentes porcentajes de humedad de granos estudiados en almacenamiento (Figura 1b). Los promedios de incidencia descendieron a menores valores de contenido de humedad del grano, comprobando que éste es uno de los factores más importantes para el desarrollo de hongos en el almacenamiento (Milani, 2013; Suleiman et al., 2013).

Como en lo registrado en la interacción inhibidor x hongo, el efecto de los inhibidores no presenta una tendencia definida, sino que está influenciado fuertemente por otros factores, como la especie de hongo, la humedad o el tiempo de almacenamiento. En las evaluaciones realizadas en cámara húmeda, a partir de los veinte DDI, los inhibidores ya presentaron un comportamiento inestable.

Para lograr una inhibición efectiva de hongos en granos almacenados, estudios recientes han demostrado que el ácido acético es eficaz en concentraciones más bajas de lo reportado previamente. Por ejemplo, Haggag et al. (2024) mostraron que tanto el ácido acético como el tomillo tienen fuerte efecto bioactivo en fase de vapor y pueden inhibir notablemente la acumulación de aflatoxinas B1 y B2 producidas por *Aspergillus flavus*, con valores de EC_{50} para ácido acético de apenas $0.0013 \text{ mg mL}^{-1}$ en contacto volátil (aproximadamente $1,3 \text{ mg kg}^{-1}$). Adicionalmente, Sorathiya, Melo, Hogg y Pintado (2025) revisaron aplicaciones sostenibles de ácidos orgánicos en la conservación de alimentos y destacaron que el ácido acético puede contribuir a prolongar la vida útil y prevenir el deterioro fúngico en granos sin dejar residuos tóxicos.

En cuanto a los tratamientos evaluados, el extracto de *Larrea tridentata* mostró incidencias relativamente bajas

en *A. flavus* y *F. verticillioides* a 12% de humedad (Figura 2), lo que coincide con lo reportado por Rivera-Escareño et al. (2025), quienes documentan que sus compuestos fenólicos poseen acción antifúngica mediante la alteración de la membrana celular y la inhibición de enzimas clave del metabolismo fúngico. Sin embargo, su eficacia disminuyó con el incremento de la humedad y el tiempo de almacenamiento, lo que sugiere la necesidad de aplicaciones repetidas o formulaciones de liberación controlada.

La azadiractina, un limonoide extraído del neem (*Azadirachta indica*), presentó un comportamiento variable, aunque en algunos casos redujo la incidencia de *A. fumigatus* a 15% de humedad, su efecto fue limitado frente a humedades más altas. Esto concuerda con lo indicado por Kilani-Morakchi et al. (2021), quienes destacan que la azadiractina es foto- y termo-sensible, con rápida degradación en condiciones ambientales, lo que acorta su residualidad en almacenamiento.

La mezcla de ácidos (ascórbico, cítrico y láctico) evidenció un control inicial moderado, atribuible a la reducción del pH superficial del grano y a la perturbación de la homeostasis fúngica (Hassan et al., 2012). Sin embargo, su efectividad decayó conforme la humedad y el tiempo de exposición aumentaron, lo que concuerda con reportes de Alcalde (2025) sobre la necesidad de mantener condiciones de baja actividad de agua para potenciar la acción de los ácidos orgánicos.

Respecto al fosforo de aluminio, si bien es ampliamente utilizado en el manejo poscosecha por su eficacia contra plagas, su papel en el control de hongos es limitado y su uso está en declive debido a su alta toxicidad, riesgos de intoxicación aguda y restricciones regulatorias en varios países (Yadav et al., 2021; Saldivia-Tejeda, 2018). Además, ciertos hongos como *Aspergillus* spp. y *Penicillium* spp. pueden tolerar la fosfina o incluso solubilizar el fosforo, reduciendo su efectividad fungicida (Mendes et al., 2013; Rinu, Malviya, Sati, Tiwari y Pandey, 2013). La transición hacia alternativas más seguras, como aceites esenciales, extractos vegetales y ácidos orgánicos, responde tanto a exigencias de inocuidad alimentaria como a la necesidad de reducir el impacto ambiental.

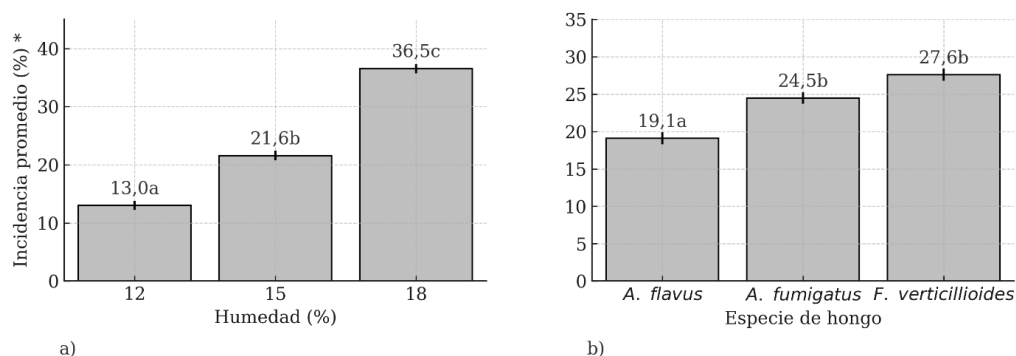


Figura 1. Incidencia promedio (%) de hongos micotoxigénicos en granos de maíz almacenados, según a) contenidos de humedad (%), y b) especie de hongo. Texcoco de Mora, Estado de México, México, 2015.

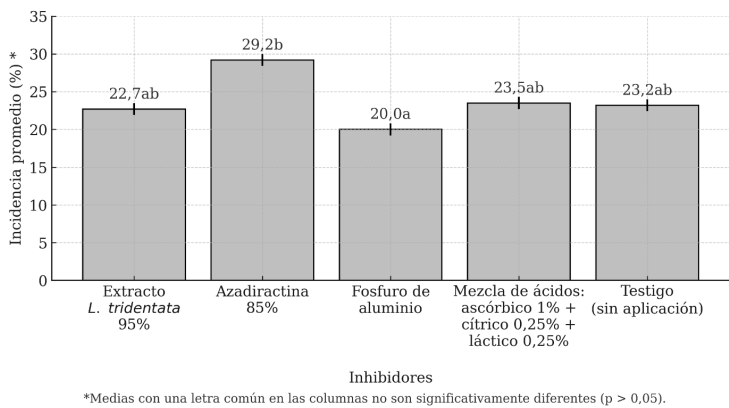


Figura 2. Incidencia promedio (%) de hongos micotoxigénicos en granos de maíz almacenados, según tratamiento con inhibidores fúngicos. Texcoco de Mora, Estado de México, México, 2015.

En conjunto, estos resultados sugieren que ninguna de las opciones evaluadas proporciona un control prolongado por sí sola en condiciones de humedad elevada y almacenamiento extendido (Figura 2). Esto refuerza la recomendación de integrar inhibidores con otras prácticas, como el secado rápido y el uso de sistemas herméticos, para maximizar la protección contra hongos micotoxigénicos y minimizar riesgos para la salud humana y el ambiente.

Concentración de aflatoxinas

En la Tabla 4 se presentan los resultados correspondientes a la acumulación de aflatoxinas en granos de maíz inoculados con *A. flavus* y *A. fumigatus* bajo diferentes contenidos de humedad de granos, tratados con inhibidores fúngicos y almacenados durante noventa DDI.

En la evaluación realizada a los noventa DDI, no hubo diferencias significativas en la incidencia de hongos según los inhibidores aplicados y en las interacciones inhibidor × hongo y humedad × hongo. Únicamente se observaron diferencias significativas entre los porcentajes de humedad de los granos durante el almacenamiento. Sin embargo, Ghorbanian, Razzaghi-Abyaneh, Allameh, Shams-Ghahfarokhi y Qorbani (2008) observaron que, aunque la reducción de crecimiento micelial del tratamiento con azadiractina 85% es escasa, sí reduce la producción de aflatoxinas por *Aspergillus parasiticus*.

Se puede observar que después de los noventa DDI, la producción de aflatoxinas se produjo únicamente en los granos con humedades de 18%, siendo solamente trazas las acumuladas en 15% de humedad, y no se encontraron

Tabla 4. Concentración de aflatoxinas (mg kg⁻¹) por *A. flavus* y *A. fumigatus* en granos de maíz almacenados, tratados con inhibidores fúngicos bajo diferentes contenidos de humedad (%). Texcoco de Mora, Estado de México, México, 2015.

Inhibidor	Humedad (%)	Concentración (mg kg ⁻¹)	
		<i>A. flavus</i>	<i>A. fumigatus</i>
Extracto <i>L. tridentata</i> 95%	12	0,0 a	0,0 a
	15	0,5 ab	0,0 a
	18	6,5 abc	4,0 abc
Azadiractina 85%	12	0,0 a	0,0 a
	15	0,0 a	0,0 a
	18	5,5 abc	6,5 abc
Fosfuro de aluminio	12	0,0 a	0,0 a
	15	1,0 ab	0,0 a
	18	5,0 abc	2,5 ab
Ác. asc. 1% + Ác. cit. 0,25% + Ác. lac. 0,25%	12	0,0 a	0,0 a
	15	0,0 a	0,0 a
	18	0,5 a	5,5 abc
Testigo (sin aplicación)	12	0,0 a	9,0 bc
	15	1,0 ab	9,0 bc
	18	2,5 ab	11,0 c
CV (%)**		82,0	

* Medias con una letra común no son significativamente diferentes por la prueba de Tukey (p>0,05).
**Coeficiente de variación de los datos, en porcentaje

micotoxinas cuando las humedades de almacenamiento fueron del 12%. El crecimiento micelial detectado fue bajo a los noventa DDI, evidenciando que hasta los sesenta DDI, el desarrollo fúngico fue escaso, y por lo tanto, también la producción de micotoxinas.

La observación de producción significativa de aflatoxinas únicamente en granos con 18% de humedad después de noventa DDI es coherente con estudios recientes que señalan la influencia crítica de la humedad y la temperatura en la síntesis de estas toxinas. Muga et al. (2019) reportaron que, aunque el contenido de humedad del grano por sí solo no fue significativo, la combinación de alta temperatura (30°C) y alta humedad relativa (90%) produjo niveles elevados de aflatoxinas en maíz, alcanzando hasta 11.179 mg kg⁻¹ (≈ 11 mg kg⁻¹) a 18% de humedad. Esto respalda los hallazgos obtenidos en este trabajo en contextos prolongados de almacenamiento. Asimismo, Villers (2014) destaca que, durante el almacenamiento poscosecha en ambientes cálidos y húmedos, la producción de aflatoxinas puede aumentar exponencialmente, siendo prácticamente inexistente cuando la humedad se mantiene por debajo del 12%. Los bajos niveles o ausencia de micotoxinas en condiciones del 12% reflejan precisamente esta barrera crítica.

Las causas probables de esta dinámica incluyen una mayor actividad del agua que facilita la germinación de *A. flavus* y promueve su metabolismo secundario (síntesis de toxinas), además de la posible liberación tardía de esporas o metabolitos fúngicos en condiciones de humedad persistente. En contraste, humedades más bajas retardaron significativamente el desarrollo micelial y la producción de toxinas. Además, el tiempo de almacenamiento es uno de los factores que también influye fuertemente en la interacción con los otros factores, como la humedad y la temperatura (Suleiman et al., 2013; Cassini et al., 2005), lo cual se puede reflejar en los resultados obtenidos en el presente estudio.

CONCLUSIONES

Los resultados confirman que el contenido de humedad es el principal factor que determina el desarrollo de hongos micotoxigénicos y la síntesis de aflatoxinas en maíz almacenado. Mantener la humedad en 12% permitió mantener una incidencia reducida de *A. flavus*, *A. fumigatus* y *F. verticillioides* y evitar la detección de aflatoxinas durante noventa días, mientras que al 18% se registró un incremento significativo de crecimiento micelial y producción de toxinas.

Los inhibidores evaluados, *Larrea tridentata*, azadiractina, fosforo de aluminio y mezcla de ácidos, presentaron eficacia inicial, pero su efecto se redujo con el tiempo, influenciado por la humedad y la duración del almacenamiento, sin diferencias significativas frente al testigo después de los primeros treinta días. Estos hallazgos subrayan la necesidad de explorar formulaciones más persistentes y estrategias combinadas de control, así como ampliar la evaluación a otros compuestos naturales y tecnologías de conservación, con el fin de optimizar la inocuidad del maíz durante el almacenamiento.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcalde, E. (2025). *Harnessing organic acids to combat moulds and preserve grain quality*. Feed & Additive Magazine. <https://www.feedandadditive.com/harnessing-organic-acids-to-combat-moulds-and-preserve-grain-quality/>
- Birzele, B., & Prange, A. (2003). *Fusarium* spp. and storage fungi in suboptimally stored wheat: mycotoxins and influence on wheat gluten proteins. *Mycotoxin Research*, 19 (2), 162–170. <https://doi.org/10.1007/BF02942958>
- Bryła, M., Pierzgański, A., Zapaśnik, A., Uwineza, P. A., Ksieniewicz-Woźniak, E., Modrzewska, M., & Waśkiewicz, A. (2022). Recent research on *Fusarium* mycotoxins in maize—A review. *Foods*, 11(21), 3465. <https://doi.org/10.3390/foods11213465>
- Cassini, C., Rodríguez, R., Bartosik, R., Peiretti, J., y Cabral, G. (2005). Post cosecha de trigo: secado y almacenaje. En D. Cassini y M. Bragachini (Eds.), *Trigo: eficiencia de cosecha y post cosecha*. Buenos Aires: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, 115 p.
- Chilaka, C. A., Obidiegwu, J. E., Chilaka, A. C., Atanda, O. O., & Mally, A. (2022). Mycotoxin regulatory status in Africa: A decade of weak institutional efforts. *Toxins*, 14(7), 442. <https://doi.org/10.3390/toxins14070442>
- EFSA Panel on Plant Health (P.L.H.), Bragard, C., Baptista, P., Chatzivassiliou, E., Di Serio, F., Gonthier, P., ... MacLeod, A. (2022). Pest categorisation of *Arboridia kakogawana*. *EFSA Journal*, 20(1), e07023. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2022.7023>
- European Commission. (2006). *Commission Regulation (EC) No 1881/2006 of 19 December 2006 setting maximum levels for certain contaminants in foodstuffs* (Consolidated version as of 28 July 2017). *Official Journal of the European Union*, L 364, 5–24. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02006R1881-20170728>
- Ghorbanian, M., Razzaghi-Abyaneh, M., Allameh, A., Shams-Ghahfarokhi, M., & Qorbani, M. (2008). Study on the effect of neem (*Azadirachta indica* A. Juss) leaf extract on the growth of *Aspergillus parasiticus* and production of aflatoxin by it at different incubation times. *Mycoses*, 51(1), 35–39. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0507.2007.01440.x>
- Glenn, A. E. (2007). Mycotoxigenic *Fusarium* species in animal feed. *Animal Feed Science and Technology*, 137(3-4), 213–240. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2007.06.003>
- Gong, Y. Y., Watson, S., & Routledge, M. N. (2016). Aflatoxin exposure and associated human health effects: A review of epidemiological studies. *Food Safety (Tokyo)*, 4(1), 14–27. <https://doi.org/10.14252/>

[foodsafetyfscj.2015026](https://doi.org/10.1007/s42976-024-00502-w)

- Haggag, W. M., Diab, M. M., Al-Ansary, N. A., Ibrahim, M. I., Khattab, A. E. N. A., Abdel-Wahhab, M. A., & Ali, M. K. (2024). Molecular identification and management of mycotoxigenic fungi in stored corn Grains. *Cereal Research Communications*, 52(4), 1631-1644. <https://doi.org/10.1007/s42976-024-00502-w>
- Hassan, R. A., Sand, M. I., & El-Kadi, S. M. (2012). Effect of some organic acids on fungal growth and their toxins production. *Journal of Agricultural Chemistry and Biotechnology*, 3(9), 391-397. <https://doi.org/10.21608/jacb.2012.55011>
- Kilani-Morakchi, S., Morakchi-Goudjil, H., & Sifi, K. (2021). Azadirachtin-based insecticide: Overview, risk assessments, and future directions. *Frontiers in Agronomy*, 3, 676208. <https://doi.org/10.3389/fagro.2021.676208>
- Li, H., Qiao, S., & Zhang, S. (2025). Essential oils in grain storage: A comprehensive review of insecticidal and antimicrobial constituents, mechanisms, and applications for grain security. *Journal of Stored Products Research*, 111, 102537. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2024.102537>
- Liew, W. P. P., & MohdRedzwan, S. (2018). Mycotoxin: Its impact on gut health and microbiota. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 8, 60. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2018.00060>
- Magan, N., & Aldred, D. (2007). Post-harvest control strategies: Minimizing mycotoxins in the food chain. *International Journal of Food Microbiology*, 119(1-2), 131-139. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2007.07.034>
- Magan, N., & Olsen, M. (Eds.). (2004). *Mycotoxins in food: Detection and control*. Cambridge, UK: Woodhead Publishing. https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9781855739086_A24188972/preview-9781855739086_A24188972.pdf
- Mendes, G. O., Vassilev, N. B., Bonduki, V. H. A., Da Silva, I. R., Ribeiro, J. I., & Costa, M. D. (2013). Inhibition of *Aspergillus niger* phosphate solubilization by fluoride released from rock phosphate. *Applied and Environmental Microbiology*, 79(16), 4906-4913. <https://doi.org/10.1128/AEM.01487-13>
- Milani, J. M. (2013). Ecological conditions affecting mycotoxin production in cereals: A review. *Veterinary Medicine*, 58(8), 405-411. <https://doi.org/10.17221/6979-VETMED>
- Muga, F. C., Marennya, M. O., & Workneh, T. S. (2019). Effect of temperature, relative humidity and moisture on aflatoxin contamination of stored maize kernels. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 25(2), 271-277. <https://www.agrojournal.org/25/02-07.pdf>
- Mureithi, B. K. (2010). *Effect of production practices, storage materials and moisture content on fungal and aflatoxin contamination of maize and maize products* (Tesis de maestría). Nairobi, KE: Faculty of Agriculture, University of Nairobi. <https://erepository.uonbi.ac.ke/handle/11295/25372>
- Nešić, K., Habschied, K., & Mastanjević, K. (2021). Possibilities for the biological control of mycotoxins in food and feed. *Toxins*, 13(3), 198. <https://doi.org/10.3390/toxins13030198>
- OECD/FAO (2023). *OECD-FAO Agricultural Outlook 2023-2032*. Paris: OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/08801ab7-en>
- Prathibha, K. Y., Vanekar, A., & Banu, M. (2023). Comparative analysis of antifungal activity of different plant extracts. *Journal of Medicinal Plants Studies*, 11(2), 16-20. <https://www.plantsjournal.com/archives/2023/vol11issue2/PartA/11-2-2-287.pdf>
- Peña Pérez, M., Pérez Zaldivar, J. C., y Serranio Oduardo, D. (2019). Manejo integrado de plagas de almacén en Jesús Menéndez. *Ojeando la Agenda* (60), 3. <https://ojeandolaagenda.com/2019/07/31/manejo-integrado-de-plagas-de-almacen-en-jesus-menendez/>
- Pixton, S. W., & Griffith, H. J. (1971). Diffusion of moisture through grain. *Journal of Stored Products Research*, 28(3), 221-235.
- Rinu, K., Malviya, M. K., Sati, P., Tiwari, S. C., & Pandey, A. (2013). Response of cold-tolerant *Aspergillus* spp. to solubilization of Fe and Al phosphate in presence of different nutritional sources. *Soil Science*, 13, 1-10. <https://doi.org/10.1155/2013/598541>
- Rivera-Escareño, D., Cadena-Iñiguez, J., García-Flores, D. A., Loera-Alvarado, G., Aguilar-Galaviz, L., & Ortega-Amaro, M. A. (2025). Microbicidal activity of extract *Larrea tridentata* (Sessé and Moc. ex DC.) Coville on *Pseudomonas syringae* Van Hall and *Botrytis cinerea* Pers. *Microorganisms*, 13(5), 1055. <https://doi.org/10.3390/microorganisms13051055>
- Saldivia-Tejeda, A. (2018). *La problemática del fosforo de aluminio como fumigante y las alternativas para el almacenamiento de grano en sistemas de autoconsumo*. CIMMYT – IDP. <https://idp.cimmyt.org/la-problematica-del-fosforo-de-aluminio-como-fumigante-y-las-alternativas-para-el-almacenamiento-de-grano-en-sistemas-de-autoconsumo/>
- Shi, H., Li, J., Zhao, Y., Mao, J., Wang, H., & Zhu, J. (2023). Effect of *Aspergillus flavus* contamination on the fungal community succession, mycotoxin production and storage quality of maize kernels at various temperatures. *Food Research International*, 174, 113662. <https://doi.org/10.1016/j.>

foodres.2023.113662

- Soares, C., Calado, T., & Venancio, A. (2013). Mycotoxin production by *Aspergillus niger* aggregate strains isolated from harvested maize in three Portuguese regions. *Revista Iberoamericana de Micología*, 30(1), 9–13. <https://doi.org/10.1016/j.riam.2012.05.002>
- Sorathiya, K. B., Melo, A., Hogg, M. C., & Pintado, M. (2025). Organic acids in food preservation: Exploring synergies, molecular insights, and sustainable applications. *Sustainability*, 17(8), 3434. <https://doi.org/10.3390/su17083434>
- Suleiman, R. A., Rosentrater, K. A., & Bern, C. J. (2013). Effects of deterioration parameters on storage of maize: A review. *Journal of Natural Sciences Research*, 3(9), 146–165. <https://doi.org/10.13031/aim.20131593351>
- Villers, P. (2014). Aflatoxins and safe storage. *Frontiers in microbiology*, 5, 158. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2014.00158>
- Yadav, D., Bhattacharyya, R., & Banerjee, D. (2021). Acute aluminum phosphide poisoning: The menace of phosphine exposure. *Clinica Chimica Acta*, 520, 34–42. <https://doi.org/10.1016/j.cca.2021.05.026>
- Zain, M. E. (2011). Impact of mycotoxins on humans and animals. *Journal of Saudi Chemical Society*, 15(2), 129–144. <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2010.06.006>
- Zhou, X., Zeng, M., Huang, F., Qin, G., Song, Z., & Liu, F. (2023). The potential role of plant secondary metabolites on antifungal and immunomodulatory effect. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 107, 4471–4492. doi:10.1007/s00253-023-12601-5.
- Zuki-Orozco, B. A., Batres-Esquivel, L. E., Ortiz-Pérez, M. D., Juárez-Flores, B. I., & Díaz-Barriga, F. (2018). Aflatoxins contamination in maize products from rural communities in San Luis Potosi, Mexico. *Annals of Global Health*, 84(2), 300–305. <https://doi.org/10.29024/aogh.918>