

Hongos micotoxigénicos asociados a insectos de productos almacenados

Mycotoxigenic fungi associated with stored-product insect pests

Saúl Enrique Uribe-Rivera¹ , Ernesto Cerna-Chávez¹ , Yisa María Ochoa-Fuentes¹ ,
Jazmín Janet Velázquez-Guerrero^{1*} 

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

*Autor para correspondencia: jazzguerrero@hotmail.com

Fecha de recepción:

24 de agosto de 2025

Fecha de aceptación:

6 de noviembre de 2025

Disponible en línea:

20 de diciembre de 2025

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)

RESUMEN

La asociación entre hongos micotoxigénicos e insectos plaga de granos almacenados genera elevadas pérdidas a la producción a nivel mundial, además de representar potenciales riesgos para la salud debido a la contaminación por micotoxinas o por restos de insectos. El objetivo fue revisar literatura que relaciona a los géneros *Sitophilus* spp., *Tribolium* spp. y a la especie *Rhyzopertha dominica* (Fabricius) con la presencia de hongos micotoxigénicos en productos almacenados. Los géneros de hongo más comunes fueron *Aspergillus* spp. y *Fusarium* spp., y en menor medida *Alternaria* spp.

PALABRAS CLAVE

Micotoxinas, *Sitophilus zeamais*, granos almacenados.

ABSTRACT

The association between mycotoxigenic fungi and storage-grain insect pests causes significant production losses worldwide and also poses potential health risks due to contamination by mycotoxins or insect fragments. The aim was to review the literature linking the genera *Sitophilus* spp., *Tribolium* spp., and the species *Rhyzopertha dominica* (Fabricius) with the presence of mycotoxigenic fungi in stored products. The most common fungal genera were *Aspergillus* spp. and *Fusarium* spp.; and to a lesser extent, *Alternaria* spp.

KEYWORDS

Mycotoxins, *Sitophilus zeamais*, stored grains.

INTRODUCCIÓN

Los granos almacenados representan una fuente importante de alimento para la población mundial por su aporte de nutrientes y los productos derivados que se pueden obtener (Okparavero et al., 2024).

Por tanto, es indispensable que los sistemas de protección poscosecha estén bien diseñados y cuenten con herramientas de control integrado, ya que los productos de almacén están sujetos a la infestación por insectos plaga (Ngoma et al., 2024 ; Ziegler et al., 2021). Esta situación causa deterioro de calidad y valor nutricional, así como pérdidas económicas estimadas de entre el 50 % al 70 % del total de la producción. Sin embargo, en los países desarrollados el promedio de pérdida es menor, aproximadamente 10 % de la producción total anual (Desta y Yeshitila, 2024; Mbata et al., 2024; Zhao et al., 2024).

Entre la diversidad de especies de insectos capaces de afectar granos almacenados sobresalen *Sitophilus zeamais* (Motschulsky) (Coleoptera: Curculionidae), *S. oryzae* L. (Coleoptera: Curculionidae) *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae), *T. confusum* (Jacquelin du Val) (Coleoptera: Tenebrionidae), y *Rhyzopertha dominica* (Fabricius) (Coleoptera: Bostrichidae). Estos poseen gran capacidad de adaptación a variadas condiciones tanto ambientales como de almacén, cuentan con amplia distribución y gran capacidad de dispersión (Seada y Hamza, 2023), características que les permiten localizar e infestar diferentes productos como granos y harinas, causando pérdidas considerables (Araújo et al., 2021; Djebbi et al., 2023; Mohsan et al., 2025).

Las plagas primarias, aquellas capaces de quebrar el grano, están representadas por *S. zeamais*, *S. oryzae* y *R. dominica*, mientras que *T. castaneum* y *T. confusum* se encuentran clasificados como plagas secundarias, pues se alimentan del grano previamente dañado por alguna plaga primaria (Muniswamy et al., 2023). Estas especies fueron seleccionadas para esta revisión debido a sus roles en granos almacenados: *Sitophilus* spp. se caracteriza por sus hábitos de perforación interna, lo que representa la pérdida de masa de grano. Por su parte *R. dominica* representa la perforación externa, causando daño desde la superficie. Finalmente, *Tribolium* spp., representa el proceso de reinfestación después del daño de plagas primarias (Athanassiou et al., 2017; De Souza et al., 2016; Duarte et al., 2021).

En este sentido, la presencia de alguna de estas especies puede estar relacionada con el desarrollo de algún agente microbiano, creando condiciones favorables para el desarrollo de agentes fúngicos micotoxigénicos (Al-Zaban et al., 2023). Esta categoría de hongos es denominada así dada su capacidad de producir metabolitos secundarios de carácter tóxico, propiamente llamados micotoxinas (Mafra y Christian, 2024). Por ejemplo, las producidas por el género *Aspergillus* spp., denominadas aflatoxinas, B1, B2, G1 y G2 (Fu et al., 2024) o bien aquellas del género *Fusarium* spp., como deoxynivalenol, zearalenona y toxinas como la HT-2 (Kochiieru et al., 2021). Además de estos dos géneros, es posible encontrar en granos almacenados a otros como *Penicillium* spp., *Alternaria* spp., *Rhizoctonia* spp. y *Rhizopus* spp. (Haggag et al., 2024).

La variedad de hongos micotoxigénicos que infestan productos almacenados ocasionan deterioro y pérdida de hasta el 80 % del grano, situación que los convierte en un riesgo potencial para la salud humana y animal (Matumba et al., 2021); pues estos metabolitos están asociados a efectos mutagénicos, carcinogénicos, nefrotóxicos y neurotóxicos (Awuchi et al., 2022; Pande et al., 2025).

Bajo estas condiciones es importante analizar los hongos asociados a la presencia de insectos plaga de granos, ya que pueden establecer interacciones mediante las cuales ambos agentes promueven y favorecen el desarrollo mutuo en los productos de almacén, por ejemplo, cuando las plagas insectiles actúan como acarreadores de los microorganismos fúngicos y contribuyen a su dispersión (Morrison III et al., 2025; Siteo et al., 2025). Asimismo, las plagas primarias como secundarias pueden responder a estímulos olfatorios derivada de la atracción generada por compuestos volátiles emitidos por los granos afectados debido a los hongos micotoxigénicos, o bien a compuestos producidos por dichos agentes que modifican el comportamiento y su movilidad en el producto, favoreciendo la contaminación y daño (Anukiruthika y Jayas, 2025).

Bajo este contexto los agentes plaga insectiles y fúngicos en granos almacenados articulan una serie de factores como etología, producción de compuestos volátiles, por parte de los agentes fúngicos y estímulos de respuesta a los mismos, que en conjunto favorecen el daño al producto (Cao et al., 2024); lo cual se manifiesta como reducción en el contenido de aminoácidos y proteína, cambio en la composición de carbohidratos y reducción de los lípidos en grano (Stathas et al., 2023).

Derivado de la información expuesta anteriormente, el objetivo de la presente revisión de bibliografía fue el compilado de la información que asocia la presencia de *Sitophilus* spp., *Tribolium* spp. y *R. dominica* con la proliferación, dispersión y desarrollo de hongos micotoxigénicos en productos almacenados.

MATERIALES Y MÉTODOS

La búsqueda de información se realizó en el periodo de mayo a junio de 2025, empleando bases de datos como Google Scholar, Wiley Library Online y Science Direct. La recopilación de la información se realizó de los años 2015 a 2025. Se seleccionaron estas bases de datos debido a una serie de atributos como accesibilidad, el proceso de la revisión por pares que garantiza la calidad de las publicaciones y la disponibilidad, en línea, de datos técnicos de las fuentes bibliográficas.

Para la búsqueda se emplearon las palabras clave: “stored grains pests + mycotoxins + fungi + *Sitophilus* + *Tribolium* + *Rhyzopertha* + vector”, en idioma inglés y español, sin embargo, es notable la predominancia de la información en el idioma inglés. Finalmente, los artículos fueron seleccionados con base en su antigüedad (máxima de 10 años atrás), y que relacionaran alguna de las tres especies con algún(os) género(s) fúngico(s). Una vez obtenidos los 81 artículos se realizó una selección de aquellos que correspondían con los criterios de insectos y hongos micotoxigénicos asociados en productos almacenados, para luego realizar el filtrado de

información correspondiente con los criterios establecidos para realizar la revisión.

La literatura excluida fue aquella que asociaba hongos micotoxigénicos a productos almacenados, pero sin incluir la especie de insecto correspondiente. Los artículos seleccionados fueron aquellos que mostraban presencia del insecto plaga, la del hongo y su probable relación en la dispersión o coinfección del producto de almacén.

La información se clasificó en tres categorías, *Sitophilus* spp. *Tribolium* spp. y *Rhyzopertha dominica*, correspondientes a las especies de insecto plaga y sus hongos asociados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La información fue clasificada en tres categorías, una por cada especie de insecto plaga. En la Figura 1 se presenta un resumen.

Sitophilus spp.

Sitophilus zeamais y *S. oryzae* cuentan con gran capacidad para penetrar el grano y realizar la infestación, ambas especies son consideradas plaga primaria y pueden presentarse en el almacenaje de granos, especialmente en maíz y arroz, respectivamente (Okpile et al., 2021; D'Isita et al., 2024). Pueden provocar pérdidas estimadas en el rango de 18 % a 50 % de la producción cuando no existen controles adecuados (Arya et al., 2025; Cortese et al., 2025; Quintero et al., 2025) (Cuadro 1).

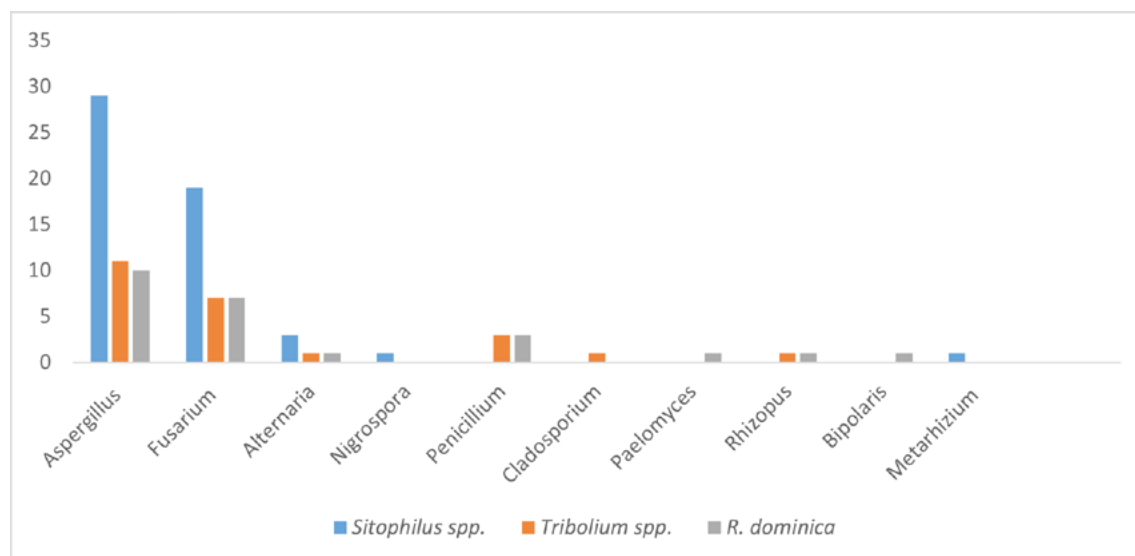


Figura 1. Número de artículos y géneros de hongo asociados a insectos plaga de granos almacenados.

Cuadro 1. Hongos asociados a *Sitophilus* spp. en productos almacenados.

Hongo asociado	Investigación	Referencia
<i>A. flavus</i> <i>A. parasiticus</i> <i>Fusarium</i> <i>verticilloides</i>	Muestreo de 10 sitios de almacenamiento de maíz, con infestaciones por <i>S. zeamais</i> (10.36 % al 47.47 %) y con detección de aflatoxinas, ocratoxinas, zearealenona, fumonisinas. Sin embargo, se identificó correlación negativa entre presencia de insecto y micotoxinas.	Pimentel et al. (2018)
<i>A. glaucus</i> <i>A. candidus</i>	Harina y pan de trigo infestados con <i>S. oryzae</i> . Se detectó infestación por estos hongos asociados a la presencia del insecto, determinando el papel de vector y favorecedor para la proliferación fúngica.	Zakladnoy (2018)
<i>Aspergillus</i> spp. <i>Fusarium</i> spp.	Granos de maíz infestados con <i>S. zeamais</i> ; se corroboró la presencia de aflatoxinas y fumonisinas que estarían relacionadas a la presencia de insectos adultos.	Danso et al. (2018)
<i>A. flavus</i>	Se reportó la importancia de la actividad biológica del adulto de <i>S. zeamais</i> sobre el hongo, aspecto necesario para la producción de micotoxinas, ya que, el insecto al desarrollar su ciclo actúa como vector y agente dispersante del hongo.	Riudavets et al. (2018)
<i>F. verticillioides</i>	La presencia de <i>S. zeamais</i> en granos de maíz inoculados con <i>F. verticillioides</i> incrementó el grado de infestación por parte del hongo, comparado con los granos inoculados solo con el hongo, de 75 % a 100 %.	Brito et al. (2019)
<i>Fusarium</i> spp. <i>Aspergillus</i> spp.	En granos de arroz (<i>Oryza sativa</i> L.) almacenados en silos comerciales se realizó muestreo y se detectó la presencia de la micotoxina deoxinvalenol, mientras que los insectos identificados corresponden a <i>S. oryzae</i> y <i>R. dominica</i> . Mismos que están asociados a la presencia de los hongos al contribuir a la diseminación.	Sánchez et al. (2019)
<i>A. flavus</i>	Se concluyó que en 5 variedades de maíz denominadas Arun-2, Arun-4, Manakamana-1, Manakamana-3 y Rampur, la infestación por el hongo fue mayor en presencia de <i>S. zeamais</i> (87.75 %) comparada con la mayor infestación de grano solo con <i>A. flavus</i> (62.16 %), concluyendo que la actividad del insecto es necesaria para la dispersión y proliferación del agente fúngico.	Bhusal y Khanal (2019)
<i>Alternaria</i> spp. <i>Nigrospora</i> <i>oryzae</i> <i>Fusarium</i> spp.	Al evaluar la eficacia de 3 métodos de almacenamiento de granos de arroz, en el tratamiento a 25 °C la infestación fue mayor debido a la presencia de <i>S. oryzae</i> aunado a la detección de los agentes fúngicos, concluyendo que esta temperatura favorece el desarrollo del insecto y del hongo.	Katta et al. (2019)
<i>F. verticillioides</i>	La exposición de adultos de <i>S. zeamais</i> a la fumonisina B del hongo, en granos de maíz almacenados, no tuvo efectos letales, se reportó al insecto como vector y un aumento en la progenie de los individuos tratados, sugiriendo un mecanismo de interacción entre el hongo y el insecto, ya sea por la estimulación para la oviposición o el acortamiento del ciclo de vida del insecto.	Usseglio et al. (2020)
<i>Aspergillus</i> spp.	Aplicación de miniambientes (herméticos) con distintas concentraciones de oxígeno para la preservación de granos de maíz (0 %, 5 %, 10 %, 15 % y 21 %). La concentración de 0 % fue la más eficaz al no haber presencia de <i>S. zeamais</i> , resaltando que las concentraciones de oxígeno bajas pueden inhibir al insecto, así como limitar la presencia de <i>Aspergillus</i> spp.	Van Duong et al. (2020)
<i>Fusarium</i> spp.	Almacenamiento de granos de maíz y arroz en bolsas porosas y bolsas a prueba de humedad. El 92 % de las muestras porosas mostraron daños por insecto y presencia de fumonisinas como B1, B2, B3 y ocratoxina.	Poudel et al. (2020)
<i>Fusarium</i> <i>graminearum</i> <i>F. langsethiae</i> <i>A. flavus</i> <i>F. verticillioides</i>	En granos de trigo y maíz contenidos en atmósferas controladas con N ₂ , se redujo el daño y la producción de aflatoxinas significativamente además al exponer el material a la atmósfera controlada. Se obtuvo mortalidad de 100 % para <i>S. oryzae</i> y <i>T. confusum</i> concluyendo que este tipo de almacenaje es eficaz para controlar agentes insectiles y fúngicos.	Lorenzo et al. (2020)

Cuadro 1. Hongos asociados a *Sitophilus* spp. en productos almacenados (continuación).

Hongo asociado	Investigación	Referencia
<i>A. flavus</i>	Cultivo en agar Czapeck de muestras de <i>Sitophilus</i> spp. con resultados positivos para el crecimiento del hongo. Verificando que actúa como vector de dicho agente.	Tada y De Nardi (2021)
<i>A. flavus</i>	La interacción entre <i>S. oryzae</i> y el hongo es mediada por compuestos volátiles emitidos por el grano afectado, cuya función es atraer al insecto desde largas distancias, mientras que los compuestos emitidos por el hongo tienen el efecto de atracción en rango corto, situación que propiciaría la infestación conjunta.	Ponce et al. (2022)
<i>A. flavus</i> <i>F. verticillioides</i>	En granos de trigo almacenado se inoculó a los hongos y se determinó que para <i>S. oryzae</i> ejercen una atracción de rango corto mientras que para <i>Lasioderma serricornis</i> ambos hongos ejercen atracción tanto de largo y corto alcance. Esto en comparación con granos sanos, donde hubo atracción menor para ambas especies. Denotando el papel de los químicos volátiles emitidos por los agentes fúngicos en el proceso de infestación.	Morrison et al. (2022)
<i>Aspergillus</i> spp.	Se establecieron 342 puntos de muestreo, si bien el 50% de los lugares contaban con medidas de higiene, el resto carecía de ellas. En dichos puntos fue posible identificar aflatoxinas y presencia de <i>S. zeamais</i> .	Makinya (2022)
<i>A. flavus</i>	Asociación entre la producción de micotoxinas y las larvas de <i>S. zeamais</i> que distribuyen el inóculo del hongo en el grano de maíz dañado. Convergiendo ambas especies en el proceso de coinfección de granos de maíz.	Sebayang et al. (2023)
<i>A. flavus</i> <i>A. niger</i>	En 60 muestras de granos de arroz y trigo se detectó la presencia de 16 especies de hongos. En los granos de arroz se encontró a <i>S. oryzae</i> , y en los de trigo, a <i>T. castaneum</i> . Se indicó que la interacción de este último con los hongos afectó germinación, peso y contenido de proteína en grano.	Kumar et al. (2023)
<i>Aspergillus</i> spp. <i>Alternaria</i> spp. <i>Metarhizium</i> spp.	Se colectaron adultos de <i>S. oryzae</i> y se analizó la variedad fúngica presente en la cutícula. Se identificaron 17 géneros, siendo 3 los principales. Se concluyó que el insecto actúa como vector.	Khan et al. (2023)
<i>Aspergillus</i> spp.	Se determinó que la presencia de <i>S. zeamais</i> en los granos de maíz aumenta la humedad y calor que, junto con los residuos, favorece el crecimiento y desarrollo fúngico.	Zhao et al. (2022)
<i>F. verticillioides</i> <i>A. niger</i> <i>A. flavus</i>	Aislamiento de <i>Hyphopichia burtonii</i> a partir de la cutícula de <i>S. zeamais</i> , con efecto inhibitorio sobre 3 especies de hongos, para los cuales esta especie de insecto actúa como vector. La inhibición fue de 50 % a 69 % para las 3 especies en medio PDA.	Seco et al. (2024)
<i>F. verticillioides</i> <i>Aspergillus</i> spp.	Muestreo de sistemas de almacenamiento de grano de maíz, se detectó a <i>Sitophilus zeamais</i> como vector de las especies de hongos al encontrarlas en su exoesqueleto.	Riungu et al. (2024).
<i>F. oxysporum</i> <i>A. flavus</i> <i>A. parasiticus</i> <i>A. niger</i>	En sorgo y maíz almacenados se detectó la presencia de <i>S. zeamais</i> , <i>T. castaneum</i> , <i>T. confusum</i> y <i>R. dominica</i> , junto con estas especies se identificó a los agentes fúngicos.	Beyene et al. (2024).
<i>F. verticillioides</i> <i>A. flavus</i> <i>A. parasiticus</i>	Al inocular bolsas que contenían 60 g de granos de maíz con las especies de hongos solas, hongos + individuos de <i>S. zeamais</i> , y solo insectos como control; se comprobó que el insecto actúa como vector y propicia coinfección.	Achimón et al. (2024)
<i>A. flavus</i>	En granos de maíz almacenados se estableció el papel de los insectos <i>Sitotroga cerealella</i> (Olivier), <i>S. zeamais</i> y <i>Oryzaephilus surinamensis</i> (L.) y su relación con <i>A. flavus</i> . Se concluyó que el agente fúngico desarrolla rápido en grano dañado cuando los insectos están presentes.	Parsons et al. (2025)

Cuadro 2. Hongos asociados a *Tribolium* spp. en productos almacenados.

Hongo asociado	Investigación	Referencia
<i>Aspergillus</i> spp.	Se analizaron 151 muestras de arroz y frijol, en todas se identificó a <i>T. castaneum</i> , además del género <i>Sitophilus</i> spp. Se les relacionó directamente con la infestación por parte de hongos micotoxigénicos pertenecientes al género <i>Aspergillus</i> spp., ya que actúan como vectores.	Paquete et al. (2015)
<i>A. flavus</i>	<i>T. confusum</i> como vector, contribuyendo a su diseminación.	Barra et al. (2015).
<i>Aspergillus</i> spp. <i>Cladosporium</i> spp. <i>Hyphopichia burtonii</i> <i>Penicillium</i> spp. <i>A. flavus</i> <i>Fusarium</i> spp.	Se analizaron los agentes fúngicos que causan pérdida postcosecha asociados a cutícula de individuos de <i>T. castaneum</i> ; se encontraron 23 géneros.	Yun et al. (2018)
<i>A. flavus</i> <i>Aspergillus niger</i> . <i>A. fumigatus</i> <i>Penicillium</i> spp. <i>Fusarium</i> spp. <i>Rhizopus oryzae</i>	Aislamiento a partir de individuos de <i>T. castaneum</i> de bacterias y hongos asociados a la producción de micotoxinas. Constituyéndose como vectores de los agentes fúngicos micotoxigénicos y fitopatógenos.	Kunhachan et al. (2019)

***Tribolium* spp.**

Tribolium castaneum, o el gorgojo castaño de la harina, es considerado un insecto plaga secundario de granos almacenados, al igual que *T. confusum* (Shah et al., 2021); su amplia colocación y sus hábitos polífagos han propiciado su distribución cosmopolita en sitios destinados para almacenamiento de productos (Campbell et al., 2022). Estos insectos han sido asociados con la presencia de hongos micotoxigénicos en productos almacenados (Hubert et al., 2018), situación que favorece la infestación no solo por parte del insecto, sino también por agentes fúngicos que se encuentran estrechamente relacionados con el insecto y que pueden proliferar en condiciones de almacenamiento (Yun et al., 2018). En la Cuadro 2 se muestran los resultados para *Tribolium* spp.

Rhyzopertha dominica

Rhyzopertha dominica, el barrenador menor del grano, es considerada como una plaga primaria de granos y productos almacenados, posee gran capacidad de adaptación a diversos ambientes y regiones geográficas; además, tiene un eficiente sistema enzimático que le permite alimentarse de variedad de granos (Naseri y Majd-Marani, 2022).

Una vez que el insecto ha comenzado la infestación del producto almacenado es capaz de interactuar con

otros insectos, tanto plagas primarias como secundarias, logrando así elevadas pérdidas de la producción, estimadas en hasta el 50 % o más (Shah et al., 2021); asimismo, *R. dominica* es capaz de actuar como vector para hongos micotoxigénicos, desencadenando una infestación fúngica. Esta situación plantea la necesidad de comprender las interacciones entre hongo e insecto. Los resultados se muestran en el Cuadro 3.

De acuerdo con Okori et al. (2022) los agentes pertenecientes a los géneros *Aspergillus* spp. y *Fusarium* spp. se encuentran ampliamente distribuidos y generalmente presentes en almacenes, asociados estrechamente a especies de los géneros *Sitophilus* spp., *Tribolium* spp. y *Trogroderma* spp. Asimismo, el género *Alternaria* spp. ha sido identificado en productos almacenados y, por lo general, está presente en sistemas donde se desarrolla una infestación activa por *R. dominica* (Karabörklü y Altin, 2018), contribuyendo indirectamente en la diseminación de esporas mientras el insecto se alimenta; pues, de acuerdo a Ding-Rong et al. (2023), el desarrollo fúngico está correlacionado con la presencia de insectos adultos de *R. dominica*, coincidiendo el desarrollo de hongo con el periodo posemergencia de la etapa adulta del agente insectil.

En el caso de *T. castaneum*, Marzani et al. (2025) señalaron que, de acuerdo con la evidencia, el insecto esta positivamente correlacionado con un grado de mayor infestación fúngica, debido a que actúa como dispersor de esporas gracias a sus movimientos tanto fuera

Cuadro 3. Hongos asociados a *Rhyzopertha dominica* en productos almacenados.

Hongo asociado	Investigación	Referencia
<i>Aspergillus</i> spp. <i>Fusarium</i> spp.	<i>Rhyzopertha dominica</i> , <i>Sitophilus</i> spp. y <i>Tribolium</i> spp. actúan como agentes dispersantes de hongos micotoxigénicos en granos almacenados, pues esporas fueron encontradas adheridas a la cutícula de las tres especies.	Hernandez Nopsa et al. (2015)
<i>A. parasiticus</i>	Granos de trigo inoculados con adultos de <i>R. dominica</i> y <i>S. oryzae</i> + esporas del hongo, fueron afectados mayormente comparado con el control (grano + espora), denotando una correlación positiva entre insecto/hongo en la infestación.	Khan et al. (2016)
<i>Aspergillus</i> spp. <i>Penicillium</i> spp. <i>Alternaria</i> spp. <i>Rhizopus</i> spp. <i>Bipolaris</i> spp. <i>Fusarium</i> spp.	En trigo almacenado se realizaron muestreos; se detectó principalmente a <i>R. dominica</i> y <i>S. oryzae</i> , asociados a la presencia de organismos fúngicos, ya que mediante su movimiento y hábitos contribuyeron en la dispersión y desarrollo de los hongos.	Aoues et al. (2017)
<i>Aspergillus</i> spp. <i>Fusarium</i> spp. <i>Penicillium</i> spp.	Muestreo de 12 sitios con maíz almacenado, se encontró a <i>S. zeamais</i> , <i>R. dominica</i> y <i>T. castaneum</i> junto con una elevada incidencia de los 3 géneros fúngicos en las muestras de grano.	Palm et al. (2018).
<i>A. flavus</i> <i>F. verticillioides</i>	Determinaron que el almacenamiento de maíz en grano en condiciones de humedad superior al 15 % favorece la infestación y crecimiento de <i>S. zeamais</i> , <i>T. castaneum</i> y <i>R. dominica</i> , así como la respectiva detección de fumonisinas y aflatoxinas; gracias a que modifican el microclima de manera que se favorece la infestación simultánea por los agentes fúngicos e insectiles.	Manu et al. (2019)
<i>Aspergillus</i> spp.	Empaquetamiento de granos de maíz en bolsas comerciales selladas redujo la población de <i>R. dominica</i> por 10 %, comparado con el almacenaje en bolsa de plástico tradicional. Resalta la importancia de mantener una cadena seca mediante el control de humedad de grano para evitar la aparición del insecto y <i>Aspergillus</i> spp.	Bakhtavar et al. (2019)
<i>Aspergillus</i> spp. <i>Penicillium</i> spp.	Revisión donde se señala la relación existente entre el deterioro de granos de arroz almacenados y la emisión de compuestos volátiles que generan atracción sobre <i>S. oryzae</i> y <i>R. dominica</i> , favoreciendo la asociación hongoinsecto que deriva en una infestación simultánea.	Liu et al. (2021)
<i>Fusarium</i> spp. <i>Aspergillus</i> spp.	Detección de <i>R. dominica</i> , <i>S. oryzae</i> , <i>T. castaneum</i> y <i>Cryptolestes ferrugineus</i> mediante la técnica de imagen hiperespectral, logrando la identificación de puntos con elevada temperatura en el grano almacenado, lugares idóneos para la proliferación de hongos.	Aviara et al. (2022)

como dentro de los granos almacenados rotos. Esta interacción es interesante, ya que de acuerdo con Khan et al. (2023), los insectos plaga de almacén, incluido *Tribolium* spp., pueden verse atraídos por compuestos volátiles emitidos por hongos micotoxigénicos, factor que facilitaría la coinfestación del producto almacenado; sin embargo, los resultados obtenidos por McFarlane et al. (2021), al realizar estudios de preferencia con larvas y adultos de *T. castaneum* en 27 géneros de hongos asociados a almacenaje, determinaron que no hubo evidencia significativa para la hipótesis de que el insecto sea atraído por los hongos micotoxigénicos, concluyendo que solo actúan como vector de esporas.

Para el género *Sitophilus* spp., los hongos micotoxigénicos mayoritariamente asociados son *Aspergillus* spp., *Fusarium* spp., y *Alternaria* spp. Mientras que con

T. castaneum aquellos géneros fúngicos principalmente reportados fueron *Aspergillus* spp., *Penicillium* spp. y *Cladosporium* spp. Referente a *R. dominica*, aquellos predominantes son *Aspergillus* spp., *Fusarium* spp. y *Penicillium* spp.

En cuanto al manejo de los insectos plaga de granos almacenados, se han preferido tradicionalmente insecticidas químicos (Harush et al., 2021); no obstante, es importante considerar el papel de los hongos micotoxigénicos, pues cuando hay una infestación por agentes fúngicos, la población de insectos tiende a aumentar, tal como han señalado Ponce et al. (2025), donde al introducir insectos adultos de *S. oryzae* en grano infestado previamente con *A. flavus*, la F1 aumentó 203 veces respecto del control, en el cual el hongo no estaba presente. Sin embargo, existen casos

en los que la presencia de *A. flavus* en grano infestado tiene el efecto contrario, como con *T. castaneum*, donde las poblaciones del insecto se ven reducidas debido a la presencia del hongo (Duarte et al., 2021). En este sentido, explorar las bases moleculares de la interacción entre los dos tipos de agentes, insectiles y fúngicos, es necesario para lograr una mayor comprensión de la interacción (Van Winkle et al., 2022).

Acerca de la diversidad de factores involucrados en la presencia de insectos plaga, o bien hongos micotoxigénicos, es necesario evaluar detalladamente cómo se interrelacionan entre sí para ocasionar la coinfestación del producto, ya que existe evidencia de relaciones de beneficio mutuo entre insecto y hongo (Vogel et al., 2021). Bajo este contexto, es prudente evaluar dichas relaciones en presencia, ausencia, determinación de las poblaciones insectiles, evaluaciones químicas de los compuestos fúngicos, e incluso en la aplicación de análisis de distribución espacio-temporal con la finalidad de obtener una prospección integral de la aparición de uno o ambos agentes plaga (Gerken y Campbell, 2022).

Derivado de esta situación, se evidencia la necesidad de manejar a los agentes insectiles y fúngicos desde una perspectiva integral capaz de combinar estrategias que impacten positivamente en el establecimiento y actualización de medidas de sanidad de los sitios de almacenaje, de tal manera que se pueda contrarrestar la presencia de ambos agentes en el producto almacenado (Berhe et al., 2022).

CONCLUSIONES

En la relación de agentes fúngicos asociados a insectos plaga de granos almacenados, es importante denotar las afectaciones que pueden acarrear a los productos. Los agentes plaga insectiles *S. zeamais*, *T. castaneum* y *R. dominica* están asociados a variedad de géneros de hongos, sobresaliendo *Aspergillus* spp. y *Fusarium* spp.

Si bien cada tipo de agente puede infestar el producto en almacén, es notable la interacción que establecen el uno con el otro para modificar las condiciones del microclima de grano con la finalidad de llevar a cabo la infestación conjunta. De lo anterior es destacable el papel de vectores que juegan las especies de insecto en la dispersión de los agentes fúngicos, además que es necesario resaltar los compuestos volátiles emitidos tanto por grano dañado y como por hongos, pues al

establecerse la interacción con los insectos, se crean las condiciones necesarias para la proliferación fúngica e insectil. Sin embargo, este último punto requiere más investigación para entender cómo es afectado el comportamiento y desarrollo del insecto.

Asimismo, es evidente la necesidad de estudios específicos centrados sobre cada especie, ya que al relacionar a cada insecto particular con una o varias especies de agentes fúngicos puede ayudar a establecer las bases moleculares de la interacción insecto-hongo, cuya finalidad sería generar estrategias específicas para una intervención oportuna en el producto almacenado.

Por último, el sector de granos almacenados enfrenta un desafío donde se evidencia la necesidad de estudios cuya finalidad sea analizar las interacciones entre especies de insectos plaga y hongos, ya que la comprensión de los mecanismos de interacción a nivel molecular brindará una perspectiva más amplia, además que proporcionarán profundidad a este tipo de investigaciones.

Potencialmente se asociarían mecanismos bioquímicos del hongo, su influencia en el insecto y su expresión bajo determinadas condiciones de almacenamiento, derivando todos estos factores en el diseño de medidas para un plan de manejo integrado en granos de almacén que permita el manejo de ambos grupos de agentes.

AGRADECIMIENTOS

A la SECIHTI por el apoyo de beca para realizar los estudios de nivel posgrado y posdoctorado de los autores.

LITERATURA CITADA

- Achimón, F., Peschiutta, M. L., Brito, V. D., Ulla, S. B., & Pizzolitto, R. P. (2024). Sulcatone as a plant-derived volatile organic compound for the control of the maize weevil and its associated phytopathogenic fungi in stored maize. *Plants*, 13(1), 2893. <https://doi.org/10.3390/plants13202893>
- Al-Zaban, M. I., Alrokban, A. H., & Mahmoud, M. A. (2023). Development of a real-time PCR and multiplex PCR assay for the detection and identification of mycotoxigenic fungi in stored maize grains. *Mycology*, 14(1), 227-238. <https://doi.org/10.1080/21501203.2023.2213704>

- Anukiruthika, T., & Jayas, D. S. (2025). Chemical cues in grain storage: A review on semiochemical types, pest behavior, and control strategies. *Journal of Stored Products Research*, 113(1), 102674. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2025.102674>
- Aoues, K., Boutoumi, H., & Benrima, A. (2017). État phytosanitaire du blé dur locale stocké en Algérie. *Agrobiologia*, 7(1), 286-296.
- Araújo, S. O., Peres, R. S., Barata, J., Lidon, F., & Ramalho, J. C. (2021). Characterising the agriculture 4.0 landscape—emerging trends, challenges and opportunities. *Agronomy*, 11(4), 667. <https://doi.org/10.3390/agronomy11040667>
- Arya, P. S., Srivastava, C., Rajna, S., Ranjith, H. V., & Subramanian, S. (2025). Physicochemical grain properties of wheat cultivars and insect biology drive resistance to *Sitophilus oryzae* L. *Scientific Reports*, 15(1), 35308. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-19299-7>
- Athanassiou, C. G., Kavallieratos, N. G., & Campbell, J. F. (2017). Competition of three species of *Sitophilus* on rice and maize. *PLoS One*, 12(3), e0173377. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0173377>
- Aviara, N. A., Liberty, J. T., Olatunbosun, O. S., Shoyombo, H. A., & Oyeniyi, S. K. (2022). Potential application of hyperspectral imaging in food grain quality inspection, evaluation and control during bulk storage. *Journal of Agriculture and Food Research*, 8(1), 100288. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100288>
- Awuchi, C. G., Ondari, E. N., Nwozo, S., Odongo, G. A., Eseoghene, I. J., Twinomuhwezi, H., & Okpala, C. O. R. (2022). Mycotoxins' toxicological mechanisms involving humans, livestock and their associated health concerns: A review. *Toxins*, 14(3), 167-177. <https://doi.org/10.3390/toxins14030167>
- Bakhtavar, M. A., Afzal, I., Basra, S. M., & Wahid, A. (2019). Implementing the 'dry chain'during storage reduces losses and maintains quality of maize grain. *Food Security*, 11(1), 345-357. <https://doi.org/10.1007/s12571-019-00905-2>
- Barra, P., Etcheverry, M., & Nesci, A. (2015). Efficacy of 2, 6-di (t-butyl)-p-cresol (BHT) and the entomopathogenic fungus *Purpureocillium lilacinum*, to control *Tribolium confusum* and to reduce aflatoxin B1 in stored maize. *Journal of Stored Products Research*, 64(Part A), 72-79. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2015.09.003>
- Berhe, M., Subramanyam, B., Chichaybelu, M., Demissie, G., Abay, F., & Harvey, J. (2022). Post-harvest insect pests and their management practices for major food and export crops in East Africa: An Ethiopian case study. *Insects*, 13(11), 1068. <https://doi.org/10.3390/insects13111068>
- Beyene, G. K., Yones, A. M., Heji, A. B., & Kayim, M. (2024). Insect pests and diseases in stored sorghum (*Sorghum bicolor* L.) and maize (*Zea mays* L.) in West Hararghe, Ethiopia. *Advances in Agriculture*, 2024, 6650317. <https://doi.org/10.1155/2024/6650317>
- Bhusal, K., & Khanal, D. (2019). Role of maize weevil, *Sitophilus zeamais* Motsch. on spread of *Aspergillus* section *flavi* in different nepalese maize varieties. *Advances in Agriculture*, 2019, 7584056. <https://doi.org/10.1155/2019/7584056>
- Brito, V. D., Achimón, F., Dambolena, J. S., Pizzolitto, R. P., & Zygadlo, J. A. (2019). Trans-2-hexen-1-ol as a tool for the control of *Fusarium verticillioides* in stored maize grains. *Journal of Stored Products Research*, 82, 123-130. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2019.05.002>
- Campbell, J. F., Athanassiou, C. G., Hagstrum, D. W., & Zhu, K. Y. (2022). *Tribolium castaneum*: A model insect for fundamental and applied research. *Annual Review of Entomology*, 67, 347-365. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-080921-075157>
- Cao, Y., Hu, Q., Huang, L., Athanassiou, C. G., Maggi, F., D'Isita, I., Liu, Y., Postillo, O. M., Miao, M., Germinara, G. S., & Li, C. (2024). Attraction of *Sitophilus oryzae* (L.) (Coleoptera: Curculionidae) to the semiochemical volatiles of stored rice materials. *Journal of Pest Science*, 97, 73-85. <https://doi.org/10.1007/s10340-023-01616-6>
- Cortese, D., de Oliveira, G. S., & Fernandes, M. G. (2025). Influence of temperature and maize genotypes on the population dynamics of *Sitophilus zeamais* Motschulsky 1885 (Coleoptera: Curculionidae) and grain quality during storage. *Journal of Stored Products Research*, 111, 102564. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2025.102564>
- Danso, J. K., Osekere, E. A., Opit, G. P., Manu, N., Armstrong, P. R., Arthur, F. H., Campbell, J. F., Mbata, G. N., & McNeill, S. G. (2018). Insect pests and fungal pathogens in maize stored in Ghana. *Julius-Kühn-Archiv*, 1, 27-31. <https://doi.org/10.5073/jka.2018.463.008>
- De Souza, V. N., de Oliveira, C. R. F., Matos, C. H. C., & de Almeida, D. K. F. (2016). Fumigation toxicity of essential oils against *Rhyzopertha dominica* (F.) in stored maize grain. *Revista Caatinga*, 29(2), 435-440. <https://doi.org/10.1590/1983-21252016v29n220rc>
- Desta, A. G., & Yeshitila, B. H. (2024). The distribution of insect pests and the associated loss of stored sorghum

- in the Kena district of Konso Zone, South-Western Ethiopia. *PLoS ONE*, 19(1), e0295833. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0295833>
- Ding-Rong, X. U. E., Jian-Hua, L. U., Li-Yuan, X. I. A. & Yi, W. U. (2023). Differences in microbial diversity between larval and adult *Rhyzopertha dominica* (Fabricius) (Coleoptera: Bostrycidae). *Chinese Journal of Applied Entomology*, 60(1), 1-8. <https://doi.org/10.7679/j.issn.2095-1353.2023.022>
- D'Isita, I., Pistillo, O. M., Di Palma, A. M., De Vita, P., & Germinara, G. S. (2024). Susceptibility of old and modern wheat genotypes to *Sitophilus granarius* (L.) and *Rhyzopertha dominica* (F.). *Journal of Stored Products Research*, 106, 102265. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2024.102265>
- Djebbi, T., Soltani, A., Chargui, H., Sadraoui-Ajmi, I., Teka, N., Boushah, E., Majdoub, H., & Jemâa, J. M. B. (2023). Formulation of pectin-Citrus aurantium essential oil-based packaging film and assessment of insecticidal performances against *Rhyzopertha dominica* on stored wheat. *Journal of Stored Products Research*, 104, 102203. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2023.102203>
- Duarte, S., Magro, A., Tomás, J., Hilário, C., Alvito, P., Ferreira, R. B., & Carvalho, M. O. (2021). The interaction between *Tribolium castaneum* and mycotoxigenic *Aspergillus flavus* in maize flour. *Insects*, 12(8), 730. <https://doi.org/10.3390/insects12080730>
- Fu, J., Yue, X., Zhang, Q., & Li, P. (2024). Early warning technologies for mycotoxins in grains and oilseeds: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 148, 104479. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104479>
- Gerken, A. R., & Campbell, J. F. (2022). Spatial and temporal variation in stored-product insect pest distributions and implications for pest management in processing and storage facilities. *Annals of the Entomological Society of America*, 115(3), 239-252. <https://doi.org/10.1093/aesa/saab049>
- Haggag, W. M., Diab, M. M., Al-Ansary, N. A., Ibrahim, M. I. M., Khatib, 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, 1631-1644. <https://doi.org/10.1007/s42976-024-00502-w>
- Harush, A., Quinn, E., Trostanetsky, A., Rapaport, A., Kostyukovsky, M., & Gottlieb, D. (2021). Integrated pest management for stored grain: potential natural biological control by a parasitoid wasp community. *Insects*, 12(11), 1038. <https://doi.org/10.3390/insects12111038>
- Hernandez Nopsa, J. F., Daglish, G. J., Hagstrum, D. W., Leslie, J. F., Phillips, T. W., Scoglio, C., Thomas-Sharma, S., Walter, G. H., & Garrett, K. A. (2015). Ecological networks in stored grain: Key postharvest nodes for emerging pests, pathogens, and mycotoxins. *BioScience*, 65(10), 985-1002. <https://doi.org/10.1093/biosci/biv122>
- Hubert, J., Stejskal, V., Athanassiou, C. G., & Throne, J. E. (2018). Health hazards associated with arthropod infestation of stored products. *Annual Review of Entomology*, 63, 553-573. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-020117-043218>
- Karabörklü, S., & Altın, N. (2018). Düzce ili fındık depolarında görülen zararlı böcekler ve patojen fungusların tanımlanması. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6, 860-870.
- Katta, Y. M., Kamara, M. M., El-Aty, M. S., Elgamel, W. H., Soleiman, R. M., Mousa, K. M., & Ueno, T. (2019). Effect of storage temperature on storage efficacy, germination and physical characters of some paddy rice cultivars during different storage periods. *Journal of The Faculty of Agriculture*, 64(1), 64-69. <https://doi.org/10.5109/2232279>
- Khan, T., Shahid, A. A., & Khan, H. A. A. (2016). Could biorational insecticides be used in the management of aflatoxigenic *Aspergillus parasiticus* and its insect vectors in stored wheat. *PeerJ*, 4(1), e1665. <https://doi.org/10.7717/peerj.1665>
- Khan, T., Khan, H. A. A., Anwar, W., Khan, M. R. & Umer, M. (2023). Natural occurrence of fungal species on the rice weevil, *Sitophilus oryzae* (Coleoptera: Curculionidae), in Punjab, Pakistan. *International Journal of Tropical Insect Science*, 43, 1741-1748. <https://doi.org/10.1007/s42690-023-01078-4>
- Kochiieru, Y., Mankevičienė, A., Cesevičienė, J., Semaškienė, R., Ramanauskienė, J., Gorash, A., & 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>
- Kumar, N., Khurana, S. M. P., & Pandey, V. N. (2023). Deciphering of seed health of common food grains (wheat, rice) of North Eastern UP and Gurgaon Haryana, India. *Scientific Reports*, 13, 8480. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-34510-3>
- Kunhachan, P., Chompoosri, J., Bhakdeenuan, P., Khumsawad, C., Kosa, N., Pangjai, D., Tawatsin, A., &

- Hanpakphoom, S. (2019). Toxicity and efficacy of essential oils against red flour beetle, *Tribolium castaneum* (Herbst), a vector of human pathogens. *Journal of Health Science of Thailand*, 28(3), 547-560.
- Liu, K., Zhang, C., Xu, J., & Liu, Q. (2021). Research advance in gas detection of volatile organic compounds released in rice quality deterioration process. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(6), 5802-5828. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12846>
- Lorenzo, M., Sabrina, S., Gianpaola, P., Antonio, M., Miriam, H., & Giovanni, V. (2020). N₂ controlled atmosphere reduces postharvest mycotoxins risk and pests attack on cereal grains. *Phytoparasitica*, 48, 555-565. <https://doi.org/10.1007/s12600-020-00818-3>
- Mafra, J. B., & Christian, D. (2024). Estudo da influência do resfriamento de grãos de milho na presença de micotoxinas: aflatoxinas; Zearalenona (ZEA); Deoxinivalenol (DON); e Fumosina (FUMO). *Revista Caribeña de Ciencias Sociales*, 13(3), e3770. <https://doi.org/10.55905/rcssv13n3-016>
- Makinya, K. J. (2022). *Effect of hygiene status in maize storage facilities on pests, molds and aflatoxin contamination in Nakuru Country, Kenya* [Doctoral dissertation, University of Nairobi].
- Manu, N., Osekre, E. A., Opit, G. P., Arthur, F. H., Mbata, G., Armstrong, P., Danso, J. K., McNeill, S. G., & Campbell, J. (2019). Moisture content, insect pests and mycotoxin levels of maize on farms in Tamale environs in the northern region of Ghana. *Journal of Stored Products Research*, 83, 153-160. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2019.05.015>
- Marzani, Q. A., Khidr, S. K., Aziz, B. A., Agha, W. N., & Swilaiman, S. S. (2025). Investigation of the potential effect of insect infestation on mycotoxin levels in stored rice. *Passer Journal of Basic and Applied Sciences*, 7(1), 524-532. <https://doi.org/10.24271/PSR.2025.491989.1843>
- Matumba, L., Namaumbo, S., Ngoma, T., Meleke, N., De Boevre, M., Logrieco, A. F., & De Saeger, S. (2021). Five keys to prevention and control of mycotoxins in grains: A proposal. *Global Food Security*, 30, 100562. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2021.100562>
- Mbata, G. N., Danso, J. K., & Holton, R. L. (2024). Peanut aflatoxin: Impact of postharvest insect infestation and storage systems. *Insects*, 15(11), 836. <https://doi.org/10.3390/insects15110836>
- McFarlane, D. J., Aitken, E. A. B., Ridley, A. W., & Walter, G. H. (2021). The dietary relationships of *Tribolium castaneum* (Herbst) with microfungi. *Journal of Applied Entomology*, 145(1-2), 158-169. <https://doi.org/10.1111/jen.12830>
- Mohsan, M., Sarwar, Z. M., Ali, H., Haq, I. U., Riaz, A., Iqbal, R., Albasher, G., & Ansari, M. J. (2025). Optimizing modified ecological compositions enables eco-friendly control of *Tribolium castaneum* in grain storage. *International Journal of Tropical Insect Science*, <https://doi.org/10.1007/s42690-025-01511-w>
- Morrison III, W. R., Ponce, M. A., Castaldi, J., James, A., Stoll, I., Moreland, J., Abshire, J., Kim, T. N., & Gerken, A. R. (2025). Season-long microbial dynamics from the cuticle of rice weevil originating at food facilities after dispersal to novel food patches. *Environmental Entomology*, 54(2), 296-308. <https://doi.org/10.1093/ee/nvaf012>
- Morrison, W. R., Ponce, M. A., Sierra, P., Lizarraga, S., Van Winkle, T., James, A., & Kim, T. N. (2022). Linking the behavioral response by stored product insects to emissions of microbial volatiles from grain. *IOBC-WPRS Bulletin*, 159(1), 46-47.
- Muniswamy, K., Sugumar, A., Yarrakula, S., Manickam, L., & Chidanand, D. V. (2023). Effect of ozone fumigation on controlling common storage pest *Tribolium castaneum* (Herbst) in proso millet during storage. *Ozone: Science & Engineering*, 45(6), 543-559. <https://doi.org/10.1080/01919512.2023.2174069>
- Naseri, B. & Majd-Marani, S. (2022). Different cereal grains affect demographic traits and digestive enzyme activity of *Rhyzopertha dominica* (F.) (Coleoptera: Bostrichidae). *Journal of Stored Products Research*, 95, 101898. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2021.101898>
- Ngoma, T. N., Monjerezi, M., Leslie, J. F., Mvumi, B. M., Harvey, J. J. W., & Matumba, L. (2024). Comparative utility of hermetic and conventional grain storage bags for smallholder farmers: a meta-analysis. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 104(2), 561-571. <https://doi.org/10.1002/jsfa.12934>
- Okori, F., Cherotich, S., Baidhe, E., Komakech, A. J., & Banadda, N. (2022). Grain hermetic storage and post-harvest loss reduction in Sub-Saharan Africa: Effects on grain damage, weight loss, germination, insect infestation, and mold and mycotoxin contamination. *Journal of Biosystems Engineering*, 47, 48-68. <https://doi.org/10.1007/s42853-022-00130-4>
- Okparavero, N. F., Grace, O. O., Rukayat, Q., Jimoh, O. M., Ishola, T. D., Okunlade, A. F., Haruna, P. B., Isaac, A.

- Y., & Akande, E. T. (2024). Effective storage structures for preservation of stored grains in Nigeria: A review. *Ceylon Journal of Science*, 53(1), 139-147. <https://doi.org/10.4038/cjs.v53i1.8194>
- Okpale, C., Zakka, U., & Nwosu, L. C. (2021). Susceptibility of ten rice brands to weevil, *Sitophilus oryzae* L. (Coleoptera: Curculionidae), and their influence on the insect and infestation rate. *Bulletin of the National Research Centre*, 45(1), 2. <https://doi.org/10.1186/s42269-020-00459-w>
- Palm, L., Barros, G., Magro, A., da Silva, E. B., Mexia, A., & Lima, A. (2018). Insects and fungi in stored maize in Angola. *Julius-Kühn-Archiv*, 463(1), 264-268. <https://doi.org/10.5073/jka.2018.463.062>
- Pande, A., Paliwal, J., Jian, F., & Bakker, M. G. (2025). Mechanisms and application of mycotoxin decontamination techniques in stored grains. *Journal of Stored Products Research*, 111, 102486. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2024.102486>
- Paquete, I., Bento, A., & Carvalho, M. O. (2015). Current status on stored product protection in São Tomé & Príncipe. *IOBC-WPRS Bulletin*, 111, 261-267.
- Parsons, J., Lopes, M. S., Mezzalama, M., & Riudavets, J. (2025). The impact of biological control on pest survival and *Aspergillus flavus* in two stored maize genotypes. *Biological Control*, 206, 105791. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2025.105791>
- Pimentel, M. A. G., Mendes, S. M., Queiroz, V. A. V., da Costa, R. D., Alves, G. L. de O., & Guimarães, L. J. M. (2018). Armazenamento de Milho, infestação por insetos e níveis de micotoxinas em propriedades familiares no Estado de Minas Gerais. *Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento*, 179, 1-25.
- Ponce, M. A., Lizarraga, S., Bruce, A., Kim, T. N. & Morrison III, W. R. (2022). Grain inoculated with different growth stages of the fungus, *Aspergillus flavus*, affect the close-range foraging behavior by a primary stored product pest, *Sitophilus oryzae* (Coleoptera: Curculionidae). *Environmental Entomology*, 51(5), 927-939. <https://doi.org/10.1093/ee/nvac061>
- Ponce, M. A., Kim, T. N., & Morrison III, W. R. (2025). Multiple infestation of a grain mass by *Sitophilus oryzae* L. (Coleoptera: Curculionidae) and the fungus, *Aspergillus flavus*, optimizes abiotic conditions for improved insect fitness. *Environmental Entomology*, 54(4), 802-809. <https://doi.org/10.1093/ee/nvaf067>
- Poudel, D. D., Belbase, K., De Boevre, M., De Saeger, S., & Dahal, P. (2020). Climate smart dry chain for food and nutrition security in Nepal. *Strategic Planning for Energy and the Environment*, 39(1-4), 131-150. <https://doi.org/10.13052/spee1048-4236.39147>
- Quintero, H., Quintero Cortes, J., Plata-Rueda, A., & Martínez, L. C. (2025). Azadirachtin-mediated responses in the maize weevil, *Sitophilus zeamais* (Coleoptera: Curculionidae). *Insects*, 16(3), 294. <https://doi.org/10.3390/insects16030294>
- Riudavets, J., Pons, M. J., Messeguer, J., & Gabarra, R. (2018). Effect of CO2 modified atmosphere packaging on aflatoxin production in maize infested with *Sitophilus zeamais*. *Journal of Stored Products Research*, 77, 89-91. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2018.03.005>
- Riungu, G. M., Muthomi, J., Wagacha, M., Buechs, W., Philip, E. S., & Meiners, T. (2024). The effect of cropping systems on the dispersal of mycotoxigenic fungi by insects in pre-harvest maize in Kenya. *Insects*, 15(12), 995. <https://doi.org/10.3390/insects15120995>
- Sánchez A., Gómez-Guerrero, B., & Billiris, A. (2020). Almacenamiento de arroz: influencia en la inocuidad del grano. *INNOTEC*, 19, 109-124. <https://doi.org/10.26461/19.08>
- Seada, M. A., & Hamza, A. M. (2023). Comparative morphology of sensilla of antennae, maxillary and labial palpi of adult *Rhyzopertha dominica* (F.) (Coleoptera: Bostrichidae), with specific reference to the typology and possible functions. *The Journal of Basic and Applied Zoology*, 84, 14. <https://doi.org/10.1186/s41936-023-00334-w>
- Sebayang, A., Rohumatun, Salim, Rubiana, R., Sipi, S., Manwan, S. W., Fattah, A., Arrahman, A., Yasin, M., & Saenong, M. S. (2023). *Sitophilus zeamais* (Motschulsky): the primary obstacles in the maize quality and quantity. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1230, 012089. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1230/1/012089>
- Seco, M. N. P., Beltran, A. K. M., & Balendres, M. A. O. (2024). First record of *Hyphopichia burtonii* isolated from the storage pest *Sitophilus zeamais* and its bioactivity against mycotoxigenic fungi. *Hellenic Plant Protection Journal*, 17, 97-110. <https://doi.org/10.2478/hppj-2024-0009>
- Shah, J. A., Vendl, T., Aulicky, R., & Stejskal, V. (2021). Frass produced by the primary pest *Rhyzopertha dominica* supports the population growth of the secondary stored product pests *Oryzaephilus surinamensis*, *Tribolium castaneum*, and *T. confusum*. *Bulletin of Entomological*

- Research*, 111(2), 153-159. <https://doi.org/10.1017/S0007485320000425>
- Sitoe, E. da P. E., Pacheco, F. C., & Chilala, F. D. (2025). Advances in ozone technology for preservation of grains and end products: Application techniques, control of microbial contaminants, mitigation of mycotoxins, impact on quality, and regulatory approvals. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 24(3), e70173. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.70173>
- Stathas, I. G., Sakellaris, A. C., Papadelli, M., Kapos, J., Papadimitriou, K., & Stathas, G. J. (2023). The effects of insect infestation on stored agricultural products and the quality of food. *Foods*, 12(10), 2046. <https://doi.org/10.3390/foods12102046>
- Tada, J. M., & De Nardi, C. P. P. (2021). Caruncho (*Sitophilus* sp.) como veiculador de micro-organismos patogênicos no arroz e no milho. *COGITARE*, 4(2), 58-67.
- Usseglio, V. L., Dambolena, J. S., Martinez, M. J., & Zunino, M. P. (2020). The role of fumonisins in the biological interaction between *Fusarium verticillioides* and *Sitophilus zeamais*. *Journal of Chemical Ecology*, 46, 1059-1068. <https://doi.org/10.1007/s10886-020-01220-3>
- Van Duong, N., Khanh, L. Q., Xuan, B. T., Hung, C. T., & Que, L. X. (2020). Using oxygen depletion to reduce maize weevils without chemicals in a storage environment. *Vietnam Journal of Chemistry*, 58(3), 327-332. <https://doi.org/10.1002/vjch.2019000168>
- Van Winkle, T., Ponce, M., Quellhorst, H., Bruce, A., Albin, C. E., Kim, T. N., Zhu, K. Y., & Morrison III, W. R. (2022). Microbial volatile organic compounds from tempered and incubated grain mediate attraction by a primary but not secondary stored product insect pest in wheat. *Journal of Chemical Ecology*, 48, 27-40. <https://doi.org/10.1007/s10886-021-01312-8>
- Vogel, P., da Silva, G. L., Esswein, I. Z., Dallazen, M. C., Heidrich, D., Pagani, D. M., Hoehne, L., Scroferneker, M. L., Valente, P., & Ferla, N. J. (2021). Effects of infestations of the storage mite *Tyrophagus putrescentiae* (Acaridae) on the presence of fungal species and mycotoxin production in stored products. *Journal of Stored Products Research*, 94, 101883. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2021.101883>
- Yun, T.-S., Park, S.-Y., Yu, J., Hwang, Y., & Hong, K.-J. (2018). Isolation and identification of fungal species from the insect pest *Tribolium castaneum* in rice processing complexes in Korea. *The Plant Pathology Journal*, 34(5), 356-366. <https://doi.org/10.5423/PPJ.OA.02.2018.0027>
- Zakladnoy, G. A. (2018). Effect of grain infestation with the rice weevil *Sitophilus oryzae* L. (Coleoptera, Dryophthoridae) on the quality of grain and grain products. *Entomological Review*, 98, 659-662. <https://doi.org/10.1134/S0013873818060015>
- Zhao, C., Bai, C., Yan, L., Xiong, H., Suthisut, D., Pobsuk, P., & Wang, D. (2024). AC-YOLO: Multi-category and high-precision detection model for stored grain pests based on integrated multiple attention mechanisms. *Expert Systems with Applications*, 255(Part B), 124659. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.124659>
- Zhao, F., Huang, J., Qi, J., Li, Q., Wu, H., & Ju, J. (2022). Proteomic analysis of antifungal mechanism of star anise essential oil against *Aspergillus niger* and its application potential in prolonging bread shelf life. *LWT*, 169, 114023. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.114023>
- Ziegler, V., Paraginski, R. T., & Ferreira, C. D. (2021). Grain storage systems and effects of moisture, temperature and time on grain quality-A review. *Journal of Stored Products Research*, 91, 101770. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2021.101770>