

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
PROGRAMA DOCENTE DE LA CARRERA DE
INGENIERO AGRÓNOMO PARASITÓLOGO



Control del picudo del maíz (*Sitophilus zeamais*) en granos almacenados, mediante
principios activos químicos potencializados con nanopartículas

Por:

MIGUEL ANGEL HERNANDEZ VIDAL

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO PARASITÓLOGO

Saltillo, Coahuila de Zaragoza, México
Junio 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
PROGRAMA DOCENTE DE LA CARRERA DE
INGENIERO AGRÓNOMO PARASITÓLOGO

Control del picudo del maíz (*Sitophilus zeamais*) en granos almacenados, mediante
principios activos químicos potencializados con nanopartículas

Por:

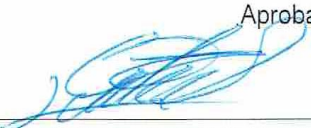
MIGUEL ANGEL HERNANDEZ VIDAL

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO PARASITÓLOGO

Aprobada por el Comité Asesor:


DR. ERNESTO CERNA CHAVEZ
Asesor Principal


DR. ALBERTO ROQUE ENRIQUEZ
Asesor Principal Externo


DRA. YISA MARIA OCHOA FUENTES
Coasesor


DRA. ROCIO DE JESUS DIAZ AGUILAR
Coasesor


DR ALBERTO SANDOVAL RANGEL
Coordinador de la División de Agronomía



Saltillo, Coahuila de Zaragoza, México
Junio 2026

DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

Todo material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor de los Estados Unidos Mexicanos, y pertenece al autor principal quien es el responsable directo y jura bajo protesta de decir verdad que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos:

Reproducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (corta y pega); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio); comprar, robar o pedir prestados los datos o la tesis para presentarla como propia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin usar comillas; utilizar ideas o razonamientos de un autor sin citarlo; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, gráficas, mapas o datos sin citar al autor original y/o fuente. Así mismo tengo conocimiento de que cualquier uso distinto de estos materiales como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Por lo anterior, nos responsabilizamos de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaramos que este trabajo no ha sido previamente presentado en ninguna otra institución educativa, organización, medio público o privado.

Autor principal



Miguel Ángel Hernández Vidal

Asesor principal



Dr. Ernesto Cerna Chávez

AGRADECIMIENTOS

A **DIOS** por permitirme llegar a este momento, porque sin el nada de esto hubiese sido posible, por siempre protegerme y poner en mi camino a las personas correctas, y por todas las bendiciones que me ha dado a lo largo de mi vida.

A mi **ALMA TERRA MATER** por acogerme entre sus aulas y haberse convertido en mi segunda casa durante estos 4 años y medio, por brindarme todas las herramientas necesarias para poder tener una educación de calidad, gracias porque durante todo este tiempo jamás pase frío ni hambre, por todas las alegrías, y tristezas que viví y todas las personas que se volvieron mi familia que gracias a ti conocí.

Al **DEPARTAMENTO DE PARASITOLOGÍA** y a todos los maestros que lo conforman por enseñarme amar mi carrera y brindarme todos los conocimientos necesarios para mi formación.

Al **Dr. ALBERTO ROQUE ENRIQUEZ** por su paciencia, dedicación y orientación para la realización de mi experimento, por siempre tener la disponibilidad de resolver a mis dudas, a quien aprecio mucho y le tengo mucha admiración y respeto.

Al **Dr. ERNESTO CERNA CHÁVEZ**, por brindarme todo su apoyo y confianza para poder realizar mi experimento, a la **Dra. JAZMIN JANET VELÁZQUEZ GUERRERO** y a la **Dra. YISA MARIA OCHOA FUENTES** por todo el apoyo que me mostraron al realizar este trabajo.

Quiero agradecer a la **Dra. MIRIAM SANCHEZ VEGA** quien fue mi tutora y siempre me mostró su apoyo y preocupación por ser un alumno de bien, por todos los consejos y el tiempo que me brindo.

A **MIS PADRES GILDARDO HERNANDEZ VIDAL Y MINERVA MARGARITA VIDAL PACHECO** por siempre impulsarme a alcanzar mis sueños y apoyarme en cada uno de ellos, por sus palabras de aliento, oraciones, gracias por siempre

respetar mis decisiones y escucharme siempre que lo he necesitado, por permitirme salir de casa para poder estudiar en la universidad que siempre quise.

A mis hermanos **EDUARDO HERNANDEZ VIDAL Y ELIZABETH HERNANDEZ VIDAL** por apoyarme e impulsarme a alcanzar esta meta y ser mi ejemplo a seguir, por sus consejos y todo el apoyo que me brindaron.

A mis amigos **Pedro** (el Ferrari), pequeño **Diego, Ruben** (camarón), **Cristian, Gerardo, Jorge, Monse, Leo, Brandon** gracias por haber hecho disfrutar de mi estancia universitaria, por todos sus consejos, y por nunca dejarme solo, por todos los momentos compartidos alegrías y tristezas, sepan que estaré siempre muy agradecido con ustedes y los considero mi segunda familia los aprecio mucho y les deseo lo mejor.

A **ALISON** gracias por haberme impulsado a llegar hasta aquí, por todo apoyo, cariño, paciencia, por motivarme a seguir adelante cuando sentía que no podía y por siempre creer en mí.

DEDICATORIAS

A mis padres **Gildardo Hernandez Vidal** y **Minerva Margarita Vidal Pacheco**, a quienes les debo todo lo que soy en la vida, estoy infinitamente agradecido por todo su amor, cariño y apoyo que me han brindado, esta meta que está a punto de culminar es un logro suyo por haberme hecho un hombre de bien, ustedes son la inspiración más grande que tengo en mi vida, por enseñarme amar el campo, estaré infinitamente agradecido por todo lo que han hecho por mí, siempre estaré muy orgulloso de ustedes,

A mis hermanos **Eduardo Hernandez Vidal** y **Elizabeth Hernandez Vidal**, ustedes que son mi mejor ejemplo, esta meta cumplida representa el apoyo, amor y sus consejos que me han brindado para poder llegar hoy aquí.

A mis amigos de toda la vida **Eduardo Gutiérrez** y **José Manuel** por el apoyo que me han brindado desde que somos amigos, sus consejos, gracias por seguir siendo mis amigos a pesar de la distancia y por siempre confiar en mí.

A mi **familia** Tías, tíos, primos, sobrinos gracias por siempre estar pendientes y preocuparse por mí, por cada mensaje de aliento, llamada, consejo y por siempre escucharme, siempre estaré agradecido con ustedes es por eso que les dedico este trabajo.

A mi tía **María Isabel Hernandez Vidal †** gracias por todo su apoyo y sus consejos siempre la llevare en mi mente y en mi corazón hoy le dedico este logro hasta cielo.

ÍNDICE GENERAL

I.	INTRODUCCIÓN	1
1.1.1	Objetivo general.....	3
1.1.2	Objetivos específicos	3
1.2	Hipótesis	3
I.	REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1	Historia y origen del maíz.....	4
2.2	El maíz en México	4
2.3	Importancia mundial.....	5
2.4	Producción nacional.....	6
2.5	Importancia de los granos almacenados	6
2.6	Importancia de las plagas de almacén	8
2.7	Importancia de los gorgojos	9
2.7.1	Daños directos	10
2.7.2	Daños indirectos.....	10
2.8	Principales plagas de maíz en almacén	10
2.9	<i>Tribolium castaneum</i> H.	10
2.10	Barrenador del grano (<i>Rhyzopertha dominica</i>)	11
2.11	<i>Sithophilus zeamais</i>	12
2.11.1	Clasificación taxonómica	13
2.11.2	Morfología	13
2.11.3	Ciclo biológico	14
1.12	Métodos de control.....	14
2.13	Control físico.....	15
2.14	Orgánico o biorracional	16
2.14.1	Plantas insecticidas	16
2.14.2	Aceites esenciales.....	16
2.15	Control químico	16
2.16	Bifentrina	17
2.16.1	Modo de acción	18
2.17	Dimetoato.....	18

2.17.1 Modo de acción	19
2.18 La nanotecnología en la agricultura	19
2.19 La nanotecnología en el control de plagas	20
2.20 Nanopartículas de plata.....	21
2.21 Nanopartículas de cobre	22
2.22 Nanopartículas de grafito.....	23
III MATERIALES Y MÉTODOS.....	25
3.1 Ubicación del experimento	25
3.2 Establecimiento de colonia de <i>Sitophilus zeamais</i>	25
3.3 Establecimiento de los bioensayos.....	25
3.4 Descripción de los bioensayos.....	25
3.6 Análisis estadístico	26
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	27
V. CONCLUSIÓN.....	36
VI. LITERATURA CITADA.....	37

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Mortalidad de <i>Sitophilus zeamais</i> después de 72 h expuestas a bifentrina en combinación de nanopartículas de cobre, grafito y plata.	29
Tabla 2: Mortalidad de <i>Sitophilus zeamais</i> después de 72 h expuestas a Dimetoato en combinación de nanopartículas de cobre, grafito y plata.	31
Tabla 3: Concentración letal media en <i>Sitophilus zeamais</i> de Bifentrina a diferentes concentraciones de nanopartículas de cobre, grafito y plata a las 72 h.	33
Tabla 4: Concentración letal media en <i>Sitophilus zeamais</i> de Dimetoato a diferentes concentraciones de nanopartícula de cobre, grafito y plata a las 72 h.	35

RESUMEN

El gorgojo del maíz *Sitophilus zeamais* (*S. zeamais*) es considerada una de las plagas más importantes en el almacenamiento de granos debido al gran número de hospederos que posee además de ser una plaga ampliamente extendida por el mundo. Este coleóptero por sus hábitos alimenticios tiene la capacidad de alimentarse en sus diferentes estadios en granos secos ocasionando grandes pérdidas cuantitativas y cualitativas, como reducción en la calidad del grano, peso y volumen, afectando de igual forma la viabilidad de la germinación del grano, por consecuencia provocando grandes daños económicos al realizar su control. En este estudio se evaluó la eficiencia de insecticidas solos y a su vez en combinación con nanopartículas de grafito (NPsGr), nanopartículas de plata (NPsAg) y nanopartículas de cobre (NPsCu) al 3 y 10 % en adultos de *S. zeamais* como una alternativa a la reducción de moléculas químicas, utilizando un método de película residual en condiciones de laboratorio, donde se aplicaron concentraciones de ingredientes activos bifentrina y dimetoato solos y combinados a concentraciones de 100,1000,2000,3000,4000,5000 y 6000 ppm donde se registró la mortalidad durante 72 h, todos los tratamientos utilizados mostraron un efecto insecticida igual o mayor al del ingrediente activo por sí solo. Los tratamientos que mayor eficiencia tuvieron fueron a base de las NPsGr en donde la combinación de estas con dimetoato al 3 y 10 % alcanzaron mortalidades de 98.89 y 100 %, obteniendo una reducción de la CL₅₀ en 3.37 y 10.26 veces más, demostrándose que los nanomateriales son una opción al uso de pesticidas y el control eficiente de *S. zeamais*, sin embargo, se sugiere seguir estudiando más a fondo las nanopartículas en otras concentraciones u otros ingredientes activos.

Palabras clave: Gorgojo, control, químico, eficiencia, potencialización.

ABSTRACT

The European corn weevil, *Sitophilus zeamais* (*S. zeamais*), is considered one of the most important pests in grain storage due to its wide range of hosts and its widespread distribution worldwide. This beetle, with its feeding habits, can feed on dry grains at different stages of its life cycle, causing significant quantitative and qualitative losses, such as reduced grain quality, weight, and volume. It also affects grain germination viability, resulting in substantial economic losses when control measures are implemented. In this study, the efficiency of insecticides alone and in combination with graphite nanoparticles (GrNPs), silver nanoparticles (AgNPs), and copper nanoparticles (CUNPs) at 3 and 10% was evaluated on *S. zeamais* adults as an alternative to reducing chemical molecules. A residual film method was used under laboratory conditions, where concentrations of the active ingredients bifenthrin and dimethoate were applied alone and in combination at concentrations of 100, 1000, 2000, 3000, 4000, 5000, and 6000 ppm. Mortality was recorded for 72 h. All treatments showed an insecticidal effect equal to or greater than that of the active ingredient alone. The most efficient treatments were based on NPsGr, where the combination of these with 3% and 10% dimethoate achieved mortality rates of 98.89% and 100%, obtaining a reduction of LC₅₀ by 3.37 and 10.26 times, demonstrating that nanomaterials are an alternative to the use of pesticides and the efficient control of *S. zeamais*; however, it is suggested to continue studying the nanoparticles in other concentrations or with other active ingredients.

Keywords: Weevil, control, chemical, efficiency, potentiation.

I. INTRODUCCIÓN

Los cereales son la principal base de la alimentación en el mundo y fuente importante de la economía, el maíz es uno de los cereales más utilizados desde tiempos ancestrales en la alimentación humana, que se comercializa por sus componentes nutricionales, sin embargo, ha sido fuente principal en la alimentación latinoamericana junto con el arroz y el trigo (Urango, 2018).

La importancia que tiene el maíz en satisfacer las demandas de alimentación en México, obliga a contar con estructuras de almacenamiento eficientes en infraestructura equipamiento, medidas de control de plagas, para mantener la calidad del grano, asegurando la disponibilidad de este durante largos períodos de tiempo para alimentar a millones de familias (Ortiz *et al.*, 2015). El almacenamiento de granos y semillas es una etapa crucial en donde se debe conservar al máximo la calidad del grano y minimizar las pérdidas para que el productor se vea beneficiado (Zea *et al.*, 2024).

El almacenar granos implica contar con tecnologías adecuadas, en donde entran diferentes sistemas de almacenamiento para el pequeño o mediano productor como galpones, contenedores de plástico, costales, trojes, silos metálicos, la elección de estos dependerá, de la conveniencia de su uso, disponibilidad, facilidad para adquirirlo, relación costo beneficio (FAO, 2018).

El almacenamiento de granos implica ser expuestos a sufrir infinidad de riesgos de pérdidas tanto en cantidad, calidad, aspecto y pérdidas nutricionales donde los principales factores son la temperatura, humedad, hongos y plagas que son principalmente las que ocasionan la mayor afectación a los granos almacenados (Srzednicki, 2010). Una de las principales plagas que ataca al maíz almacenado es el coleóptero *S. zeamais*, debido su habilidad para volar se traslada fácilmente e infesta el grano de maíz incluso antes de ser cosechado, debido a sus hábitos de alimentación de romper el grano para ovipositar dentro de él, es considerado una plaga primaria que representa la principal pérdida de calidad del grano lo que

conlleva a buscar medidas de control efectivas asegurando la salud del consumidor (Jara, 2018).

El uso de moléculas químicas ha representado el método de control más fácil y efectivo por los productores al momento de almacenar sus granos, disminuyendo sus daños y pérdidas, sin embargo, el uso continuo de estas sustancias ha generado el desarrollo de resistencia de estos insectos además de poner en riesgo la salud de las personas por los residuos que generan (Bahar *et al.*, 2017). Es por ello que desde la última década se ha incrementado el monitoreo en la calidad e inocuidad de los alimentos imponiendo restricciones en los límites máximos de residualidad, haciendo que la ciencia y la tecnología enfoquen su atención en la creación de nuevas alternativas de control más amigables y saludables tanto como con el medio ambiente y el consumidor (Stefanazzi y Ferrero, 2011; Frederick y Subramanyam, 2016).

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

Evaluar la mortalidad de *Sitophilus zeamais* expuestos a ingredientes activos químicos combinados con diferentes nanopartículas bajo condiciones de laboratorio.

1.1.2 Objetivos específicos

Evaluar el efecto de Dimetoato y Bifentrina solos y potenciados con nanopartículas de cobre, grafito y plata sobre *Sitophilus zeamais*.

Determinar la CL₅₀ de los diferentes tratamientos para el control de *Sitophilus zeamais*.

1.2 Hipótesis

Se espera que al menos uno de los tratamientos evaluados sea efectivo en el control de *Sitophilus zeamais*.

I. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Historia y origen del maíz

El maíz es una planta originaria de México y Guatemala, ha sido denominada científicamente como *zeamais* perteneciente a la familia de las gramíneas, es una planta anual que en la actualidad es una fuente básica para la alimentación humana; existen dos teorías que refieren a su origen en la primera se menciona que el único centro de origen está ubicado en la cuenca del río Balsas en el estado de Guerrero México (Mier, 2025); la segunda teoría, es la teoría multicéntrica que considera cinco regiones de origen, cuatro en el centro y sur de México y una más en Guatemala, sin embargo hallazgos arqueológicos encontrados en la cuenca del río Balsas como fragmentos de cerámica, restos vegetales y utensilios de molienda que al ser analizados confirmaron la presencia de almidones y fitolitos de maíz, demostrando que el maíz se cultivaba y molía en México como parte de la alimentación desde el período precerámico (Caballero *et al.*, 2019).

El maíz ha sido la principal fuente de alimentación de la población latinoamericana, es junto con el arroz y el trigo el cereal más importante por su aporte nutricional, aporta el 15 % de las proteínas del mundo y el 20 % de las calorías, es considerado un alimento básico en la dieta de más de 200 millones de personas en el mundo, además de también ser utilizado en alimento para ganado y biocombustibles (Urango, 2018).

2.2 El maíz en México

México es considerado el centro de origen, diversificación y domesticación del maíz (Matzuoka *et al.*, 2002), es el cultivo con mayor superficie sembrada, además constituye en la dieta diaria de todos los mexicanos, el maíz figura con la cuarta parte de la ingesta calórica, puede ser utilizado en la producción de alimentos, para la ganadería y la agroindustria como biocombustibles (OECD-FAO, 2022), es por

ellos que desde el ámbito político, ganadero, agroindustrial, social, cultural es considerado el cultivo más importante de México (CONABIO, 2020).

Fue el primer cereal sometido a rápidas e importantes transformaciones tecnológicas en su forma de cultivo, tal como ha sucedido con la aparición de los híbridos; el éxito en los avances tecnológicos del cultivo de maíz estimuló una revolución agrícola generalizada en muchas partes del mundo (Simon y Golik, 2018). Es el primer cereal en rendimiento de grano por hectárea y el segundo, después del trigo, en producción total; es considerado de gran importancia económica a nivel mundial ya sea como alimento humano (uno de los granos alimenticios más antiguos que se conocen), como alimento para el ganado o como fuente de un gran número de productos industriales (Simon y Golik, 2018).

La producción de granos tiene como función principal asegurar el abasto de alimentos para la familia; los excedentes que se generan son destinados al mercado regional, constituyéndose así en una fuente de ingresos complementaria, que permite a la familia adquirir otros bienes de consumo (García *et al.*, 2015).

2.3 Importancia mundial

La domesticación del maíz es uno de los logros más importantes de la humanidad, en la cual una planta silvestre de México central se convirtió en el cultivo más productivo del mundo (Panda *et al.*, 2020).

La producción mundial del maíz en los últimos diez años (2012-2022) fue de 1120.8 millones de toneladas (Mt), siendo el grano más producido mundialmente, con una tasa de crecimiento media anual (TCMA) del 5.1 %; de esta producción el 62.4 % es aportado por tres países: Estados Unidos participando con un 31.8 %, en segundo lugar, China con el 22.8 %, y Brazil con un 7.9 %; Mexico aporta tan solo en 2.4 % con una tasa de crecimiento media anual del 1.9 % (FAO,2024; López *et al.*, 2021).

2.4 Producción nacional

En México el maíz representa una parte trascendental en el que hacer de los productores en el campo de mexicano, aunado a ser uno de los productos de mayor relevancia en la economía del ingreso de las unidades de producción, así como en la alimentación de las mismas familias en el sector rural. (Abarca *et al.*, 2023).

La producción de maíz estimada para 2024 fue de 24,326,508.24 Mt de las cuales, cuatro estados son los principales productores aportando el 49.54 % del total, entre los que destacan son Jalisco (15.95 %), Sinaloa (13.89 %), Michoacán (12.42 %), y Guanajuato (7.28 %), mientras que el 50.46 % restante lo conforman los demás estados de la república mexicana (SIAP, 2024).

2.5 Importancia de los granos almacenados

Los granos almacenados son una fuente importante para la alimentación de la población mundial, por las cualidades nutricionales que poseen, además de la infinidad de productos derivados que se pueden obtener (Okparavero *et al.*, 2024). Es por ello que los sistemas de almacenamiento postcosecha deben estar bien diseñados con las herramientas adecuadas para un control integrado, puesto que todos los productos de almacén están expuestos al ataque por insectos plaga (Ngoma *et al.*, 2024; Ziegler *et al.*, 2021).

En México no hay información exacta que indique el volumen de pérdidas de granos y semillas, no obstante, se estima que anualmente se pierde entre el 5 % y 25 % del total producido de maíz, frijol y trigo que son los principales granos básicos del país (Hernández y Carballo, 2014). El porcentaje de pérdidas de los granos almacenados depende de diversos factores, como el tiempo de almacenamiento o la estructura donde se resguardan (Mebeasilassie, 2004), sin embargo, del 24 % de pérdidas postcosecha a nivel mundial el 9 % corresponden a la infestación por plagas de granos almacenados en países desarrollados y el 20 % en países en desarrollo (Phillips, 2010), otros estudios demuestran que dichas plagas son responsables de pérdidas que oscilan entre el 10 % y el 60 % en países en

desarrollo (Mihale, 2009). Las pérdidas económicas ocasionadas en granos de cereales almacenados pueden alcanzar hasta los 420 Mt anuales en el mundo (Mesterházy *et al.*, 2020).

El principio del manejo y almacenamiento de los granos básicos es conservar la calidad del grano y evitar las mermas postcosecha (Obregon y Gómez, 2023). El almacenamiento de los granos durante largos períodos de tiempo se debe a que no hay una utilización rápida de los mismos, así como la distancia entre los lugares de producción y consumo; muchas veces los granos son almacenados debido a que el precio en el mercado no es favorable para una venta inmediata, así mismo la conservación de los granos es una técnica para resguardar los alimentos y satisfacer las futuras necesidades de las personas (Musso *et al.*, 2017).

Garantizar el almacenamiento del grano después de la cosecha, genera una preocupación en los productores, puesto que la incidencia de plagas generadas por las condiciones de almacenamiento como excesiva humedad, además de generar pérdidas en el volumen almacenado, también afecta la calidad del grano y por consecuencia afecta los ingresos esperados por la comercialización del mismo (Vera *et al.*, 2023).

Para asegurar las cosechas de los granos los agricultores emplean técnicas y estructuras de almacenamiento generalmente tradicionales, que dependerán de las condiciones ambientales donde se utilizarán (Obregon y Gómez, 2023). Las decisiones tomadas por los productores con respecto a sus prácticas de postcosecha son demasiado diversas, debido a que influyen condiciones ambientales de cada zona, el conocimiento diferente de alternativas, acceso a la tecnología y por su puesto la situación económica (Gonzales *et al.*, 2017).

Una adecuada preservación de los granos en almacén se debe principalmente a las temperaturas dentro de él, por lo que se debe almacenar en temperaturas bajas, ya que estas afectan el metabolismo del insecto, otro factor es la humedad del grano, se deben almacenar lo más seco posible, el proceso de secado del grano se debe

hacer reduciendo la humedad de manera gradual para evitar que se quiebre, una humedad óptima en maíz y trigo es del 13 % a 14 % (Daglish *et al.*, 2018).

2.6 Importancia de las plagas de almacén

El almacenamiento de productos para consumo humano es un hábitat donde conviven muchas especies de organismos, aves, hongos, bacterias, roedores, protozoarios, insectos siendo estos un factor causante de grandes pérdidas de la calidad de los productos; los impactos que provocan están relacionados en función de la especie plaga, sus hábitos, alimentación, morfología, ciclo biológico, velocidad del crecimiento de su población, dando como resultado pérdidas directas e indirectas (Aguilera, 2017). La presencia de plagas tiene un impacto directo en las condiciones de almacenamiento, traslado y conservación de productos, ocasionando alteraciones en los mercados, afectando casi todos los procesos de la cadena productiva, comprometiendo la seguridad alimentaria (Malpica y Miranda, 2016).

Las plagas de insectos cambian de acuerdo a diferentes factores, la región, época del año, sistema y tiempo de almacenamiento, así mismo las plagas presentes en los granos almacenados se clasifican de acuerdo al tipo de daño que ocasionan, considerándose plagas primarias a aquellas que atacan a granos enteros sin antecedentes de daño, estas son las más importantes en el período de almacenaje, alcanzan poblaciones muy grandes y mueren al agotar su fuente de alimento (García *et al.*, 2007).

Las plagas secundarias se distinguen por alimentarse de los granos que han sido perforados o atacados por las plagas primarias, o sufrieron algún daño mecánico, físico durante su cosecha o traslado lo que facilita la presencia de estas (Gutiérrez *et al.*, 2007).

La rapidez con la que las plagas destruyen los productos de almacén están, relacionadas con las prácticas de inocuidad; los insectos generan una adaptación a las condiciones del almacén que favorece la relación con el hospedante y por

consecuencia se incrementa la población (Aguilera, 2017), es por ello que los agricultores deben controlar factores físicos como humedad, temperatura, oxígeno, aireación, limpieza del grano, monitoreo continuo para evitar o disminuir la incidencia de la plaga (Blanco *et al.*, 2016).

La dispersión y propagación de las plagas de granos almacenados se da principalmente por el traslado de los granos de un lugar a otro, esto puede deberse a un vuelo activo de las mismas, se estima que casi mil especies de insectos son plagas en granos almacenados en todo el mundo, principalmente estas plagas pertenecen a dos órdenes como lo son coleóptera y lepidóptera (Ahmad *et al.*, 2021).

2.7 Importancia de los gorgojos

Se les considera una plaga primaria en el almacenamiento de los granos debido a su alta capacidad destructiva que tienen tanto larvas como adultos, perforando el endospermo para alimentarse, reduciendo la viabilidad del grano, los nutrientes y su peso, además de contaminar los productos almacenados con excremento o extremidades como patas, antenas o alas (Nwosu *et al.*, 2015). En los sistemas convencionales de almacenaje de granos las pérdidas cuantitativas y cualitativas ocasionadas por la presencia de gorgojos en zonas tropicales oscilan entre 18 % al 100 % y del 30 % al 52 % en un lapso no mayor a seis meses (Kumar y Klita, 2017; Nwsou, 2018; Gariba *et al.*, 2021; Gitahi *et al.*, 2021).

El gorgojo del maíz ocasiona hasta el 40 % de las pérdidas de la producción total en granos y productos de almacén, principalmente en países en desarrollo. *S. zeamais Motschulsky* (Coleóptera: curculiónido) es una de las plagas principales en granos almacenados (Nwsou, 2026).

El gorgojo del maíz se alimenta y ataca a una amplia variedad de hospederos como, maíz, trigo, arroz, sorgo (Ranum *et al.*, 2014; Farook *et al.*, 2019), centeno, semilla de algodón, avena, sarraceno, guisantes y cebada (Hagstrum *et al.*, 2012).

Entre las principales plagas que afectan la calidad de granos y semillas almacenadas destacan el gorgojo o bruco del frijol (*Acanthoscelides obtectus*), el gorgojo del trigo (*Sithophilus granarius* L.) y el picudo del maíz (*S. zeamaiz* M.) (FAO. 2010).

2.7.1 Daños directos

Su principal daño está asociado a la germinación del grano, la contaminación de fragmentos de los insectos los cuales pueden ser cancerígenos, o provocar alergias, además de producir compuestos químicos causando daño tanto a personas como animales (Fernández, 2013).

2.7.2 Daños indirectos

El crecimiento de las poblaciones altera la humedad y temperatura dentro del almacén, favoreciendo la aparición de microorganismos patógenos como hongos, además albergan o transmiten cepas resistentes a algunas moléculas o antibióticos (Fleurat, 2002).

2.8 Principales plagas de maíz en almacén

Especies como *Tribolium castaneum* o gorgojo castaño de la harina, el barrenador menor de los granos *Rhyzopertha dominica* y el picudo del maíz *S. zeamais* son considerados tres de los insectos plaga de almacén más destructivos a nivel mundial (Patiño *et al.*, 2021)

2.9 *Tribolium castaneum* H.

Conocido comúnmente como gorgojo castaño de la harina es una plaga cosmopolita pues ataca a muchos cereales y semillas, granos rotos o perforados, el adulto mide de 3 a 4 mm de largo, es delgado y de color cobrizo o marrón, se le puede identificar de otras especies del mismo género por los últimos tres segmentos antenales, ya que estos son proporcionalmente más anchos y están mejor definidos sus larvas son de color blanco que pueden medir entre 5 y 6 mm de largo (Devi y Devi, 2015).

Se le considera como una plaga secundaria de granos almacenados, pero una plaga primaria de harinas, debido a que su presencia se asocia con la incidencia de plagas primarias, ya que estas le facilitan alimentarse al perforar los granos previamente; la hembra llega a ovipositar entre 350 y 450 huevos que deposita de forma aislada en los granos, su desarrollo tarda hasta tres meses; la larva pasa a pupa dentro del grano infestado (García *et al.*, 2007).

Este insecto por sus hábitos polípagos ha favorecido su distribución cosmopolita en lugares de almacenamiento de granos (Campbell *et al.*, 2022). Sin embargo, *Tribolium castaneum* ataca otros productos principalmente derivados de la harina como galletas, pastas, especias, alimento de mascotas, nueces, de ahí que se le considera una plaga devastadora de productos almacenados (About-taleb *et al.*, 2016).

2.10 Barrenador del grano (*Rhyzopertha dominica*)

Rhyzopertha dominica (Fabricius) (Coleóptera: Bostrichidae) es una de las principales plagas de los granos de almacén debido a la capacidad de adaptación a diferentes ambientes o incluso condiciones de almacenaje; su capacidad de reproducción es muy grande por lo que su distribución es rápida (Seada y Hamza, 2023).

Se le considera una plaga primaria por la capacidad que tiene de quebrar el grano o perforarlo, facilitándole así la incidencia y sobrevivencia de plagas secundarias como, *Tribolium castaneum* y *Tribolium confusum* que se alimentan del grano dañado (Muniswamy *et al.*, 2023).

Rhyzopertha dominica o barrenador menor del grano posee un sistema enzimático tan eficiente que hace que su alimentación sea polífaga alimentándose de diferentes especies de granos (Naseri y Majd-Marani, 2022). Una vez iniciada la incidencia de *Rhyzopertha dominica* en los granos almacenados tiene la capacidad de interactuar con otros insectos plaga tanto primarios como secundarios potencializando así las

pérdidas en la producción que se estiman en más del 50 %, sin embargo, también es considerado un vector para hongos micotoxigénicos (Shah *et al.*, 2021).

2.11 *Sithophilus zeamais*

S. zeamais conocido como el picudo del maíz es un insecto cosmopolita, se considera una plaga primaria de los granos almacenados de maíz debido a que provoca disminución de calidad, peso y volumen del grano al realizar perforaciones al momento de alimentarse, por consecuencia afecta la viabilidad de la germinación, además de provocar que el producto sea menos apto para el consumo humano al generar mal olor, sabor, decoloración e incluso contaminación por micotoxinas que transmite esta especie como las aflatoxinas; la presencia de la plaga afecta el valor de mercado y dificulta su comercialización (Abdullahi *et al.*, 2014; Arrahman *et al.*, 2022; Bhusal *et al.*, 2019).

El impacto ocasionado a cereales y sus derivados representa un gran impacto económico pues se estiman pérdidas mundiales de aproximadamente 284.6 Mt en los granos almacenados anualmente (Camaroti *et al.*, 2018; Ojo *et al.*, 2016)

Su distribución mundial afecta principalmente zonas tropicales, templadas y subtropicales húmedas (Hong *et al.*, 2018), principalmente en países desarrollados se producen pérdidas de peso y calidad de los granos que oscilan hasta en un 60 % del peso en los primeros meses de almacenamiento (Lleke *et al.*, 2020).

La pérdida en la calidad de los granos estará en función de la severidad que el insecto provoque en el grano al alimentarse; el ataque de *S. zeamais* se identificará con agujeros realizados al momento de alimentarse, el resultado de la trituration de la semilla se presenta como harinas (Amelia, 2018). La incidencia muy alta de esta plaga ocasiona que las temperaturas se eleven dentro de los diferentes sistemas de almacenamiento, siendo así que exista una inadecuada conservación de los granos y una posible infestación de hongos (Simón *et al.*, 2018).

2.11.1 Clasificación taxonómica

Según (Borror, 1979) *S. zeamais* presenta la siguiente clasificación

Orden: coleóptera

Suborden: polífaga

Familia: curculiónidae

Subfamilia: curculinae

Género: *Sitophilus*

Especie: *zeamais*

2.11.2 Morfología

El tamaño de *S. zeamais* se ve relacionado directamente con el tipo de dieta que tiene, siendo así que su tamaño aumentará en semillas grandes y disminuirá en granos pequeños, esta plaga además de atacar los granos almacenados también se presenta en campo dañando los granos antes de ser cosechados (Arrahman *et al.*, 2022).

Los adultos de *S. zeamais* miden aproximadamente 4 mm de largo, son cilíndricos, poseen fuertes mandíbulas másticadoras, el cuerpo es de color oscuro y en sus alas élitro tiene dos manchas claras cada una, por su parte las hembras tienen la capacidad de ovipositar en toda su vida hasta 400 huevecillos, además de que su ciclo de vida está directamente influenciado por las condiciones de temperatura, siendo así que puede completarse en un mes o prolongarse si las condiciones no son las adecuadas (Granados, 2021; Savedra, 2022). Las condiciones óptimas para su desarrollo son temperaturas que van de los 15°C a los 35°C, humedad relativa entre 45% y 100% (Arrahman *et al.*, 2022)

2.11.3 Ciclo biológico

S. zeamais posee metamorfosis completa que consta de 4 estadios huevo, larva, pupa y adulto.

HUEVO: Las hembras realizan perforaciones en el grano donde depositarán sus huevos que recubrirán con un mucilago transparente para protegerlos, estos huevos eclosionarán entre 5 y 7 días desde su oviposición y darán origen a las larvas (García *et al.*, 2007; Rodríguez *et al.*, 2022).

LARVA: Son de color blanquecino sin patas, densas, tienen una cabeza marrón de 4 mm de largo, las larvas junto al adulto son las más destructivas debido a que se alimentan del endospermo del grano, perforan el pericarpio de los granos sanos lo que facilita la infestación por hongos y otras plagas como *Tribolium castaneum*, la etapa larvaria dura entre 25 y 30 días (García *et al.*, 2007; Rodríguez *et al.*, 2022).

PUPA: De color blanco con una longitud de 3 a 4 mm, esta etapa tiene una duración promedio de 6 días, finalmente se convierte en adulto cuando perfora el grano y sale de él (García *et al.*, 2007; Rodríguez *et al.*, 2022)

ADULTO: Miden de 2.5 a 4 mm de longitud, el color varío de café a negro, el aparato bucal del macho es corto y rugoso a comparación del de la hembra, que es menos arrugado más largo y más delgado, sus antenas son acodadas de 8 segmentos (Ruiz *et al.*, 2013). La vida útil de un adulto es de 4 a 5 meses con condiciones adecuadas y de 36 días sin alimento (Rita *et al.*, 2017; Okosun *et al.*, 2016), su ciclo de vida depende de la temperatura por lo que puede durar entre 30 y 113 días, produciendo entre 2 y 3 generaciones por año (García *et al.*, 2007; Rodríguez *et al.*, 2022).

1.12 Métodos de control

Con el fin de prevenir y controlar la infestación de las plagas de almacén se recomiendan buenas prácticas de almacenamiento, aplicación de insecticidas antes del almacenamiento, depósitos con condiciones adecuadas, selección de granos

limpios y restricción de aves y roedores (FAO, 2018). Por otra parte, también se emplean otras alternativas de manejo como prácticas culturales, físicas, químicas y biológicas (Morales *et al.*, 2020), con el fin de mantener condiciones adversas que limiten la reproducción y supervivencia de los insectos (FAO, 1993).

2.13 Control físico

Se basan en la manipulación de la temperatura dentro de los almacenes, cuando la temperatura excede los 18°C, se debe realizar un enfriamiento mediante la incorporación de aire frío o refrigerado que se realiza con un soplador, también se hace traspaleo del grano de un almacén a otro para generar ventilación (Tanguy y Crepón, 2020), este método ralentiza el desarrollo y actividad de las plagas (Hamel, 2014). El tratamiento térmico es también otra medida en el control de insectos, que consiste en alcanzar temperaturas al menos de 50°C utilizando aire caliente forzado, atmósfera controlada de alta temperatura, campo eléctrico, calentamiento solar o tratamiento con vapor (Hansen *et al.*, 2011; Porto *et al.*, 2017).

Para el control de *S. zeamais* se han empleado distintos insecticidas naturales, minerales como las zeolitas, mármol blanco que reflejaron un efecto anti insecto (Rodríguez *et al.*, 2017). La implementación de la tierra de diatomeas es un método de control físico, que posee dióxido de silicio amorfo (70-90 %) como ingrediente activo (Losic y korunic, 2017), su mecanismo de acción es adhiriéndose al cuerpo del insecto absorbiendo la capa cerosa que protege la cutícula, provocando deshidratación y posteriormente la muerte, sin embargo su efectividad se ve afectada al aumentar la humedad relativa; es por ello que la aplicación de este producto se debe realizar en temperaturas por debajo de los 15° C para obtener su mayor efectividad (Romero, 2016).

2.14 Orgánico o biorracional

2.14.1 Plantas insecticidas

Se han empleado plantas que destacan por tener acciones insecticidas como un método alternativo para el control de *S. zeamais*, sus formas de emplearse pueden ser en polvos, aceites y extractos (Martins *et al.*, 2022).

Los productos naturales en el control de plagas destacan por su baja persistencia en el medio ambiente, poca toxicidad para enemigos naturales, y su rápido control (Clyod, 2012). Sin embargo, su actividad biológica no siempre está asociada a la muerte del insecto, sus efectos pueden ser subletales que son igual de importantes que los letales, entre estos pueden ser tóxicos, repelentes, atrayentes, causar esterilidad modificar su comportamiento afectando sus hábitos de alimentación (Formentini *et al.*, 2016; Santana *et al.*, 2021).

2.14.2 Aceites esenciales

Han surgido fumigantes alternativos como los aceites esenciales de origen vegetal que poseen actividad insecticida contra una gran diversidad de insectos plaga entre ellos *S. zeamais*, estos nuevos fumigantes poseen alta volatilidad; los altos componentes dentro de su composición potencializan su actividad insecticida además reducir la probabilidad de adquirir resistencia (Oliveira *et al.*, 2017; Brito *et al.*, 2020).

2.15 Control químico

El gorgojo del maíz *S. zeamais* plaga principal en el almacenamiento de granos; la utilización de moléculas sintéticas como insecticidas son la principal herramienta para su control, o la que se utiliza con mayor frecuencia (Acevedo *et al.*, 2018). El uso de estas sustancias se da por su fácil acceso y efectividad como es el caso de diclorodifeniltricloroetano, fosfina, diclorvos, cipermetrinas (Attia *et al.*, 2020). Sin embargo, el uso desmedido afecta negativamente en el medio ambiente, pone en riesgo la salud humana y a organismos no diana, lo que puede generar poblaciones

resistentes por lo que la eficiencia de estos productos se ve afectada (De Andrade *et al.*, 2018; Sparks *et al.*, 2021), además de aumentar los costos de producción, adquirir equipo de aplicación adecuado y por su puesto personal capacitado (Finkler, 2011). Con las restricciones al uso de varias moléculas, puede originar una aplicación repetitiva de una lista más estrecha de insecticidas, siendo este uno de los factores más importantes para generar poblaciones resistentes de insectos (Kathage, 2018).

El uso de los insecticidas empleados en el control de plagas de los granos almacenados se puede clasificar en tres grupos, preventivos, curativos y de acción rápida (Abadia, 2013).

Los insecticidas preventivos son residuales generalmente líquidos o en polvo que evitan la infestación por un tiempo prolongado desde su aplicación; la manera de emplearlos se hace antes de recibir el grano en el almacén, o sobre el grano ya establecido, estos tienen la capacidad de controlar adultos y estadios juveniles, sin embargo, son incapaces de controlar fases que se desarrollan dentro del grano (Abadia, 2013).

En fines curativos controla plagas ya instaladas donde se utiliza fosfina que actúa como gas, capaz de controlar todos los estadios, pero al carecer de residualidad no brinda protección posterior de su aplicación (Abadia, 2013).

2.16 Bifentrina

La bifentrina es un insecticida sintético clasificado dentro de los piretroides de la tercera generación tipo I, y fue catalogada como molécula moderada de clase dos por la agencia de protección ambiental (WHO, 2009).

La implementación de la bifentrina en el sector agrícola, ganadero, y el hogar se ha dado principalmente por su hidroestabilidad, fotoestabilidad y su gran acción insecticida mucho mayor a otros piretroides utilizados (Yadav *et al.*, 2003).

2.16.1 Modo de acción

El modo de acción de la bifentrina interfiere los canales de sodio, de manera que afecta la transferencia de iones y la transferencia de impulsos nerviosos entre células causando una hiperexcitación al insecto y por consecuencia su muerte (IRAC, 2022).

La bifentrina se ha empleado como un insecticida químico en el control de *S. zeamais* en trigo almacenado generando en el insecto un efecto de derribo o parálisis, el insecto al momento de morir se muestra con los helitros levantados (Magano, 2021). Este efecto se origina a partir de que la molécula de la bifentrina se une a la proteína asociada al canal de sodio, afectando la abertura y cierre de esta, evitando que la neurona regrese a su estado de reposo, además afecta la permeabilidad de sodio de 500 a 5000 veces lo que origina un bloqueo de la transmisión de los impulsos nerviosos y la muerte del insecto (Guyton *et al.*, 2006).

2.17 Dimetoato

El dimetoato es un insecticida y acaricida de amplio espectro que pertenece a los organofosforados actúa por contacto y de manera sistémica (IPCS, 1989). Es un insecticida muy estable en soluciones ácidas, sin embargo, se degrada rápidamente en soluciones alcalinas (Arubi y Oloche, 2023).

El dimetoato es utilizado para el control de una diversidad grande de insectos plagas industriales, domésticas y agrícolas (Srivastava *et al.*, 2010), se emplea en cultivos agrícolas arbóreos y ornamentales; se registró por primera vez en estados unidos en 1962, considerándose de uso general, se estima que su uso es de 1.8 millones de libras de ingrediente activo anuales, empleándose principalmente en maíz, alfalfa, algodón y trigo, representando el cultivo de alfalfa un 64 % del consumo total (Mallampalli, 2007),

El dimetoato es un insecticida que se utiliza en el control de insectos chupadores, moscas, ácaros, insectos perforadores de granos *Tribolium castaneum*, *Sitophilus* spp, en cultivos como chile, tabaco, algodón, frutas y hortalizas (Bharti *et al.*, 2023).

2.17.1 Modo de acción

Su mecanismo de acción es inhibiendo la enzima acetilcolinesterasa que hidroliza al neurotransmisor acetilcolina, esta inhibición provoca una acumulación de acetilcolina, afectando a los receptores en el sistema neuromuscular por una sobre activación provocando una hiperexcitación que origina la muerte del insecto entre las 12 y 48 h después de la ingestión del ingrediente activo (Arubi y Oloche, 2023).

2.18 La nanotecnología en la agricultura

Cada vez el mundo enfrenta nuevos desafíos debido al incremento constante de la población para satisfacer las necesidades alimenticias, pues se estima que para 2050 se debe alimentar a 10 mil millones de personas (GEO, 2020), lo que implicaría incrementar la producción de alimentos un 60 %, para lograrlo se debe proteger a los cultivos de insectos, patógenos, malezas etc. (Navas y García, 2020), es por ello que la búsqueda de nuevas fuentes de energía, el cambio climático, el mejor aprovechamiento de los recursos naturales, mejorar aumentar y conservar la producción de alimentos se vuelve cada vez más difícil, es así como la nanotecnología surge como una alternativa para proteger y cubrir las necesidades alimenticias de las próximas generaciones (Sosa, 2015).

La nanotecnología (NT) en el sector agrícola ha generado un gran impacto en los últimos años recibiendo atención en diferentes áreas, mejorando la calidad de los insumos, procesos y materias primas (Dasgupta *et al.*, 2015).

El empleo de la nanotecnología en la agricultura es muy diverso, desde la elaboración de nano pesticidas encapsulados para su liberación controlada (Grillo *et al.*, 2016), así como eficientizar y hacer más sustentable las aplicaciones y el uso de pesticidas (Nuruzzaman *et al.*, 2016).

La nanotecnología incrementa la eficacia de los insecticidas convencionales, reduciendo la dosis de aplicación de manera muy significativa a las requeridas, favoreciendo a los ecosistemas y organismos no diana (Xue *et al.*, 2014).

La fabricación de los nanomateriales está agrupada en 4 clasificaciones, materiales a base de carbón, materiales basados en metales, dendrímeros y compuestos, que son fabricados por métodos específicos de cada material (Mukhopadhyay, 2014).

2.19 La nanotecnología en el control de plagas

El uso indiscriminado de productos químicos contra el control de insectos plaga afecta negativamente las poblaciones de enemigos naturales, provoca contaminación ambiental, afecta la salud humana, degradación del suelo y entre muchas otras cosas más (Hernández *et al.*, 2019; Carranza-Patiño *et al.*, 2023). Es así que la agroindustria toma como una alternativa reciente hacer uso de la nanotecnología, la cual permite la manipulación de los materiales a nivel nanoescala, la nanotecnología dentro de la agricultura permite realizar fertilizantes, sensores, plaguicidas como los insecticidas (Paramo y Col, 2020), por medio de la fabricación y uso de las nanopartículas, las cuales son materiales de pequeñas dimensiones menores a 100 nanómetros en cualquiera de sus dimensiones largo, ancho y alto (Singh *et al.*, 2017).

Los nanomateriales poseen propiedades las cuales ayudan a que la penetración sea más rápida y también aumentan su grado de toxicidad que posee un material en su tamaño normal (Duante, 2022).

Las nanopartículas han sido probadas con una diversidad muy grande de insectos en la agricultura (Pavela *et al.*, 2017). Las NPs provocan estrés oxidativo en los tejidos del insecto (Mao *et al.*, 2018; Benelli, 2018). Las NPs afectan directamente exoesqueleto degradando las proteínas y enzimas, lo cual provocara la disminución de la permeabilidad de la membrana además de alterar la fuerza motriz inmovilizando al insecto y provocando ataxia y su inanición (Rai *et al.*, 2014; Benelli, 2016).

2.20 Nanopartículas de plata

Las nanopartículas de plata (NPsAg) han sido estudiadas continuamente por la diversidad de propiedades, las cuales pueden variar dependiendo del método de síntesis empleado, siendo de interés agronómico por sus capacidades antibacterianas e insecticidas que posee (Nie *et al.*, 2023; Pryshchepa *et al.*, 2020).

La capacidad insecticida que poseen las NPsAg está influenciada por varios mecanismos de acción, ya que interactúan con la estructura celular del insecto alterando las membranas celulares induciendo a un estrés oxidativo generando especies reactivas de oxígeno (ROS), provocando la degradación de componentes esenciales de la célula como el ADN, lípidos y proteínas (Tharani *et al.*, 2024).

Las NPsAg también interfieren en la actividad enzimática de los insectos afectando las enzimas antioxidantes y desintoxicantes alterando sus funciones metabólicas causando la muerte del insecto (Nair y Choi, 2011; Tharani *et al.*, 2024).

Por último, una liberación controlada de iones de plata afecta las funciones de las proteínas al unirse a grupos tiol originando una citotoxicidad, todos estos mecanismos de acción le dificultan a los insectos generar resistencia, ofreciendo una mejor efectividad sobre los plaguicidas convencionales que comúnmente se dirigen por una sola vía fisiológica (Tharani *et al.*, 2024).

Las NPsAg han sido estudiadas en el control de ácaros *Tetranychus urticae*, utilizando el método inmersión de hojas, demostrando que las NPsAg fueron altamente efectivas alcanzando una mortalidad de 96 % en la concentración más alta (Sharifian *et al.*, 2016).

Las NPsAg mostraron efecto sobre la actividad de la proteasa intestinal de *Helicoverpa armigera*; donde inhibieron la actividad de la enzima desde un 50 % hasta 70 %, además de reducir el peso de las larvas y su tasa de supervivencia (Kantrao *et al.*, 2017).

Alif y Thangapandiyan (2019), evaluaron el efecto de las nanopartículas de plata contra *Tribolium castaneum*, con el objetivo de comparar la eficiencia insecticida de las NPsAg contra una molécula química como malatión; en el experimento se evaluó la tasa de mortalidad, disuasión de la oviposición, actividad repelente y alimentaria, donde los resultados mostraron que la combinación de malatión y nanopartículas de plata tienen el mayor efecto insecticida contra *Tribolium castaneum*.

2.21 Nanopartículas de cobre

Los nanomateriales de cobre son uno de los más importantes debido a sus características, usos y por lo económicos para su fabricación, además de proporcionar mayor superficie específica o efectiva a los fertilizantes e insecticidas, favorecen la incorporación de fertilizantes con mayor protección (Gabal *et al.*, 2018).

El cobre se ha implementado en la utilización de agroquímicos a nanoescala como nanosensores, nanopesticidas, nano fertilizantes y nanoformulaciones revolucionando la agricultura buscando que las prácticas agronómicas sean más eficientes y sostenibles con el medio ambiente (Singh *et al.*, 2021). Los nano agroquímicos han generado mayor interés al ser más eficientes que los agroquímicos convencionales, beneficiando a los agricultores al tener mejor rendimiento cualitativo y cuantitativo y un mejor costo beneficio (Qazi y Dar, 2020).

Se ha demostrado que las NPsCu son defensores de las plantas, pues son muy eficientes en el manejo de enfermedades fúngicas y bacterianas al degradar la pared celular y cambiar la función de los organelos lo que origina la muerte del patógeno (Rai *et al.*, 2018). Las Bio-CuNPs se utilizan para el control de plagas en granos almacenados como *Tribolium castaneum*, *Sitophilus granarius* y *Rhyzopertha dominica*, a partir de la síntesis de metabolitos presentes en la biomasa de *Aspergillus Niger* (El- Saadony *et al.*, 2020; Badawy *et al.*, 2021).

Las NPsCu afectan las enzimas relacionadas con el estrés oxidativo, provocando muerte celular en los insectos; los nanopesticidas metálicos se unen a las proteínas

S y Y, al ADN afectando la permeabilidad de la membrana celular (Vivekanandhan *et al.*, 2016; Benelli, 2018).

Se han evaluado las nanopartículas de cobre utilizando extracto de *Annona squamosa*, para el control de *Tenebrio molitor*, donde las larvas fueron expuestas a unas dosis bajas obteniendo una mortalidad significativa, en donde se observó que las nanopartículas afectan el crecimiento y desarrollo de las larvas (Vivekanandhan *et al.*, 2021).

2.22 Nanopartículas de grafito

El descubrimiento del grafeno y los nanomateriales bidimensionales (2D) generó un gran interés debido a sus propiedades extraordinarias que pueden ser aplicables en sectores industriales, científicos y agrícolas (Lampiri *et al.*, 2024).

Para la implementación del grafeno en múltiples sectores donde se puede utilizar la ISO (Organización Internacional de Normalización) denominó diferentes materiales 2D relacionados con el grafeno (GR2M); entre los que destacan, óxido de grafeno (GO), grafeno oxidado, grafeno en pocas capas, y las nano plaquetas de grafeno (Chimene *et al.*, 2015).

En el sector agrícola los (GR2M) se han investigado en diferentes aplicaciones como: estimuladores de crecimiento, fertilizantes de liberación controlada, agentes antifúngicos, mejoradores de suelo, agentes antibacterianos, en la encapsulación de micronutrientes y en la eliminación de contaminantes del suelo generalmente producidos por pesticidas (Zaytseva y Nuemann, 2016; Tung *et al.*, 2017; Andelkovic *et al.*, 2018).

En el control de plagas los estudios realizados a los GR2M están relacionados a que estos son portadores de ingredientes activos, mejorando las formulaciones de los insecticidas convencionales teniendo la capacidad para incrementar su rendimiento utilizando una menor cantidad de dosis y reduciendo los costos de producción (He *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2019).

Se ha determinado la toxicidad de los GR2M en organismos modelos (Wang *et al.*, 2014), donde se demostró por primera vez la efectividad insecticida directa de materiales de grafeno contra plagas de los granos almacenados como los gorgojos (Dziewięcka *et al.*, 2016). Además, se han evaluado dos polvos de grafeno con diferentes características para el control del gorgojo del arroz (*Sitophilus oryzae*), barrenador menor del grano (*Rhyzopertha dominica*) y el escarabajo de la harina (*Tribolium castaneum*), donde se ha demostrado la capacidad del grafeno para causar una alta mortalidad en los insectos, en donde el grafeno actúa adhiriéndose al cuerpo del insecto, evitando que este lleve a cabo sus funciones vitales (Lampiri *et al.*, 2024).

III MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Ubicación del experimento

El experimento se realizó en el laboratorio de Toxicología, en el Departamento de Parasitología, perteneciente a la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro ubicada en Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.

3.2 Establecimiento de colonia de *Sitophilus zeamais*

La colonia de insectos fue proporcionada por el laboratorio de Toxicología perteneciente a la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro

La colonia se mantuvo en un frasco de plástico donde se colocó maíz previamente refrigerado, el maíz se mantuvo 48 h en refrigeración con la finalidad de que estuviera completamente libre de plagas y tener la certeza de trabajar únicamente con *S. zeamais*. Para mantener viva la colonia de gorgojos esta se alimentaba directamente de los granos de maíz, además este se cubrió con una tela organza asegurada con ligas para evitar que los insectos se salieran, se colocó en un lugar seguro y dejamos que la colonia incrementará su población para iniciar los bioensayos.

3.3 Establecimiento de los bioensayos

Se evaluaron dos insecticidas químicos Dimetoato y Bifentrina solos y combinados con nanopartículas de grafito, cobre y plata al 3 % y al 10 % a través del bioensayo por película residual (Orozco *et al.*, 2009) en cajas Petri, las concentraciones evaluadas fueron 100, 1000, 2000, 3000, 4000, 5000 y 6000 ppm con tres repeticiones cada una, para evaluar la mortalidad de *S. zeamais*.

3.4 Descripción de los bioensayos

Para la evaluación del bioensayo se prepararon las concentraciones en vasos de precipitado con 30 ml de agua destilada en donde se agregó la cantidad de

nanopartículas e insecticidas correspondientes a cada concentración, las cuales mediante la ayuda de una varilla se mezclaron. Posteriormente se tomó con una micropipeta 1 ml de cada tratamiento para colocarlo dentro de la caja Petri distribuyendo completamente sobre la superficie de la caja retirando el exceso. Las cajas se dejaron secar 24 h antes de colocar los gorgojos.

Se colocaron 30 individuos adultos dentro de cada caja, que fue sellada para evitar que se escaparan, pasadas las primeras 24 h se inició el conteo de individuos muertos.

Se evaluó la mortalidad de *S. zeamais* a 24, 48 y 72 h en donde se tomó el criterio de considerar muerto a un individuo si este no presentaba respuesta a estímulos al ser expuesto sobre una plancha a una temperatura de 30 °C y ser pinchado con un pincel.

3.6 Análisis estadístico

Las mortalidades obtenidas se analizaron mediante un análisis de varianza (ANOVA) y comparación de medias aplicando la prueba de Tukey (0.005), a los datos obtenidos se les aplicó una prueba de dosis-respuesta para calcular la concentración letal media CL_{50} utilizando el programa estadístico (Statistical Analysis System) SAS, versión 9.0.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez recopilados los datos de la mortalidad obtenida en cada uno de los diferentes tratamientos. El cuadro 1 nos muestra la mortalidad obtenida de la evaluación de bifentrina sola y en combinación con nanopartículas de cobre, grafito y plata mismas que fueron evaluadas en una concentración del 3 y 10 %, en donde todos los tratamientos tuvieron igual o mayor efectividad respecto al producto solo (P.S), en donde las NPsGr al 3 % y 10 % a una concentración de 6000 ppm obtuvieron la mayor mortalidad con un 70 % y 66.67 % respectivamente, seguidos de 5000 ppm de NPsGr al 3 % con una mortalidad del 66.67 %. Las mortalidades obtenidas en el gorgojo del maíz al ser tratadas con bifentrina en combinación de los NPsAg sobresalen los tratamientos de 6000 ppm al 3 y 10 % de las NPsAg donde se obtuvo una mortalidad del 55.56 y 56.67 % respectivamente, finalmente las NPsCu a 6000 ppm mostraron el efecto similar en comparación con la bifentrina, donde el NPsCu al 3 % con 54.44 % de mortalidad apenas supero la mortalidad del producto solo, por último las NPsCu al 10% obtuvieron la misma mortalidad con tan solo el 53.33 %. Jafir y colaboradores (2021), sintetizaron NPsAg a partir de *Ocimum basilicum* L. con el fin de evaluar el efecto insecticida contra *Spodoptera litura*, comparándolos contra algunos insecticidas convencionales de distinto modo de acción en donde las nanopartículas por si solas presentaron la mayor mortalidad en larvas del segundo estadio desde un 22-97 %, Coragen (18-92 %), Proclaim (13-78 %), Tercero con la mortalidad más baja en (12-67 %), sugiriendo como posible alternativa las NPsAg ante la resistencia a insecticidas. Ghrair y colaboradores (2018), demostraron mediante la combinación de spinosad y NPsAg que es posible reducir el uso de moléculas químicas, en donde la mezcla de ambos obtuvo mortalidades muy similares combinados y spinosad por sí solo, la mezcla de spinosad al 75 % y NPsAg al 25 % y spinosad al 100 % sobre *Trips tabaci* obtuvieron una mortalidad del 100 % lo que indica una disminución de este ingrediente activo para el control de plagas.

Roque-Enriquez y colaboradores (2025), evaluaron la combinación de NPsGr al 1 %, 3 %, 5 % y 10 % con Lambda cihalotrina, obteniendo como resultado un

incremento en la mortalidad en combinación de los materiales respecto al ingrediente activo por sí solo a partir de las 10 ppm de NPsGr en las diferentes concentraciones, sin embargo, todos sus tratamientos a partir de las 2000 ppm tuvieron un incremento en la mortalidad más significativo, superando en todos ellos una mortalidad del 83 %, respecto al ingrediente activo solo que alcanzo el 76.1 % de mortalidad. Gao y colaboradores (2021), realizaron un experimento para el control de *T. urticae* mediante bifentrina sola y en combinación de NPsGr (5-5) obteniendo mortalidades más altas en la combinación (84 %) que en bifentrina sola (68 %).

Alfaro y colaboradores (2025), evaluaron la actividad insecticida de NPsCu en comparación de nanomateriales de Zn, Mn y un extracto acuoso *Azadirachta indica* sobre *Tribolium castaneum* en donde las NPsCu registraron mortalidades del 18 % sin embargo el extracto por sí solo no mostró mortalidades muy altas pues fueron del 26 %, la combinación de las NPsCu+Zn+ *A. indica* si lograron mortalidades por encima del 80 % lo que indica un efecto de sinergismo que existe al combinar estos materiales, puesto que los NPs al tener iones metálicos y estos al ser liberados de manera lenta potencializan la eficiencia del control de plagas (Castillo *et al.*, 2020). Malandrakis y colaboradores (2024), evaluaron la toxicidad de deltametrina y su combinación con NPsCu para el control de la mosca de la oliva *B. oleae*, en donde deltametrina a las dosis recomendadas en aplicación por espray causo mortalidades bajas que van entre 33 % y 60.71 %, sin embargo, la mezcla de ambas alcanzó mortalidades ligeramente por encima del 80 %, además de reducir el número de descendencia, de hembras y pupas.

Tabla 1: Mortalidad de *S. zeamais* después de 72 h expuestas a bifentrina en combinación de nanopartículas de cobre, grafito y plata.

Bifentrina con nanopartículas de Cu, Gr y Ag							
ppm	P.s	Cu 3 %	Cu 10 %	Gr 3%	Gr 10%	Ag 3%	Ag 10 %
100	18.89 g	23.33 g	27.78 f	10 g	6.67 g	27.78 g	10.00 g
1000	38.89 F	43.33 f	40.00 e	27.78 f	36.67 f	30.00 f	31.11 f
2000	42.22 E	44.44 e	53.33 a	41.11 e	38.89 e	35.56 e	35.56 e
3000	44.44 D	45.56 d	43.33 d	42.22 d	40.00 d	37.78 d	43.33 d
4000	45.56 C	46.67 c	50.00 c	46.67 c	41.11 c	44.44 c	45.56 c
5000	48.89 B	50.00 b	51.11 b	66.67 b	46.67 b	48.89 b	47.78 b
6000	53.33 A	54.44 a	53.33 a	70.00 a	66.67 a	55.56 a	56.67 a

P.s = Producto solo

Las letras ^{a,b,c,d} indican la diferencia significativa ($p < 0.05$) en concentraciones del insecticida (columnas) para un mismo nivel de NPsGr, NPsCu, NPs Ag.

En el cuadro dos se aprecia la mortalidad de dimetoato de igual manera en combinación de NPsCu, NPsGr y NPsAg al 3 % y 10 % siendo evaluado solo, en donde las mortalidades fueron muy sobresalientes en todos los tratamientos siendo NPsGr al 3 y 10 % a una concentración de 6000 ppm los que mayor impacto tuvieron sobre la mortalidad de *S. zeamais* con un 98.89 % y el 100 %, seguido de NPsGr al 10 % a una concentración de 5000 ppm con una mortalidad de 98.89%, de igual manera las NPsCu mostraron una excelente mortalidad con 96.67 % y 97.78 % al 3 y 10 % respectivamente y por ultimo las NPsAg fueron quienes mostraron el menor porcentaje de mortalidad con 90 % al 3 % sin embargo al 10 % igualo la mortalidad de algunos tratamientos como lo fue cobre al 3 % con 96.67 % de mortalidad.

Roque-Enriquez y colaboradores (2025), evaluaron el dimetoato solo y combinado con NPsGr al 3%, y 10% para el control de *B. cockerelli* a algunas concentraciones, obteniendo mortalidades muy similares en donde con 3000 ppm y NPsGr al 3 % alcanzo una mortalidad de 87.7 % y en la misma concentración al 10 % un 95.8 %. Wang y colaboradores 2018 mediante la combinación de óxido de grafeno con imidacloprid comprobaron el aumento de la eficiencia insecticida, que por sí solo

tiene un control del 51 % sobre el barrenador asiático del maíz y combinados un control del 100 % asegurando que los bordes del grafeno rompían la cutícula del insecto favoreciendo el control del mismo.

Alfaro y colaboradores (2023) evaluaron el efecto insecticida de las NPdsCu, partiendo de la síntesis de sales metálicas como sulfato de cobre, sobre *T. castaneum* obteniendo mortalidades superiores al 65 % luego de 96 h. Este efecto insecticida se ve relacionado con el número de iones presentes en la solución, siendo las nanopartículas mono y bimetálicas más efectivas que las trimetálicas. Guyasa y colaboradores (2026), evaluaron el efecto insecticida de las NPsCu sobre *S. zeamais* observando mortalidades del 100 % en 16 días de tratamiento, asegurando que son una alternativa saludable al no ser tóxica para humanos, además de impactar en la germinación del grano.

Martínez y colaboradores (2026), demostraron la actividad insecticida de las NPSAg al ser empeladas en cuatro especies de insectos de productos almacenados entre ellos *Sitophilus granarius* alcanzando un porcentaje de mortalidad del 76.67 %, además de lograr el 100 % de mortalidad de *Tribolium confusum* ambas en una concentración de 1000 ppm Zavala y colaboradores (2024), comprobaron el efecto insecticida de las NPsAg sobre *Diaphorina citri* a partir de la síntesis verde, logrando mortalidad de 78.69 y 80.14 % a concentraciones de 64 y 128 ppm luego de transcurrir 72 h de la aplicación.

Tabla 2: Mortalidad de *S. zeamais* después de 72 h expuestas a Dimetoato en combinación de nanopartículas de cobre, grafito y plata.

Dimetoato con nanopartículas de Cu, Gr y Ag							
ppm	P.s	Cu 3 %	Cu 10 %	Gr 3%	Gr 10%	Ag 3%	Ag 10 %
100	27.78 e	46.67 f	50.00 f	46.67 f	63.33 f	21.11 f	18.89 f
1000	61.11 d	88.89 e	85.56 e	72.22 e	88.89 e	62.22 E	60.00 e
2000	66.67 c	91.11 d	88.89 d	75.56 d	93.33 d	75.56 d	75.56 d
3000	71.11 b	92.22 c	92.22 C	87.78 c	96.67 c	84.44 c	83.33 c
4000	73.33 a	94.44 b	95.56 b	93.33 b	98.89 b	85.56 b	86.67 b
5000	73.33 a	96.67 a	97.78 a	98.89 a	100.00 a	90.00 a	96.67 a

P.s = Producto solo

Las letras ^{a,b,c,d} indican la diferencia significativa ($p < 0.05$) en concentraciones del insecticida (columnas) para un mismo nivel de NPsGr, NPsCu, NPsAg.

La CL₅₀ registrada para bifentrina fue de 5120 ppm, sin embargo al ser combinado con NPsGr al 3 % presentó la menor CL₅₀ de 3060 ppm siendo esta la más baja de todas, representando una relación de sinergia (RS) de 1.67 veces más, posteriormente las nanopartículas de cobre al 10% presento una CL₅₀ de 3830, y una (RS) de 1.34 veces más, si bien todos los tratamientos a excepción de las NPsAg al representaron CL₅₀ más bajas en relación al control químico de *S. zeamais* se puede confirmar que estos nanomateriales tienen la capacidad para potencializar el efecto insecticida de bifentrina

La capacidad que tienen la NPsGr para reducir las dosis de insecticidas coinciden con otros registros, Li y colaboradores en (2022), reportaron que el óxido de grafeno (GO) actuaba como sinergista para el control de larvas de *Spodoptera frugiperda* en combinación de insecticidas como Spinetoram, metoxihidrazida, betacipermetrina y clorantraniliprol , en donde la CL₅₀ para clorantraniliprol era de 14.12 ppm, mientras que la CL₅₀ de los nanocompuestos GO- clorantraniliprol era de 11.00 ppm, lo que representa que GO aumenta 1.56 veces la actividad insecticida, de igual manera GO puede aumentar el efecto insecticida de betacipermetrina, metoxihidrazida y Spinetoram en 1.54, 2.53, y 1.74 veces, siendo estos muy

similares a los resultados obtenidos de las NPsGr en combinación de bifentrina. Wang y colaboradores (2019), evaluaron la actividad sinérgica de los nanomateriales a base de óxido de grafeno, para el control del barrenador asiático del maíz, en combinación de B-ciflutrina, Monosultap e Imidacloprid, en donde la combinación de GO-Ciflutrina, GO-Monosultap y GO-Imidacloprid mostraron una mejor efectividad en 2.1, 1.51 y 1.813 veces mayores que las logrados por cada insecticida por sí solo. Chen y colaboradores (2022), demostraron mediante la combinación de lamda-cihalotrina y grafeno el control del gusano del algodón reduciendo una cuarta parte de la dosis ya que inhibe la longitud y el peso corporal de *Helicoverpa armigera*.

Uribe y colaboradores (2025), evaluaron extractos higuier y etos en combinación de NPsCu donde redujo la CL₅₀ de los extractos por si solos de 183-74 ppm a 166.96 ppm para higuier-Cu y 195.17 ppm a 166.66 ppm para etos- Cu, sobre el control de *R. dominica*, demostrado la capacidad insecticida que tienen las NPsCu sobre insectos, de igual manera El-Saadony y colaboradores (2020), evaluaron el efecto insecticida de las NPsCu por si solas sobre *T. castaneum* al evaluar 1,3, 5 días y obtener una CL₅₀ de 36.89 ppm que representa un buen control sobre *T. castaneum* confirmando la actividad insecticida que poseen las NPsCu, esto se debe al movimiento de las NPs por medio de los vasos sanguíneos, dentritas y axones del insecto ocasionando un estrés oxidativo y por consecuencia la muerte (Oberdörster *et al.*, 2005)

Abdel y colaboradores (2022), demostraron el efecto insecticida de las NPsAg para el control de tres especies de ácaros comparándolos con bifentrina en donde las CL₅₀ en las nanos fueron menores que bifentrina 29.3 ppm, 43.9 ppm y 27.4 ppm respecto a las de bifentrina 43.3 ppm, 38.9 ppm y 31.6 ppm sobre *Phyllocoptruta oleivora* Ashmead, *E. orientalis* Klein y *B. obovatus* donnadieu, además de mostrar una mortalidad selectiva 23 veces la CL₅₀ de bifentrina. Almadiy y colaboradores (2018), comprobaron la capacidad insecticida de las NPsAg al evaluar la mortalidad de larvas y adultos del escarabajo khapra (*T. granarium*), mediante el uso de alcaloides de harmala solos y en combinación con las NPsAg en donde la CL₅₀ para

larvas y adultos de los alcaloides solos fueron de 61.7 ppm y 46.1 ppm, sin embargo las CL₅₀ para los alcaloides en combinación con las NPsAg mostraron una reducción significativa de entre 4 y 6 veces, siendo la CL₅₀ para larvas de 11.4 pm y para adultos de 10.2 ppm demostrando un claro efecto de la potencialización de los nanomateriales.

Tabla 3: Concentración letal media en *S. zeamais* de Bifentrina a diferentes concentraciones de nanopartícula de cobre, grafito y plata a las 72 h.

Bifentrina						
Concentración de NPs	CL ₅₀ (ppm)	LFI	LFS	Ec. Predicción	P. valor	RS
Control	5120	3211	10700	$y=-1.8517+0.4992$	<0.0001	
Cu 3%	4409	2600	10393	$y=-1.5306+0.4199$	<0.0001	1.16x
Cu 10%	3830	2118	10093	$y=-1.3089+0.3652$	<0.0001	1.34x
Gr 3%	3060	1878	5706	$y=-3.4525+0.9004$	<0.0001	1.67x
Gr 10%	4302	2478	11684	$y=-3.1325+0.8620$	<0.0001	1.19x
Ag 3%	9821	4689	54506	$y=-1.4269+0.3574$	0.0001	0.52x
Ag 10%	5045	3658	7859	$y=-2.7992+0.7559$	<0.0001	1.01x

CL₅₀ concentración letal media, LFI: Límite fiducial inferior, LFS: Límite fiducial superior, RS: Relación de sinergia en valores de CL₅₀.

La CL₅₀ obtenidas para dimetoato solo sobre *S. zeamais* fue de 548.45 ppm, sin embargo, al ser combinadas con NPsCu al 10 % la CL₅₀ fue de 102.55 ppm. el punto más alto de efectividad lo alcanzo con las NPsGr al 10 % al mostrar una CL₅₀ de 53.45 ppm, con una relación de sinergia de 5.37 veces y 10.26 veces más respectivamente, NPsAg al 3 % y 10 % fueron las de menor eficiencia registrando una CL₅₀ de 493.65 y 530.89 ppm respectivamente, con una RS de 1.11 y 1.03 veces más respectivamente.

La capacidad que tiene el óxido de grafeno para reducir las CL₅₀ es sobresaliente tal como lo demuestran Liu y colaboradores (2022), al controlar *P. xylostella* mediante la combinación de abamectina y nanomateriales a base de óxido de

grafeno en donde abamectina por si sola necesita una CL_{50} de 1.53 ppm y la mezcla de ambos tan solo 0.996 ppm lo que representa el 65% del valor de abamectina. Roque-Enriquez y colaboradores (2025), demostraron que la mezcla de dimetoato y nanopartículas de grafito redujeron hasta 8.59 veces más, el uso de esta molécula química al controlar *B. cockerelli*, puesto que la CL_{50} para dimetoato fue 492.357 ppm y la combinación de ambas tan solo se obtuvo una CL_{50} 57.316 ppm, por lo que las NPsGr son una opción muy importante a considerar en el control de plagas.

Alif y Thangapandiyan (2019), evaluaron la combinación de malatión y NPsAg sobre *T. castaneum* determinando que el insecto era susceptible a una solución mixta de estos ya que afecta en mayor porcentaje la tasa de oviposición (71.5 %), a diferencia de dimetoato (45.11), aunque las CL_{50} son muy similares para dimetoato (4.287 ppm) y para la solución mixta (4.714 ppm) es muy relevante debido a los problemas que ocasiona malatión para el ser humano y al medio ambiente, siendo las NPsAg una solución a la reducción del uso de esta molécula química. Aisvarya y colaboradores (2023), demostraron el efecto que poseen las NPsAg al controlar *S. oryzae* mediante dos formas de sintetización de las nanopartículas por la vía química y biológica, obteniendo una CL_{50} de 40.16 ppm para las NPs Ag sintetizadas químicamente y 24.69 ppm para las biológicas, respecto al testigo que fue malatión con una CL_{50} de 4.73, demostrando que estos nanomateriales son una alternativa muy prometedora en el control de *S. oryzae*, además de favorecer la germinación de las semillas.

Rivera y colaboradores (2025), demostraron el efecto sinergista que poseen las NPsCu al comparar el control que ejercen dos extractos solos y en combinación con las NPsCu sobre *S. oryzae*, en donde para el primer extracto higuier se requiere una CL_{50} de 81.8 ppm y la mezcla con cobre una CL_{50} de 71.8 ppm, de igual manera para el segundo tratamiento la CL_{50} fue menor en la mezcla con 79.2 ppm respecto al extracto en donde la CL_{50} fue mucho más alta con 102.2 ppm, lo que favorece al uso de NPsCu para reducir el ingrediente principal en el control de las plagas. Abdulwahab y colaboradores (2024), comprobaron el efecto insecticida que poseen NPsCu por si solas al evaluar la mortalidad y larvas de *Aedes aegypti* comparándolo

con extractos de café, en donde las CL₅₀ para las NPsCu fueron mucho más bajas que las del extracto de café con 5.789 ppm respecto a 73.5 ppm afirmando que el uso de estas nanopartículas es muy efectivo para el control de *Aedes aegypti* y además amigable con el medio ambiente

Tabla 4: Concentración letal media en *Sitophilus zeamais* de dimetoato a diferentes concentraciones de nanopartículas de cobre, grafito y plata a las 72 h.

Dimetoato						
Concentración de NPs	CL 50 (ppm)	LFI	LFS	Ec. Predicción	P. valor	RS
Control	548.45	331.29	792.07	$y=-2.0088+0.7333$	<.0001	
Cu 3 %	110.39	61.48	169.22	$y=-2.2020+1.0778$	<.0001	4.97x
Cu 10 %	102.55	54.8	160.79	$y=-2.0893+1.0390$	<.0001	5.35x
Gr 3 %	162.54	7.77	440.35	$y=-2.0883+0.9445$	<.0001	3.37x
Gr 10 %	53.45	24.36	91.53	$y=-1.8512+1.0712$	<.0001	10.26x
Ag 3 %	493.65	359.98	637.67	$y=-3.2461+1.2052$	<.0001	1.11x
Ag 10 %	530.89	401.51	669.21	$y=-3.6725+1.3447$	<.0001	1.03x

CL₅₀ concentración letal media, LFI: Límite fiducial inferior, LFS: Límite fiducial superior, RS: Relación de sinergia en valores de CL₅₀.

V. CONCLUSIÓN

Las nanopartículas de grafito, cobre y plata fueron efectivas para el control de *S. zeamais* al potencializar el efecto insecticida de bifentrina y dimetoato reduciendo la concentración letal media, si bien las nanopartículas de grafito y plata mostraron mejores porcentajes de mortalidad se sugiere continuar con el estudio de las tres nanopartículas a diferentes concentraciones o combinadas con otros ingredientes activos.

VI. LITERATURA CITADA

- Abadía, M. B., y Bartosik, R. (2013). Manual de buenas prácticas en la postcosecha de granos. Hacia el agregado de valor en origen de la producción primaria. Editado por: Bernadette Abadía y Ricardo Bartosik. Autores: Abadía, MB, 194.
- Abarca, O. R., Zavala, D. G. I., y Estrada, A. G. (2023). Análisis económico de la producción de maíz en Chiapas, México, en la región de la Frailesca. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(4), 423-437.
- Abdel Ghani, S. B., Al-Azzazy, M. M., y Lucini, L. (2022). The miticidal activity of silver nanoparticles towards phytophagous and predatory mites of citrus: efficacy and selectivity. *Emirates Journal of Food y Agriculture (EJFA)*, 34(6).
- Abdulwahab, Y., Al-Shmery, M., Ahmad, A., y Taba, P. (2024). Effectiveness of Coffee Plant Extracts and Green Nanoparticles for Mosquito Control of the Dengue Vector *Aedes aegypti*: A Comprehensive Review. *Bangladesh Journal of Infectious Diseases*, 11(2), 172-195.
- Abdullahi, N; Umar, I; Tukur, Z; Babura, SR. 2014. Comparative efficacy of the bark and root powders of *Acacia nilotica* against maize weevil *Sitophilus zeamais* (Motsculsky) (Coleoptera: Curculionidae) in Kano State of Nigeria. *African Journal of Agricultural Research* 9(6):588-592. [[Links](#)]
- Abou-Taleb, H. K., Mohamed, M. I. E., Shawir, M. S., y Abdelgaleil, S. A. M. (2016). Insecticidal properties of essential oils against *Tribolium castaneum* (Herbst) and their inhibitory effects on acetylcholinesterase and adenosine triphosphatases. *Natural Product Research*, 30(6), 710–714. <https://doi.org/10.1080/14786419.2015.1038999>
- Aguilera, P. M. 2017. Plagas de Productos Alimenticios en Almacén y Estrategias para su Combate. Serie. Poscosecha y Comercialización. Núm. 06. Artículos Técnicos de

- Ahmad, R., Hassan, S., Ahmad, S., Nighat, S., Devi, Y. K., Javeed, K., ... y Hussain, B. (2021). Stored grain pests and current advances for their management. Postharvest technology-recent advances, new perspectives and applications.
- Aisvarya, S., Kalyanasundaram, M., Kannan, M., Lakshmanan, A., Preetha, S., Elango, K., y Govindaraju, K. (2023). *Impact of silver nanoparticles against stored product pest Sitophilus oryzae (L.) and effect on agromorphological characteristics of Zea mays (maize seeds)*. Process Safety and Environmental Protection, 177, 1336–1350. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.07.074>
- Alfaro-Corres, A., González Mendoza, D., Ruiz-Sánchez, E., Valdez-Salas, B., Mendez-Trujillo, V., y Beltran-Partida, E. (2025). Fito-nanopartículas metálicas y su actividad insecticida contra el gorgojo rojo (*Tribolium castaneum*) y el piojo harinoso (*Phenacomys solenopsis*). *Chilean journal of agricultural y animal sciences*, 41(3), 397-407.
- Alfaro-Corres, A., González-Mendoza, D., Ruiz-Sánchez, E., Ail-Catzin, C., Valdez-Salas, B., Gutiérrez-Miceli, F., ... y Jacques, P. (2023). Actividad insecticida y caracterización fisicoquímica de nanopartículas a partir de extracto foliar de. *Revista de Materiales Renovables*, 11(11), 3933.
- Alif A. A., y Thangapandiyan S. (2019). Comparative bioassay of silver nanoparticles and malathion on infestation of red flour beetle, *Tribolium castaneum*. *The Journal of basic and applied zoology*, 80(1), 55.
- Alif, A. A. S. y Thangapandiyan, S. (2019). Comparative bioassay of silver nanoparticles and malathion on infestation of red flour beetle, *Tribolium castaneum*. *The Journal of Basic and Applied Zoology*, 80(1): 1-10. <https://doi.org/10.1186/s41936-019-0124-0>

- Almadiy, A. A., Nenaah, G. E., y Shower, D. M. (2018). Facile synthesis of silver nanoparticles using harmala alkaloids and their insecticidal and growth inhibitory activities against the khapra beetle. *Journal of Pest Science*, 91(2), 727-737.
- Amelia T H (2018) Kepekaan Berbagai Galur Jagung (*Zea Mays*) Terhadap *Sitophilus Zeamais Motschulsky* (Coleoptera: Curculionidae)
- Andelkovic, I. B., Kabiri, S., Tavakkoli, E., Kirby, J. K., McLaughlin, M. J., y Losic, D. (2018). Graphene oxide-Fe (III) composite containing phosphate—A novel slow-release fertilizer for improved agriculture management. *Journal of cleaner production*, 185, 97-104.
- Arrahman A, Mirsam H, Djaenuddin N, Pakki S, Saenong M S and Sebayang A. (2022) An in-depth study on *Sitophilus zeamais Motsch* (Coleoptera: Curculionidae) pests on corn plants IOP Conference Series: *Earth and Environmental Science* vol 1107 (IOP Publishing) p 12060
- Arrahman, A., Mirsam, H., Djaenuddin, N., Suriani, Pakki, S., Saenong, M. S., y Sebayang, A. (2022, December). An in-depth study on *Sitophilus zeamais* Motsch (Coleoptera: Curculionidae) pests on corn plants. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1107, No. 1, p. 012060). IOP Publishing.
- Arubi, P. O., y Oloche, J. J. (2023). In-vivo investigation of dimethoate toxicity on serum enzymes, target organs and intestinal tissues of albino rats.
- Attia, M. A., Wahba, T. F., Shaarawy, N., Moustafa, F. I., Guedes, R. N. C., & Dewar, Y. (2020). Stored grain pest prevalence and insecticide resistance in Egyptian populations of the red flour beetle *Tribolium castaneum* (Herbst) and the rice weevil *Sitophilus oryzae* (L.). *Journal of stored products research*, 87, 101611.
- Badawy, A.A., Abdelfattah, N.A., Salem, S.S. Awad. M.P.. Fouda. A.. (2021). efficacy assessment of biosynthesized copper oxide nanoparticles (CoO-NPs) on stored grain insects and their impacts on morphologica and phystological trails of wheat (*Triticum aestivum* L.) plant, *Biology* 10 t3). 233

- Benelli, G. (2016). Green synthesized nanoparticles in the fight against mosquito-borne diseases and cancer-a brief review. *Enzyme and Microbial Technology*, 95: 58-68. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2016.08.022>
- Benelli, G. (2018). Mode of action of nanoparticles against insects. *Environmental Science and Pollution Research International*, 25(13): 12329-12341. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1850-4>. PMID: 29611126.
- Benelli, G.; Duggan, M.F. (2018) Gestión de datos de vectores de artrópodos–Dinámicas sociales y ecológicas desde la perspectiva de Una Sola Salud. *Acta Trop.*, 182, 80–91.
- Bharti, S., Yadav, R. P., & Singh, A. (2023). Toxicological alteration of Dimethoate (rogor) insecticide against freshwater fish *Colisa fasciatus* and *Mystus mystus*.
- Bhusal, K. S. G. C., & 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(1), 7584056.
- Blanco, V., Durañona, H. y Acosta-Roca, R. (2016) Efecto de la temperatura y la humedad en la conservación de granos de maíz en silos metálicos refrigerados. *Cultivos Tropicales*, 37(4): 105-114. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.13900.21127>
- Borror, D.J., De Long. D. and C. Triplehom.(1979). A introduction to the study of insects. Fifth edition. Saunders College Publishing.Philadelphia, New York, Chicago, San Francisco. 827 p.
- Caballero-García, M. A., Córdova-Téllez, L., y López-Herrera, A. D. J. (2019). Validación empírica de la teoría multicéntrica del origen y diversidad del maíz en México. *Revista fitotecnica mexicana*, 42(4), 357-366.
- Camaroti, J. R. S. L., de Almeida, W. A., do Rego Belmonte, B., de Oliveira, A. P. S., de Albuquerque Lima, T., Ferreira, M. R. A., ... & Napoleão, T. H. (2018). *Sitophilus*

zeamais adults have survival and nutrition affected by *Schinus terebinthifolius* leaf extract and its lectin (SteLL). *Industrial crops and products*, 116, 81-89.

Campbell, J. F., Athanassiou, C. G., Hagstrum, D. W., y 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>

Carranza-Patiño, M., Contreras-Mora, M., Macias-Leon, M., Pincay-Pin, P., Rendón-Margallón, E., & Robinson J. , H.-F. (2023). Uso de los pesticidas y su efecto en el cultivo de *Zea mays*: Una revisión de la literatura. *Código Científico Revista De Investigación*, 4(E2), 1258–1286. <https://doi.org/10.55813/gaea/ccri/v4/nE2/219>

Castillo-Henríquez, L., Alfaro-Aguilar, K., Ugalde-Álvarez, J., Vega-Fernández, L., Montes de Oca-Vásquez, G., & Vega-Baudrit, J. R. (2020). Green synthesis of gold and silver nanoparticles from plant extracts and their possible applications as antimicrobial agents in the agricultural area. *Nanomaterials*, 10(9), 1763.

Cloyd, R. (2012). Indirect effects of pesticides on natural enemies. In *Pesticides-advances in chemical and botanical pesticides*. IntechOpen.

CONABIO. (2020). Maíces <https://www.biodiversidad.gob.mx/diversidad/alimentos/maices>. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Cd. de México. México.Contenido: Cecilio Mota Cruz, Caroline Burgeff y Francisca Acevedo Gasman

Chen, Z., Zhao, J., Liu, Z., Bai, X., Li, W., Guan, Z., ... y Zhu, H. (2022). Insecticidas administrados con grafeno contra el gusano del algodón. *Nanomateriales*, 12(16), 2731.

Chimene, D., Alge, D.L. and Gaharwar, A.K. (2015), Two-Dimensional Nanomaterials for Biomedical Applications: Emerging Trends and Future Prospects. *Adv. Mater.*, 27: 7261-7284. <https://doi.org/10.1002/adma.201502422>

- Daglish, G. J., Nayak, M. K., Arthur, F. H., y Athanassiou, C. G. (2018). Insect pest management in stored grain. In Recent advances in stored product protection (pp. 45-63). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Dasgupta, N., Ranjan, S., Mundekkad, D., Ramalingam, C., Shanker, R. y Kumar, A. (2015). Nanotechnology in agro-food: from field to plate. *Food Research International*, 69: 381-400. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.01.005>.
- De Andrade Brito, F., Bacci, L., da Silva Santana, A., da Silva, J. E., de Castro Nizio, D. A., de Lima Nogueira, P. C., ... y Blank, A. F. (2020). Toxicity and behavioral alterations caused by essential oils of *Croton tetradenius* and their major compounds on *Acromyrmex balzani*. *Crop Protection*, 137, 105259.
- De Andrade Melo Junior, J.L, da Silva, J.A., Santoro, K.R. y Badji, C.A. (2018). Insecticide resistance of corn weevil populations from semi-arid regions. *Australian Journal of Crop Science*, 12(3), 430-434. de <https://www.fao.org/4/x5027s/x5027s00.htm> de <https://www.fao.org/4/x5041s/x5041s00.htm> de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Recuperado
- Devi, M. B., y Devi, N. V. (2015). Biology of Rust-Red Flour Beetle , *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera : Tenebrionidae), 7(1), 12–15.
- Duante, C. (2022). Utilización de la nanotecnología en el desarrollo de fertilizantes orgánicos y pesticidas. *INFLUENCE: INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENCE REVIEW*, 4(2), 172-178.
- Dziewięcka, M., Karpeta-Kaczmarek, J., Augustyniak, M., Majchrzycki, Ł., y Augustyniak-Jabłokow, M. A. (2016). Evaluation of in vivo graphene oxide toxicity for *Acheta domesticus* in relation to nanomaterial purity and time passed from the exposure. *Journal of hazardous materials*, 305, 30-40.
- El-Saadony, M.T., El-Hack, A., Mohamed E, Tahu, A.E., Pouda, M.M., Ajarem, J.S., Maodaa, S.N., Allam, A.A., Elshaer, N., (2020), Ecofriendly synthesis and insecticidal

application of copper nanoparticles against the storage pest *Tribolion castanem*,
Nanomaterials 10 (3),587

FAO. (1993). *Manual de manejo poscosecha de granos a nivel rural*. Organización

FAO. (2018). *Conservación y protección de los granos almacenados*. Organización

FAO. 2024. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.FAOSTAT-Statistical Databases. <http://faostat.fao.org/site/351/default.aspx>.

Farook, U.B.; Khan, Z.H.; Ahad, I.; Maqbool, S.; Yanqoob, M.; Rafieq, I.; Rehman, S.A.; Sultan, N.(2019). Una reseña sobre el complejo plaga de insectos del trigo (*Triticum aestivum* L.). *J. Entomol. Zool Stud.* 7, 1292–1298.

Fernández-Caldas, E. (2013). On mite allergy in dogs and humans. *International Archives of Allergy and Immunology*, 160(4), 329.

Finkler, C. (2011) Controle de insetos: uma breve revisão. *Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agronômica. Revista Científica Agraria*, 8(9): 169-189. <http://dx.doi.org/10.4322/rca.2217>

Fleurat-Lessard, F. (2002). Qualitative reasoning and integrated management of the quality of stored grain: a promising new approach. *Journal of Stored Products Research*, 38(3), 191-218.

Formentini, M. A., Alves, L. F. A., & Schapovaloff, M. E. (2016). Insecticidal activity of neem oil against *Gyropsylla spegazziniana* (Hemiptera: Psyllidae) nymphs on Paraguay tea seedlings. *Brazilian Journal of Biology*, 76(04), 951-954.

Frederick, J. L., y Subramanyam, B. (2016). Influence of temperature and application rate on efficacy of a diatomaceous earth formulation against *Tribolium castaneum* adults. *Journal of Stored Products Research*, 69, 86-90.

- Gabal, E., Ramadan, M. M., Alghuthaymi, M. A., & Abd-Elsalam, K. A. (2018). Copper nanostructures applications in plant protection. In *Nanobiotechnology applications in plant protection* (pp. 63-86). Cham: Springer International Publishing.
- Gao, X., Shi, F., Peng, F., Shi, X., Cheng, C., Hou, W., ... y Wang, X. (2021). Formulación de nanopesticidas con óxido de grafeno como nanoportador del pesticida piretroide y su aplicación en el control de ácaros. *Avances RSC*, 11(57), 36089-36097.
- García-Lara, S., Espinosa Carrillo, C., & Bergvinson, D. J. (2007). *Manual de plagas en granos almacenado y tecnologías alternas para su manejo y control*. CIMMYT.
- Gariba, S. Y., Dzidzienyo, D. K., y Eziah, V. Y. (2021). Assessment of four plant extracts as maize seed protectants against *Sitophilus zeamais* and *Prostephanus truncatus* in Ghana. *Cogent Food and Agriculture*, 7(1), 1918426. <https://doi.org/10.1080/23311932.2021.1918426>
- Ghrair, A. M., Aldmour, S., Ateyyat, M., Qrunfleh, I. M., Jaradat, D. S. M., Natsheh, I. Y., y Alsaleh, M. M. (2026). Potencial de reducción de dosis de Spinosad mediante combinación con nanopartículas de plata sintetizadas en verde para el control de trips (trips y sus efectos). *Entornos*, 13(4), 218.
- Gitahi, S. M., Ngugi, M. P., Mburu, D. N., y Machoch, A. K. (2021a). Contact toxicity effects of selected organic leaf extracts of *Tithonia diversifolia* (Hemsl.) A. Gray and *Vernonia lasiopus* (O. Hoffman) against *Sitophilus zeamais* Motschulsky (Coleoptera: Curculionidae). *International Journal of Zoology*, 2021, 8814504. <https://doi.org/10.1155/2021/8814504>
- Gob.mx. (2020). Retrieved 24 August 2020, from <https://www.gob.mx/tramites/ficha/licencia-sanitaria-para-establecimiento-de-plaguicidas-y-o-nutrientes-vegetales/COFEPRIS3540>
- González, J., Rivers, A. y Verhulst, V. (2017). El sistema postcosecha de maíz en México. Diagnóstico mediante encuestas a pequeños productores. *Enlace*, 9(40), 42-48. <https://repository.rothamsted.ac.uk/download/>

- Granados, A. (2021). Plagas de los granos almacenados en México. Editorial Agropecuaria.
- Grillo, R.; Abhilash, P. C.; Fraceto, L. F. (2016). Nanotechnology applied to bio-encapsulation of pesticides. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. 16: 1231-1234
- Guo, C., Li, G., Lin, Q., Wu, X., & Wang, J. (2021). Residual dynamics and dietary exposure risk of dimethoate and its metabolite in greenhouse celery. *PeerJ*, 9, e10789.
- Gutiérrez Gaitán, Y., Zamora, M., Pitre, H., Matamoros Vilchez, R., y Rugama, O. (2007). Calidad fitosanitaria y determinación de aflatoxinas en granos de sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench), en almacén y campo, 2005. *La Calera*, 7(8), 33-38.
- Guyasa, J. N., Deresa, E. M., Diriba, T. F., Beza, M. C., Likasa, L. L., Etefa, K. T., ... y Dadi, D. J. (2026). *Solanum incanum*-mediated green synthesis and characterization of silver oxide, zinc oxide, and copper oxide nanoparticles for the control of maize weevils (*Sitophilus zeamais*) and postharvest microbial contamination. *Scientific Reports*.
- Hagstrum, D.W.; Phillips, T.W.; Cuperus, G.(2012). *Protección de productos almacenados*; Universidad Estatal de Kansas: Manhattan, CA, EE. UU.
- Hamel, D. (2014). Higijena u skladištima poljoprivrednih proizvoda. *Glasilo biljne zaštite*, 14(4), 329-334.
- Hansen, J. D., Johnson, J. A., y Winter, D. A. (2011). History and use of heat in pest control: a review. *International journal of pest management*, 57(4), 267-289.
- He, Y., Qian, L., Liu, X., Hu, R., Huang, M., Liu, Y., ... y Zhu, H. (2018). Graphene oxide as an antimicrobial agent. *Nano Res.*, 6, 3136-3144.
- Hernández, T. A., Estrada, D. B., Rodríguez, H. R., García, G. J. M., Patiño, A. S. A. y Osorio H. E. (2019). Importancia del control biológico de plagas en maíz (*Zea*

mays L.). *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(4): 803-813.
<https://doi.org/10.29312/remexca.v10i4.1665>.

Hong KJ, Lee W, Park YJ, Yang JO (2018). First confirmation of the distribution of rice weevil, *Sitophilus oryzae*, in South Korea. *Journal of Asia Pacific Biodiversity* 11: 69-75. <https://doi.org/10.1016/j.japb.2017.12.005>.

Ileke KD, Idoko JE, Ojo DO, Adesina BC (2020). Evaluation of botanical powders and extracts from Nigerian plants as protectants of maize grains against maize weevil, *Sitophilus zeamais* (Motschulsky) [Coleoptera: Curculionidae]. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology* 27: 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101702>.

IRAC España. (2022). Clasificación del modo de acción de insecticidas y acaricidas. España. 1- 8 p. Recuperado de <https://irac-online.org/folleto-de-clasificacion-del-modo-de-accion-de-insecticidas-y-acaricidas-de-irac-espana-2/>

Jafir, M., Ahmad, J. N., Arif, M. J., Ali, S., & Ahmad, S. J. N. (2021). Characterization of *Ocimum basilicum* synthesized silver nanoparticles and its relative toxicity to some insecticides against tobacco cutworm, *Spodoptera litura* Fab. (Lepidoptera; Noctuidae). *Ecotoxicology and environmental safety*, 218, 112278.

Jara, F. M. (2018). *Evaluación de tres dosis de fumigación con fosforo de aluminio en almacenamiento de maíz (Zea mays) para controlar la incidencia de Sitophilus spp* (Doctoral dissertation, Zamorano: Escuela Agrícola Panamericana, 2018.).

Kantrao, S., Ravindra, M. A., Akbar, S. M. D., Jayanthi, P. K. y Venkataraman, A. (2017). Effect of biosynthesized silver nanoparticles on growth and development of *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae): Interaction with midgut protease. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 20(2): 583-589. <https://doi.org/10.1016/j.aspen.2017.03.018>.

Kathage, J.; Castañera, P.; Alonso-Prados, J.L.; Gómez-Barbero, M.; Rodríguez-Cerezo, E. (2018). El impacto de las restricciones a los insecticidas neonicotinoides y fipronil

en el manejo de plagas en maíz, colza oleaginosa y girasol en ocho regiones de la Unión Europea. *Ciencia de la Gestión de Plagas*. 2018, 74, 88–99.

Kumar, D., & Kalita, P. (2017). Reducing postharvest losses during storage of grain crops to strengthen food security in developing countries. *Foods*, 6(1), 8.

Lampiri, E., Yap, P. L., Berillis, P., Athanassiou, C. G., y Losic, D. (2024). Graphene powders as new contact nanopesticides: revealing key parameters on their insecticidal activity for stored product insects. *Chemosphere*, 364, 143200.

Li, X., Wang, Q., Wang, X., & Wang, Z. (2022). Synergistic effects of graphene oxide and pesticides on fall armyworm, *Spodoptera frugiperda*. *Nanomaterials*, 12(22), 3985.

Liu, J., Luo, Y., Jiang, X., Sun, G., Song, S., Yang, M., y Shen, J. (2022). Actividad pesticida aumentada y sostenida de un sistema de entrega de pesticidas a base de grafeno contra la polilla diamante *Plutella xylostella*. *Ciencia de la Gestión de Plagas*, 78(12), 5358-5365.

López, G. R.; Martínez, D. M. A. y Arana, C. J. J. (2021). Predicción del precio de maíz en México. *Agrociencia*. 55(8):733-746.

Losic, D., y Korunic, Z. (2017). Diatomaceous earth, a natural insecticide for stored grain protection: Recent progress and perspectives.

Magano, D. A., Carvalho, I. R., Doberstein, A. P., Louro, M. V., Bubans, V., Drebes, L., ... y Boller, W. (2021). Efficiency and persistence of insecticides with different action mechanisms applied on wheat stored pest ' *Sitophilus zeamais*'. *Australian journal of crop science*, 15(5), 618-621.

Malandrakis, A. A., Varikou, K., Kavroulakis, N., Nikolakakis, A., Dervisi, I., Reppa, C. I., ... y Chrysikopoulos, C. V. (2024). Copper nanoparticles interfere with insecticide sensitivity, fecundity and endosymbiont abundance in olive fruit fly *Bactrocera oleae* (Diptera: Tephritidae). *Pest Management Science*, 80(7), 3640-3649.

- Malpica, A. H. Z., y Miranda, Z. G. A. (2016). Impacto del cambio climático en la seguridad alimentaria en zonas campesinas vulnerables de los Andes del Perú. *Revista mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(1), 71-82.
- Mallampalli, N. (2007). *Biological and economic analysis assessment*. En *Revised interim reregistration eligibility decision (IRED) for dimethoate*. U.S. Environmental Protection Agency
- Mao, B. H., Chen, Z. Y., Wang, Y. J. y Yan, S. J. (2018). Silver nanoparticles have lethal and sublethal adverse effects on development and longevity by inducing ROS-mediated stress responses. *PubMed Scientific Reports*, 8(1):2445-2461. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-20728-z>.
- Martínez-Cisterna, D., Rubilar, O., Bardehle, L., Chacón-Fuentes, M., Chen, L., Silva, B., Lizama, M., Parra, P., Matamala, I., Barra, O., & Rebolledo, R. (2026). *Characterization and insecticidal efficacy of green-synthesized silver nanoparticles against four stored product insect species*. *Insects*, 17(2), 143. <https://doi.org/10.3390/insects17020143>
- Martins, J. C., Silva, É. M., Silva, R. S., Ferreira, S. R., y Picanço, M. C. (2022). Copaiba oil and Neem extract can be a potential alternative for the behavioral control of *Sitophilus zeamais*. *Brazilian Journal of Biology*, 84, e254628.
- Matsuoka Y., Y. Vigouroux, M. M. Goodman, J. Sanchez G., E. Buckler and J. Doebley (2002). A single domestication for maize shown by multilocus microsatellite genotyping. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 99:6080-6084, <https://doi.org/10.1073/pnas.052125199>
- Mebeasilassie, A. (2004). Studies on the pest status of bean bruchid and managements of major bruchid species in central rift valleys of Ethiopia [doctoral dissertation, M. Sc. thesis]. *Ethiopia: School of Graduate Studies, Addis Ababa University*.
- Mesterházy, Á., Oláh, J., & Popp, J. (2020). Losses in the grain supply chain: Causes and solutions. *Sustainability*, 12(6), 2342.

- Mier, R. (2025). *Maíz: Origen, cultura y cocina*. Ediciones Larousse, SA de CV (MX).
- Mihale, M. J., Deng, A. L., Selemani, H. O., Kamatenesi, M. M., Kidukuli, A. W., y Ogendo, J. O. (2009). Use of indigenous knowledge in the management of field and storage pests around Lake Victoria basin in Tanzania. *African Journal of Environmental Science and Technology*, 3(9).
- Morales, H., Pérez, L., y Sánchez, M. (2020). Prácticas tradicionales en el *Mukhopadhyay, S. S. (2014). Nanotechnology in agriculture: prospects and constraints. Nanotechnology, science and applications*, 63-71.
- Muniswamy, K., Sugumar, A., Yarrakula, S., Manickam, L., y Chidanand, D. V. (2023). Effect of ozone fumigation on controlling common storage pest *Tribolium castaneum* (Herbst) in proso millet during storage. *Ozone: Science y Engineering*, 45(6), 543-559. <https://doi.org/10.1080/01919512.2023.2174069>
- Musso, A., Padín, S., y Dal Bello, G. (2017). Control de insectos en granos almacenados con hongos entomopatógenos. *Investigación Joven*, 4(2), 79-79.
- Nair, P. M. G., y Choi, J. (2011). Identification, characterization and expression profiles of *Chironomus riparius* glutathione S-transferase (GST) genes in response to cadmium and silver nanoparticles exposure. *Aquatic* <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2010.12.006>
- Naseri, B. y 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>
- Navas, Isabel y García-Fernández, Antonio J. (2020). Plaguicidas y biocidas: generalidades, clasificación toxicológica y de riesgos, legislación europea aplicable. <http://hdl.handle.net/10201/88181>

- Ngoma, T. N., Monjerezi, M., Leslie, J. F., Mvumi, B. M., Harvey, J. JW., y 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>
- Nie, P., Zhao, Y., & Xu, H. (2023). *Synthesis, applications, toxicity and toxicity mechanisms of silver nanoparticles: A review. Ecotoxicology and Environmental Safety*, 253, 114636. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.114636>
- Nuruzzaman, M.; Rahman, M. M.; Liu, Y.; Naidu, R. (2016). Nanoencapsulation, nano-guard for pesticides: A new window for safe application. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 64: 1447-1483.
- Nwosu, C. L., Adedire, C. O., y Ogunwolu, E. O. (2015). Screening for new sources of resistance to *Sitophilus zeamais* Motschulsky (Coleoptera: Curculionidae) infestation in stored maize genotypes. *Journal of Crop Protection*, 4(3), 277–290. Retrieved from <http://jcp.modares.ac.ir/article -3-10469-en.html>
- Nwosu, L. C. (2016). *Chemical bases for maize grain resistance to infestation and damage by the maize weevil, Sitophilus zeamais* Motschulsky. *Journal of Stored Products Research*, 69, 41–50. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2016.06.001>.
- Nwosu, L. C. (2018). Maize and the maize weevil: Advances and innovations in postharvest control of the pest. *Food Quality and Safety*, 2(3), 145–152. <https://doi.org/10.1093/fqsafe/ fyy011>
- Oberdörster, G., Oberdörster, E., y Oberdörster, J. (2005). Nanotoxicology: an emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles. *Environmental health perspectives*, 113(7), 823.
- Obregón, N. D. C., y Gómez Gutiérrez, O. J. (2023). Tecnologías y prácticas que utilizan los productores en el manejo poscosecha de maíz y frijol en Estelí, Madriz y Nueva Segovia, Nicaragua. *La Calera*, 23(41), 124-132.
- OECD-FAO. 2022. Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

- Ojo, J.A.; Omoloye, A.A. Development and Life History of *Sitophilus zeamais* (Coleoptera: Curculionidae) on Cereal Crops. *Advances in Agriculture* 2016, 2016, 7836379, doi:10.1155/2016/7836379.
- Okosun O O, Allen K C, Glover J P and Reddy G V P (2021) Biology, Ecology, and Management of Key Sorghum Insect Pests *J. Integr. Pest Manag.* 12
- Okparavero, N. F., Grace, O. O., Rukayat, Q., Jimoh, O. M., Ishola, T. D., Okunlade, A. F., ... & Akande, E. T. (2024). Effective storage structures for preservation of stored grains in nigeria: A review. *Ceylon Journal of Science*, 53(1).
- Oliveira, A. P., Santana, A. S., Santana, E. D., Lima, A. P. S., Faro, R. R., Nunes, R. S., ... y Bacci, L. (2017). Nanoformulation prototype of the essential oil of *Lippia sidoides* and thymol to population management of *Sitophilus zeamais* (Coleoptera: Curculionidae). *Industrial crops and products*, 107, 198-205.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 2010. <http://www.fao.org>. [[Links](#)]
- Orozco, C., Guerrero, E., Landeros, J., García, M., Mendoza, R. y Lira, R.(2009). Actividad Biológica in vitro de Extractos de Plantas del Sureste de Coahuila,México, Contra *Sitophilus oryzae* (L.) (Coleoptera: Curculionidae). *Revista Agraria AñoVI*. 6(1,2,3), 25-30.
- Ortiz Rosales, M. Á., Ramírez Abarca, O., González Elías, J. M., y Velázquez Monter, A. (2015). *Almacenes de maíz en México: Tipología y caracterización. Estudios Sociales*, 23(45), 163–184
- Osorio-García, N., López-Sánchez, H., Ramírez-Valverde, B., Gil-Muñoz, A., y Gutiérrez-Rangel, N. (2015). Producción de maíz y pluriactividad de los campesinos en el Valle de Puebla, México. *Nova scientia*, 7(14), 577-600.

- Pavela, K. M., Canale, A. y Benelli, G. (2017). *Saponaria officinalis*-synthesized silver nanocrystals as effective biopesticides and oviposition inhibitors against *Tetranychus urticae* Koch. *Industrial Crops and Products*, 97: 338-344. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.12.046>.
- Phillips, T. W., y Throne, J. E. (2010). Biorational approaches to managing stored-product insects. *Annual review of entomology*, 55(1), 375-397.
- Porto, S. M., Valenti, F., Bella, S., Russo, A., Cascone, G., y Arcidiacono, C. (2017). Improving the effectiveness of heat treatment for insect pest control in flour mills by thermal simulations. *Biosystems engineering*, 164, 189-199.
- Pryshchepa, O., Pomastowski, P., & Buszewski, B. (2020). *Silver nanoparticles: Synthesis, investigation techniques, and properties*. *Advances in Colloid and Interface Science*, 284, 102246. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102246>
- Qazi, G., Dar, F.A., (2020). Nano-agrochemicals, economic potential and future trends. In: *Nanobiotechnology in Agriculture*, Springer Cham, pp. 185-193.
- Rai, M., Ingle, A.P., Pandit, R., Paralikar, P. Shende, S, Gupta, 1., Biswas. J.K., da Silva, S.S.(2018). Copper and copper nanoparticles role in management of insect-pests and pathogenic microbes, *Nanotechnol. Roy*, 740. 009-315
- Rai, M., Kon, K., Ingle, A., Duran, N., Galdiero, S. y Galdiero, M. (2014). Broadspectrum bioactivities of silver nanoparticles: the emerging trends and future prospects. *Appl Microb Biotechnol*, 98: 1951-1961.
- Ranum, P., Peña-Rosas, J. P., & García-Casal, M. N. (2014). *Global maize production, utilization, and consumption*. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1312(1), 105–112. <https://doi.org/10.1111/nyas.12396>
- Rita Devi S, Thomas A, Rebijith K B and Ramamurthy V V. (2017). Biology, morphology and molecular characterization of *Sitophilus oryzae* and *S. zeamais* (Coleoptera: Curculionidae) *J. Stored Prod. Res.* 73 135–41

- Rivera, S. E. U., Chávez, E. C., Fuentes, Y. M. O., Plancarte, A. O., y Puente, E. O. R. (2025). Extractos con nano y micropartículas sobre *Sitophilus zeamais* (Coleoptera: Curculionidae): Extracts with nano and microparticles on *Sitophilus zeamais* (Coleoptera: Curculionidae). *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 16(3), 20.
- Rodríguez, A.; Beato, M.; Usseglio, V.L.; Camina, J.; Zygadlo, J.A.; Dambolena, J.S.; Zunino, M.P. Phenolic Compounds as Controllers of *Sitophilus zeamais*: A Look at the Structure-Activity Relationship. *J Stored Prod Res* 2022, 99, 102038, doi:10.1016/J.JSPR.2022.102038.
- Roque-Enriquez, A., Díaz-Aguilar, R. de J., Ochoa-Fuentes, Y. M., & Cerna-Chávez, E. (2025). Mortalidad de ninfas de *Bactericera cockerelli* por ingredientes activos químicos potencializados con nanopartículas de grafito. *CienciaUAT*, 20(1), 79–87. <https://doi.org/10.29059/cienciauat.v20i1.1979>
- Ruiz, J. A., Bravo, E., Ramírez, G., Báez, A. D., Álvarez, M., Ramos, J. L. ... y Byerly, K. (2013). Plagas de importancia económica en México: aspectos de su biología y ecología. *Libro Técnico*, (2), 256.
- Saavedra, P. (2022). Plagas de importancia económica en granos almacenados. *Revista Fitosanitaria Mexicana*, 29(1), 39-46.
- Santana, C.B., Souza, J.G.L., Toledo, A.G., Alves, L.F.A., Alves, D.S., Corrêa, J.M. and Pinto, F.G.S., (2021). Antimicrobial and insecticidal effects of essential oil and plant extracts of *Myrcia oblongata* DC in pathogenic bacteria and *Alphitobius diaperinus*. *Brazilian Journal of Biology = Revista Brasileira de Biologia*, vol. 82, pp. e233425. <http://dx.doi.org/10.1590/1519-6984.233425> PMID:34105655.
» <http://dx.doi.org/10.1590/1519-6984.233425>
- Seada, M. A., y 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(1), 14.

- Shah, J. A., Vendl, T., Aulicky, R., y 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*
- Sharifian, A., Jafarzadeh, A., Azodian, S., Zabetian, A. y Riahi, A. (2016). The application of the silver nanoparticles in control of arthropoda under laboratory conditions. *1st Conference on Modern Bio-medical researches*. https://www.researchgate.net/publication/341277946_The_Application_of_the_Silver_Nanoparticles_in_Control_of_Arthropoda_under_Laboratory_Conditions.
- SIACON. (2024). Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). <https://www.gob.mx/siap/documentos/siacon-ng-161430>.
- SIAP. 2024. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Cierre de la producción agrícola. Anuario estadístico de la producción agrícola. <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-estado/>.
- Simón, M. R., & Golik, S. I. (2018). *Cereales de verano*. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP).
- Simón, M. R., Dietz, J. I., y Schierenbeck, M. (2018). CAPÍTULO 6 Maíz: Manejo de plagas. *Cereales de verano*, 101.
- Singh, A., Singh, N. B., Afzal, S., Singh, T., y Hussain, I. (2017). Zinc oxide nanoparticles: a review of their biological synthesis, antimicrobial activity, uptake, translocation and biotransformation in plants. *Journal of materials science*, 53(1), 185–201. doi:10.1007/s10853-017-1544-1
- Sosa, R. F. S. (2015). Política del cambio climático en México: avances, obstáculos y retos. *Revista Internacional de Estadística y Geografía*, 6(2): 4-23.

- Sparks, T.C., Storer, N., Porter, A., Slater, R., y Nauen, R. (2021). Insecticide resistance management and industry: the origins and evolution of the Insecticide Resistance Action Committee (IRAC) and the mode of action classification scheme. *Pest Management Science*, 77(6), 2609-2619.
- Srivastava, A. K., Mishra, D., Shrivastava, S., Srivastav, S. K., & Srivastav, A. K. (2010). Acute toxicity and behavioural responses of *Heteropneustes fossilis* to an organophosphate insecticide, dimethoate. *International journal of pharma and bio sciences*, 1(4), 359-363.
- Srzednicki, G. (2010). Early detection of insect infestation in stored grain based on head space analysis of volatile compounds. *Julius-Kühn-Archiv*.
- Stefanazzi, N., Stadler, T., & Ferrero, A. (2011). Composition and toxic, repellent and feeding deterrent activity of essential oils against the stored-grain pests *Tribolium castaneum* (Coleoptera: Tenebrionidae) and *Sitophilus oryzae* (Coleoptera: Curculionidae). *Pest management science*, 67(6), 639-646.
- Tanguy, A., Deudon, O., y Crepon, K. (2020). Average cooling availability for grain aeration in France over the last 20 years.
- Tharani, E., Alrudainy, A. M., Kesavardhini, K., Gayathri, K., y Saranraj, P. (2024). Green synthesis of silver nanoparticles for the biocontrol of insect pests. *International Journal of Entomology Research*, 11, 134-138.
- Tung, T. T., Nine, M. J., Krebsz, M., Pasinszki, T., Coghlan, C. J., Tran, D. N., y Losic, D. (2017). Recent advances in sensing applications of graphene assemblies and their composites. *Advanced Functional Materials*, 27(46), 1702891.
- Urango, L. A. (2018). *Componentes del maíz en la nutrición humana. Fondo Editorial Biogénesis*, 185-209.
- Uribe Rivera, S. E., Cerna Chávez, E., Ochoa Fuentes, Y. M., Romero Pavon, L., Landeros Flores, J., & Rueda Puente, E. O. (2025). Evaluación de extractos en combinación

con nano y micromateriales para el control de *Rhyzopertha dominica* (F.)(Coleoptera: Bostrichidae). *Biotecnia*, 27.

Uribe-Rivera, S. E., Cerna-Chávez, E., Ochoa-Fuentes, Y. M., & Velázquez-Guerrero, J. J. (2025). Hongos micotoxigénicos asociados a insectos de productos almacenados. *Acta Agrícola y Pecuaria*, 11(1).

USEPA. (2008). *Risks of Dimethoate. Use to the federally-listed California Red Legged Frog (Rana aurora draytonii). Pesticide effects determination*. Environmental

Vera, T. M., Mero, T. B., Talledo, O. M., y Zambrano, T. Y. M. (2023). Comportamiento y Calidad de los Granos de Maíz (*Zea Mays*) Almacenados en Graneros Construidos con Diferentes Materiales. *593 Digital Publisher CEIT*, 8(4), 202-214.

Vivekanandhan, P., Kannan, S. A. T., Krutmuang, P. y Eliningaya, J. K. (2021). Green copper nano-pesticide synthesized by using *Annona squamosa* L., seed and their efficacy on insect pest as well as non-target species. *Int. J. Plant Environ. Sci*, 11: 456-473. <https://doi.org/10.26502/ijpaes.202115>.

Vivekanandhan, P., Karthi, S., Shivakumar, M. S., y Benelli, G. (2018). *Synergistic effect of entomopathogenic fungus Fusarium oxysporum extract in combination with temephos against three major mosquito vectors*. *Pathogens and Global Health*, 112(1), 37–46. <https://doi.org/10.1080/20477724.2018.1438228>

Wang, X., Liu, X., Chen, J., Han, H., y Yuan, Z. (2014). Evaluation and mechanism of antifungal effects of carbon nanomaterials in controlling plant fungal pathogen. *Carbon*, 68, 798-806.

Wang, X., Xie, H., Wang, Z., He, K., & Jing, D. (2019). Graphene oxide as a multifunctional synergist of insecticides against lepidopteran insect. *Environmental Science: Nano*, 6(1), 75-84.

- Wang, X., Xie, H., Wang, Z., He, K., Jing, D., (2018). Graphene oxide as a multifunctional synergist of insecticides against lepidopteran insects. *Environ. Sci. Nano* 6 (1), 75–84. <https://doi.org/10.1039/c8en00902c>.
- Wang, X., Xie, H., Wang, Z., y He, K. (2019). Graphene oxide as a pesticide delivery vector for enhancing acaricidal activity against spider mites. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 173, 632-638.
- WHO (2009) The WHO recommended classification of pesticides by hazard and guidelines to classification 2009. WHO, Geneva
- Xue, J.; Luo, Z.; Li, P.; Ding, Y.; Cui, Y.; Wu, Q. (2014). A residue-free green synergistic antifungal nanotechnology for pesticide thiram by ZnO nanoparticles. *Scientific Reports*. 4: 1-9.
- Yadav, R. S., Srivastava, H. C., Adak, T., Nanda, N., Thapar, B. R., Pant, C. S., ... y Subbarao, S. K. (2003). House-scale evaluation of bifenthrin indoor residual spraying for malaria vector control in India. *Journal of Medical entomology*, 40(1), 58-63.
- Zavala-Zapata, V., Ramírez-Barrón, S. N., Sánchez-Borja, M., Aguirre-Uribe, L. A., Delgado-Ortiz, J. C., Sánchez-Peña, S. R., García-López, J. I., Vargas-Tovar, J. A., & Hernández-Juárez, A. (2024). *Eficacia insecticida de nanopartículas de plata para síntesis verde en Diaphorina citri Kuwayama (Hemiptera: Liviidae)*. *Insects*, 15(7), 469. <https://doi.org/10.3390/insects15070469>
- Zaytseva, O., y Neumann, G. (2016). Carbon nanomaterials: production, impact on plant development, agricultural and environmental applications. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 3(1), 17.
- Zea-Barahona, C. A., Macías-Villacreses, T. L., Moreno-Ponce, M. R., & Parrales-García, N. R. (2024). *El almacenamiento de maíz y los ingresos en la asociación agropecuaria 27 de Junio de la Parroquia La América*. *Revista Científica Arbitrada*

de Investigación en Comunicación, Marketing y Empresa REICOMUNICAR, 7(14), 398–418. <https://doi.org/10.46296/rc.v7i14.0273>

Ziegler, V., Paraginski, R. T., y 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>