

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



**EVALUACIÓN DE EXTRACTOS VEGETALES ADICIONADOS CON
NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE SILICIO Y ZINC SOBRE TRES ESPECIES
DE *Fusarium***

Tesis

Que presenta IRASEMA DEL ROSARIO MALACARA HERRERA
Como requisito parcial para obtener el grado de
DOCTOR EN CIENCIAS EN PARASITOLOGÍA AGRÍCOLA

Saltillo, Coahuila

Mayo 2023

EVALUACIÓN DE EXTRACTOS VEGETALES ADICIONADOS CON
NANOPARTICULAS DE OXIDO DE SILICIO Y ZINC SOBRE TRES ESPECIES
DE *Fusarium*

Tesis


Elaborada por **IRASEMA DEL ROSARIO MALACARA HERRERA** como
requisito parcial para obtener el Grado de Doctor en Ciencias en Parasitología
Agrícola con la supervisión y aprobación del Comité de Asesoría




Dr. Ernesto Cerna Chávez
Asesor Principal



Dra. Yisa María Ochoa Fuentes
Asesor




Dr. Jerónimo Landeros Flores
Asesor



Dr. Luis Alberto Aguirre Uribe
Asesor



Dr. Agustín Hernández Juárez
Asesor



Dr. Antonio Flores Naveda
Subdirector de Postgrado
UAAAN

Saltillo, Coahuila

Mayo 2023

Agradecimientos

A los doctores que forman parte de mi comité de asesoría, especialmente al Dr. Ernesto Cerna Chávez y a la Dra. Yisa María Ochoa Fuentes por confiar en mí y por todo su apoyo, además de motivarme, a los Dres. Jerónimo Landeros Flores, Luis Alberto Aguirre Uribe y Agustín Hernández Juárez por compartir sus conocimientos e impulsarme a seguir adelante.

A todas las personas que integran el Laboratorio de Toxicología del Departamento de Parasitología de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, por su apoyo incondicional y su gran amistad.

Dedicatoria

A mis padres:

Efrén Malacara Valdés

María del Rosario Herrera Chávez

Carta de aceptación de escrito



Oficio: INV-854/2022

**IRASEMA DEL ROSARIO MALACARA HERRERA
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DEPARTAMENTO DE PARASITOLOGÍA
P R E S E N T E**

Le informo que el artículo "**Manejo in vitro de *Fusarium acuminatum* con extractos vegetales adicionados con nanopartículas de óxido de silicio y zinc**" a su cargo y en colaboración con Yisa María Ochoa Fuentes, Ernesto Cerna Chávez, Jazmín Janet Velázquez Guerrero, Antonio Orozco Plancarte, Agustín Hernández Juárez y Luis Alberto Aguirre Uribe es **ACEPTADO** para su publicación en la revista Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes.

Sin otro particular por el momento, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"SE LUMEN PROFERRE"
Aguascalientes, Ags., 5 de diciembre de 2022.

Elizabeth Casillas

M. C. O. ELIZABETH CASILLAS CASILLAS
EDITORA DE LA REVISTA INVESTIGACIÓN Y CIENCIA DE LA
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE AGUASCALIENTES
Certificado de Licitud de Título 12284, Certificado de Licitud de Contenido 8497
ISSN 16654412, e-ISSN 2521-9758

smrg

HOME MAIL NEWS FINANCE SPORTS ENTERTAINMENT LIFE SEARCH SHOPPING y!

yahoo!mail Find messages, documents, photos or peo Advanced

[yCUAA] Aceptación

Compose Back Archive Move Delete Spam

[yCUAA] Aceptación de Artículo, revista lyC UAA Yahoo/Inbox

Sandra Margarita Ruiz G Mon, Dec 5 at 8:23 PM

To:
Irasema del Rosario Malacara-Herrera
Yisa Maria Ochoa-Fuentes
Ernesto Cerna-Chávez,
Jazmín Janet Velázquez-Guerrero
Antonio Orozco-Plancarte
and 2 more...

Irasema del Rosario Malacara-Herrera, Yisa Maria Ochoa-Fuentes, Ernesto Cerna-Chávez, Jazmín Janet Velázquez-Guerrero, Antonio Orozco-Plancarte, Agustín Hernández-Juárez, Luis Alberio Aguirre-Urbe:

Le escribo de parte de la Mtra. Elizabeth Casillas Casillas, editora de la revista *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes* para informarle que su artículo "Manejo in vitro de *Fusarium acuminatum* con extractos vegetales adicionados con nanopartículas de óxido de silicio y zinc" ha sido ACEPTADO para su publicación en la revista.

Esperamos seguir contando con sus contribuciones próximamente.

Saludos y bendecido día.

Dra. Elizabeth Casillas Casillas
Editora de la revista
Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes
revistalyc@correo.uaa.mx
449 910 74 00 Ext. 34113

This email was moved from Spam folder. Attachments may contain harmful content.

Recibir
Cuenta
08/12/22

Accepted
05-12-2022

Cartas de acuse de recibo de escrito

2021

- Ad **Uber**
Genera MX\$6,950 al completa...
Empieza a conducir ahora with ...
- EDITOR 1 DE LA R... Feb 14
★ Constancia de arbitraje
Dra. Yisa María Ochoa Fuen...
- Dr Efraín de la Cr... Feb 10
★ [ERA] Solicitud de revisión de u...
Yisa María Ochoa Fuentes: Este ...
- Dr Efraín de la Cr... Jan 31
★ [ERA] Decisión del editor/a
Antonio Orozco Plancarte, E...
- Dr Efraín de la Cr... Jan 21
★ [ERA] Decisión del editor/a
Antonio Orozco Plancarte, E...
- Dr Efraín de la Cr... Jan 13
★ [ERA] Solicitud de revisión de u...
Yisa María Ochoa Fuentes: Este ...

2021

- Dr Efraín de la Cr... 12/15/2021
★ [ERA] Acuse de recibo de revisi...
Yisa María Ochoa Fuentes: Grac...
- Dr Efraín de la Cr... 12/13/2021
★ [ERA] Solicitud de revisión de u...
Yisa María Ochoa Fuentes: Con...
- Dr Efraín de la Cr... 12/8/2021
★ [ERA] Acuse de recibo de envío
Yisa María Ochoa Fuentes: Grac...
- Dr Efraín de la Cr... 12/6/2021
★ [ERA]
Estimados Autores: Lamento inf...
- Dr Efraín de la Cr... 10/18/2021
★ [ERA] Acuse de recibo de envío
Yisa María Ochoa Fuentes: Grac...
- Dr EDITOR 2 9/8/2021
★ [ERA] Nueva notificación de Ec...
Dra. Yisa Ochoa El costo de pu...
- Dr Efraín de la Cr... 9/7/2021
★ [ERA] Decisión del editor/a
Leslie Camero Avilés, Ernest...
- Dr Efraín de la Cr... 9/3/2021
★ [ERA] Contraseña restablecida
Su contraseña para el sitio web ...

[ERA] Acuse de recibo de envío Yahoo/Inbox

DL Dr. Efraín de la Cruz Lázaro
To: Yisa María Ochoa Fuentes

Yisa María Ochoa Fuentes:

Gracias por enviar el manuscrito "Evaluación de extractos vegetales adicionados con nanopartículas de óxido de silicio y zinc sobre *Fusarium oxysporum*" a Ecosistemas y Recursos Agropecuarios. Con nuestro sistema de gestión de revistas en línea, podrá iniciar sesión en el sitio web de la revista y hacer un seguimiento de su progreso a través del proceso editorial.

URL del manuscrito:
<https://era.ujat.mx/index.php/era/authorDashboard/submission/3224>
Nombre de usuario/a: yisa8a

En caso de dudas, contacte conmigo. Gracias por elegir esta revista para publicar su trabajo.

Dr. Efraín de la Cruz Lázaro

Ecosistemas y Recursos Agropecuarios <http://era.ujat.mx>

Reply, Reply All or Forward

Send

Recebido Ochoa 12/12/2021

Recibido Ochoa



INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES Y SERVICIOS AGRARIOS



México
ISSN: 2007-0934

REVISTA MEXICANA DE CIENCIAS AGRICOLAS

Texcoco, Estado de México, 07 de enero de 2022
Núm. Ref.: 3076-22

Dr. Ernesto Cerna-Chávez
Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro
Presente

Por este medio le agradezco y acuso de recibido su manuscrito intitulado: "**Actividad antifungica *in vitro* de nanoformulados para el control de *Fusarium solani***". Cuyos autores (as) **Irasema del Rosario Malacara-Herrera, Yisa María Ochoa-Fuentes, Ernesto Cerna-Chávez, Antonio Orozco-Plancarte, Jerónimo Landeros-Flores y Luis Alberto Aguirre-Uribe** que fue propuesto para su posible publicación a la Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. Le notificamos que el texto inicial del manuscrito, autores (as) principal y los coautores(as), autor(a) para correspondencia no podrán alterarse y quedarán como se envía en esta versión.

Asimismo, me permito informarle que su contribución será enviada a revisión técnica por los árbitros que se designen en la REMEXCA, en caso de ser aceptado se le notificará sobre las observaciones correspondientes.

Agradezco su colaboración y le envío un cordial saludo.

Atentamente

JSAPhPWpRZ6Dw+VhUyyg=EN0XyGBnNRYwvTqOd3FDSIFPo=

Dra. Dora Ma. Sangerman-Jarquín
Editora en Jefa de la Revista
Mexicana de Ciencias Agrícolas

ccp* archivo
DMS.JIgap

Carretera Los Reyes- Texcoco, km 13.5. Coatlinchán, Texcoco, Estado de México, México. C. P. 56250
E-mail: revista_atm@yahoo.com.mx. Tel. 01 800 088 2222 Ext. 85353

INTRODUCCIÓN

La nanotecnología es una ciencia con numerosas aplicaciones en la ciencia y tecnología, con innovación que contribuye a solucionar los problemas que afectan a la sociedad, y se basa en la síntesis de nanopartículas a partir de diferentes tipos de metales como el platino, oro y óxidos metálicos (Gómez-Garzón, 2018; Gurunathan *et al.*, 2015).

En el área agrícola, universidades de ciencias agrícolas y centros de investigación se han propuesto desarrollar tecnologías de manejo alternativo de plagas y enfermedades, como el uso de controladores biológicos, biorracionales, de origen físico y potencializadores (Franco-Mora, 2017).

Por otra parte también han sido estudiados nuevos compuestos de derivados vegetales, llamados aceites esenciales y extractos vegetales, comprobando que son más seguros para el medio ambiente y los humanos (Villa-Martínez *et al.*, 2014).

Los extractos de las plantas contienen metabolitos secundarios, como compuestos fenólicos, taninos, quinonas, cumarinas y flavonoides, que trabajan como fungicidas o bactericidas, los cuales se obtienen por medio de diferentes métodos de extracción (Rodríguez-Castro *et al.*, 2020).

Y una de las complicaciones para producir alimentos hortofrutícolas, son las enfermedades que se transmiten por suelo, causadas principalmente por patógenos vegetales o fitopatógenos como *Fusarium* spp., *Sclerotinia* spp., *Phytophthora* spp., *Rhizoctonia* spp., *Verticillium* spp. y *Pythium* spp. responsables de 50 a 75% de pérdidas en el rendimiento de los cultivos de algodón, maíz, trigo, frutas, hortalizas y ornamentales (Baysal-Gurel *et al.*, 2018). De las cuales se destacan las enfermedades del género *Fusarium*, ya que de acuerdo con la Sociedad Americana de Fitopatología de 108 especies de plantas,

83 han presentado enfermedades por este género, tiene diversas especies que están distribuidas a nivel mundial, conocidas como hongos de suelo, también se considera como enfermedades de la raíz, y son uno de los problemas más complejos en el momento de su control, ya que el suelo les brinda a los fitopatógenos, las condiciones óptimas y elementos necesarios para lograr su desarrollo y poder establecerse (Summerell, 2019; García, 2010), también se conocen como hongos de campo, por el impacto que tienen al ocasionar distintas enfermedades en diversos cultivos (Sumalan *et al*, 2013).

A que hace referencia, se encuentran dentro de los ascomicetos filamentosos, son cosmopolitas, presentando un micelio bien desarrollado, septado, con conidióforos peculiares; algunas especies cuentan con solo un talo unicelular (Villa-Martínez *et al*, 2014). Por esta razón, el manejo de plagas y enfermedades ha sido una de las prácticas primordiales, siendo el control químico su principal método, la mayoría de los casos de manera excesiva, considerado un riesgo para la salud humana, para el medio ambiente y desarrollando resistencia en microorganismos que llevan a más enfermedades fúngicas, más agresivas que antes (Pupo-Feria *et al.*, 2016; Abdel-Monahim *et al.*, 2011).

Para minimizar el impacto de los plaguicidas, se han utilizado como alternativa las nanopartículas que mejoran su eficacia, al utilizar dosis de aplicación muy bajas del producto (Patil *et al.*, 2012). La principal función de los pesticidas elaborados a base de nanopartículas, es hacer más lenta y controlada su liberación, resultando en un nivel de acción mayor (Sun *et al.*, 2014; Kah, 2015).

Justificación

Las principales enfermedades que se desarrollan en los sistemas de producción agrícola, son fúngicas, sobre todo las ocasionadas por patógenos del suelo, causando reducción del rendimiento en cultivos de importancia económica. Dentro de los géneros más importantes se encuentra *Fusarium* spp., como

principal método de control es la aplicación de fungicidas químicos sintéticos, generando resistencia de estos microorganismos, siendo más difícil su control. Por ello se están planteando y desarrollando nuevas alternativas, una de ellas es la aplicación de la nanotecnología en el sector agrícola, en la producción de agro-productos como nanopesticidas o nanoformulados, haciendo que su nivel de acción sea mayor, además con menor costo y sin ocasionar daño a la salud y el medio ambiente.

Hipótesis

Los extractos vegetales adicionados con las nanopartículas de óxido de silicio (SiO_2) y los adicionados con óxido de zinc (ZnO) potencializan el efecto antifúngico en *Fusarium oxysporum*, *F. solani* y *F. acuminatum*.

Objetivo general

Evaluar diferentes extractos vegetales enriquecidos con nanopartículas sobre el crecimiento micelial y producción de esporas en tres especies de *Fusarium*.

Objetivos específicos

1. Evaluar los extractos de canela (*Cinnamomum verum*), cítricos (*Citrus*), gobernadora (*Larrea tridentata*) y mostaza (*Sinapis alba*) enriquecidos con nanopartículas de SiO_2 sobre el crecimiento micelial y producción de esporas en *Fusarium oxysporum*, *F. solani* y *F. acuminatum*.
2. Evaluar los extractos de canela (*Cinnamomum verum*), cítricos (*Citrus*), gobernadora (*Larrea tridentata*) y mostaza (*Sinapis alba*) enriquecidos con nanopartículas de ZnO sobre el crecimiento micelial y producción de esporas en *Fusarium oxysporum*, *F. solani* y *F. acuminatum*.

REVISIÓN DE LITERATURA

Nanotecnología

El desarrollo de la tecnología surgió con el objetivo de solucionar los problemas de la vida cotidiana, para hacerla más fácil y subsistir. El progreso científico-tecnológico ha conducido a superar niveles del conocimiento y campos que hace años no podrían imaginarse, permitiendo tener acceso al mundo que no se percibe a simple vista, como lo es la nanotecnología, controlando la ingeniería molecular y atómica. El prefijo nano significa enano, en la terminología científica cuando se quiere dirigir a algo de dimensiones muy pequeñas, se le añade este prefijo, las más conocidas son: nanopartícula, nanotubo, nanohilo y nanotransistor. La aplicación de la nanotecnología es muy amplia por la gran contribución de soluciones a la sociedad, algunas de estas son: medioambiente, agropecuario, biomedicina, arquitectura, alimentación, textil, comunicaciones y computación, deportivo, generación y almacenamiento de energía, transporte, militar etc. (Acosta, 2019).

Sin darnos cuenta, la nanotecnología forma parte de la vida diaria, por estar presente en artículos que se utilizan cotidianamente, vemos materiales que resultan ser tan familiarizados, sin observar y ser conscientes de como su función es posible, la tecnología ha avanzado tan rápido que no nos detenemos a pensarlo (Quintana y Wilson, 2021).

Las investigaciones publicadas, referente a la nanotecnología en los últimos 22 años, han ido incrementando significativamente, desde sus inicios solo se comenzó a enfocar en estudios básicos de química, en ingeniería aplicada y en la física de materiales, pero en el año 2000 en Estados Unidos se instaló la National Nanotechnology Initiative (NNI) con el objetivo de privar investigaciones en diferentes grupos de investigación internacional, además de generar intereses compartidos en la industria y académicamente unidos al auge del número de recursos globales orientados a la investigación (Álvarez-Láinez *et al.*, 2020).

Ramsden (2016) puntualiza a la nanotecnología de manera muy simple, es una tecnología a nanoescala, es decir, que de 1 a 100 nanómetros (nm) se desarrollan dispositivos, materiales y sistemas eficaces con propiedades únicas.

Las propiedades químicas, eléctricas, físicas, magnéticas, ópticas y mecánicas de los materiales se transforman cuando llegan a un tamaño nanométrico, es por ello que las hace especiales (Kharisov *et al.*, 2016). Por consiguiente se requiere de la física cuántica para lograr comprender su funcionamiento, ya que serán las reacciones cuánticas las que darán las pautas para la creación de procesos y materiales innovadores en base a su comportamiento y función. El primero en señalar de las oportunidades de lograr aplicar la tecnología a nanoescala fue Richar P.Feynman en 1959 (Premio Nobel de Física) en una conferencia llamada "*Hay mucho espacio en el fondo*", sin embargo fue hasta 1971 que Norio Taniguchi utilizó por primera vez el termino nanotecnología, como la técnica que se aplicó en una maquinaria de ultra precisión, pero el origen real de la nanotecnología se dio cuando se inventó el microscopio de efecto túnel por Binning y Rohner en 1981 (Sánchez, 2005). Fue así que en los años 80's la nanotecnología empezó a tomar más seriedad en su desarrollo, comenzando a ocupar un lugar importante para aplicarse para tecnologías innovadoras (Pokrajac *et al.*, 2021).

Como ya se mencionó, la nanotecnología se aplica en diversas ciencias y tecnologías para dar solución a problemas que la sociedad está enfrentando, por lo que en muchos centros de investigación y universidades comenzarán a investigar y crear metodologías para sintetizar nuevos nanomateriales, entre ellas las nanopartículas (Gomez-Garón, 2018). Y aseguran que en la nanotecnología se realizaran las investigaciones e innovaciones que cambiaran por completo la tecnología de este milenio, por lo que la vida de la sociedad postmoderna será completamente diferente (Velásquez *et al.*, 2015). La nanotecnología actualmente es de gran interés, pero a su vez sus áreas de aplicación y las bases

científicas aun llegan a parecer desconocidas, por la falta de difusión sobre sus limitaciones y gran potencial, ya que comúnmente solo se dice que se trata de una tecnología que está revolucionando el mundo (Palma, 2020).

Nanopartículas

Las nanopartículas (NPs) se encuentran en diferentes formas y se dividen en clases de acuerdo a sus propiedades, estructura y tamaño, estas propiedades químicas y físicas son excepcionales debido a su tamaño nano y que la superficie es elevada, mejorando su función, por dichas características se acomodan perfectamente a múltiples aplicaciones domésticas, comerciales, medicas, ambientales y energéticas, las clases o grupos más notables son: NPs metálicas, las basadas en carbono, de base lipídica, de cerámica, semiconductoras y poliméricas (Khan *et al.*, 2019).

Los estudios que se están realizando y que han estado avanzando es diseñar materiales que sean capaces de desempeñar trabajos más eficientes y complicados, por ejemplo, sistemas que almacenen energía de manera más eficaz, materiales que degraden mejor los contaminantes y respuestas sensibles y selectivas para una biomolécula en específico (Schmid, 2010).

El origen de la nanotecnología son las nanopartículas, estas se clasifican en distintas categorías (algunas mencionadas anteriormente): inorgánicas, orgánicas, de carbono y de cerámica. Dentro de las nanopartículas inorgánicas se encuentran las de óxido metálico y las metálicas. En la clasificación de las nanopartículas de carbono están los nanotubos de carbono, fullereno, nanofibras de carbono, grafeno y nanopartículas de carbono negro. Por otra parte también pueden dividirse de acuerdo a su dimensión, ya sea tridimensionales, bidimensionales o/y unidimensionales (Ijaz *et al.*, 2020).

Sin embargo la clasificación de las nanopartículas va a depender del autor, ya que no existe una clasificación estándar, ni específica, como lo mencionan

Márquez-Duran y colaboradores (2021) en el texto titulado “las nanopartículas y sus aplicaciones biomédicas”, la clasificación que presentan se dividen en dos principales categorías, las metálicas (NPs de plata, oro, de aleación y magnéticas), y las no metálicas (NPs poliméricas, de nanogel polimerico, liposómicas, micelares, dendrímeras, de quitosano, proteicas y lipídicas).

La manera de producir las nanopartículas es a partir de distintos tipos de metales, como el hierro, platino, oro u óxidos metálicos, las que más se utilizan se sintetizan a base de iones de platas (Ag-NPs) por su conductividad, estabilidad y su actividad antibacterial y catalítica. Y una alternativa que sea amigable con el medio ambiente es aplicar métodos biológicos utilizando microorganismos, hongos, enzimas y extractos de plantas (Gómez-Garzón, 2018)

Nanotecnología en la agricultura

A lo largo de la revolución verde, la agricultura tuvo un cambio en los rendimientos, ocasionando un beneficio continuo por esta innovación de tecnologías, como la aplicación de variedades de cultivos mejorados, de corta duración y alto rendimiento, la introducción desmedida de fertilizantes y pesticidas sintéticos, minimizando los riesgos a los recursos naturales y al uso sustentable de ellos, actualmente los investigadores del área agrícola están proponiendo y trabajando en innovaciones nanotecnológicas, que estén teniendo mayor beneficio en el crecimiento agrícola para enfrentar los desafíos del cambio climático y la seguridad alimentaria del mundo (Dasgupta *et al.*, 2020).

La nanotecnología es un avance tecnológico que para la agricultura está siendo de gran beneficio, ya que está transformando sus diferentes áreas, aportando herramientas para mejorar la capacidad de las plantas para absorber nutrientes y su rápido crecimiento y desarrollo, además de detectar rápidamente enfermedades en los cultivos, también se logra producir agroproductos como nanopesticidas, nanofertilizantes nano herbicidas y nanosensores, que ayudaran al aumento del rendimiento de alimentos sustentablemente para reducir el impacto ambiental. El mayor desafío de la aplicación de la nanotecnología en el

sector agroalimentario es la generación y la innovación tecnológica para producir la calidad y cantidad de alimento adecuado para sustentar a una población mundial que va en constante crecimiento (Lira-Saldívar *et al*, 2018).

El trabajar con la nanotecnología está permitiendo mejorar la productividad agrícola, resolviendo problemas que convencionalmente no se lograrían, en los países en desarrollo está teniendo grandes resultados y se espera lograr una agricultura sostenible (Manjunatha *et al.*, 2016).

Las aportaciones de la nanotecnología en productos agrícolas se enfocan en la producción de diferentes formulados, de mejoramiento genético y la investigación de los mecanismos de las enfermedades de las plantas (Abobbata, 2017).

La aplicación adecuada de productos químicos a nanoescala podría ser considerada como una solución para el control inteligente de enfermedades que afectan los cultivos, estos nanomateriales trabajan a nivel de la planta ya que se administra al tejido vegetal, tienen la capacidad de controlar la cantidad del plaguicida para aumentar la eficacia en dosis más bajas (Bramhanwade-*et al.*, 2015)

Nanoformulados

Las nanopartículas también se encuentran en la naturaleza, pero para poder tener diferentes aplicaciones y satisfacer las características deseadas o lograr el uso requerido, tienen que ser sintetizadas con propiedades físicas y químicas, en el caso de los nanofertilizantes aumentan la eficiencia de los nutrientes ya que mejora la nutrición de las plantas a diferencia de los fertilizantes tradicionales, así que cualquier producto con nanopartículas mejora su efectividad (Mikkelsen, 2018).

Los nano-formulados son compuestos elaborados a base de nanopartículas o nanomateriales, los cuales contienen partículas que forman un conglomerado o pueden estar sueltas, y el 50% son de dimensiones dentro del rango manométrico (Echevarría-Machado, 2019).

De las aplicaciones importantes es para proteger los cultivos de fitopatógenos y suministrar nutrientes, la función de estos compuestos es la liberación controlada de las sustancias bioactivas, encapsulándolo en nanopartículas para prolongar el efecto de estos en sitios específicos de la planta, por otra parte también se pueden agregar compuestos hidrofóbicos en los nano-formulados potencializando la solubilidad en el medio acuoso, facilitando la interacción con las estructuras vegetales y protegiéndolos de que se evaporen o se degraden (Ingle *et al.*, 2019) .

Para el control de las enfermedades de las plantas se necesitan agentes que minimicen los patógenos a niveles que puedan ser manejados, de compuestos que ocasionen respuestas inmunitarias en plantas huésped y herramientas para una detección anticipada del patógeno. De las primeras nanopartículas en ser aplicadas en una investigación sobre enfermedades de las plantas fueron las de plata, por sus propiedades antimicrobianas de amplio espectro, los resultados obtenidos demostraron ser una alternativa potencial que los pesticidas comerciales (Rajwade *et al.*, 2020).

Principales enfermedades fúngicas

A nivel mundial la producción de alimentos de origen agrícola tiene una limitante y son las enfermedades de los cultivos (Tena *et al.*, 2015). Las enfermedades que principalmente causan problemas graves fitosanitariamente son las originadas por hongos, el incremento de producción por la llegada a nuevos mercados internacionales ha aumentado que el período de conservación en

congeladores de los productos hortofrutícolas sea más largo, por lo tanto hay mayores efectos patológicos, ocasionando enfermedades fúngicas poscosecha (Vicent *et al.*, 2015).

En 2012 se publicó un artículo llamado “The top 10 fungal pathogens in molecular plant pathology” por Dean y colaboradores, de acuerdo a la importancia científica/económica, esta lista incluye a *Colletotrichum spp*; *Magnaporthe oryzae*; *Fusarium graminearum*; *Puccinia spp*; *Blumeria graminis*; *Botrytis cinerea*; *Melampsora lini*; *Mycosphaerella graminicola*; *Ustilago maydis* y *Fusarium oxysporum*.

***Fusarium* y su control.**

Se describió por primera vez al género *Fusarium* como *Fusisporium* en 1809 por Link, es un grupo de hongos ascomicetos que se encuentran principalmente en el suelo, pero también en plantas, son patógenos, saprofitos y endófitos (Leslie and Summerell, 2013). Se consideran hongos de campo por que ocasionan numerosas enfermedades en los cultivos, tienen un micelio septado, muy desarrollado y conidióforos únicos, algunas especies solo forman un talo unicelular, los daños en su hospedero generalmente son irreversibles, ocasionando pérdidas considerables en la economía (Sumalan *et al.*, 2013).

Se le conoce como uno de los géneros con mayor importancia económica internacionalmente y es de los más investigados (Rampersard, 2020). Afecta a diversos cultivos ya que se adapta completamente a las zonas climáticas de todo el planeta, también se considera un patógeno humano y animal, al producir micotoxinas los productos alimenticios se ven afectados siendo nocivos para los seres humanos y el ganado (Summerell, 2019).

Su distribución mundial también se debe a su gran capacidad de desarrollarse en diferentes sustratos y los diferentes mecanismos de fácil dispersión, la importancia agrícola y económica son de gran impacto ya que las pérdidas de

producción pueden llegar al 100% , además de los problemas fitosanitarios que produce, por lo que el control se ha convertido en una parte fundamental tratando que su impacto sea menor o nulo, productores e investigadores estudian soluciones diferentes al control químico, porque la resistencia que los microorganismos presentan cada vez es mayor, y lo que se requiere son soluciones que tengan un impacto ambiental menor, como aquellos productos que sean de origen natural y biológicos (Chavarro y Leal, 2018).

Para el control de enfermedades que causa *Fusarium* generalmente se utiliza el control químico ya que al ser organismos fitopatógenos que se encuentran en el suelo, suele ser más complicado su manejo, sin embargo el control biológico y las prácticas culturales forman parte de su control, siendo el químico el que más se utiliza, fungicidas sistémicos como el carbendasim, tiofanato, tiamendasol, benomil, un grupo de los bencimidazoles, pero se ha probado que causan mutaciones genéticas en los cultivos, además de incrementar la resistencia de los patógenos (Villa-Martínez *et al.*, 2015).

Recientemente la agricultura necesita de alternativas que minimicen los daños al medio ambiente y a la salud humana, así mismo a contribuir en reducir las pérdidas económicas por el uso de agroquímicos. Por otro lado, se han hecho investigaciones con el uso de extractos de plantas como método de control para agentes fitopatógenos, cuyos metabolitos secundarios tienen efecto fungicida, algunos de estos compuestos son: Cumarinas, Flavonoides, Taninos, Fenólicos, Terpenos, Esteroles, Lectinas, Saponinas y Alcaloides (Rodríguez-Castro *et al.*, 2020).

Existen muchas especies vegetales con propiedades antifúngicas, hay aceites esenciales que inhiben el crecimiento del hongo después de la cosecha, alargando la vida útil de cultivos en almacenamiento, de igual forma inhiben también el desarrollo de micotoxinas de especies fúngicas (Shuping y Eloff 2017).

Según Zaker (2016) se pueden encontrar 250 mil especies de plantas con compuestos bioactivos y compuestos químicos sin ser estudiados con muchas aplicaciones en la agricultura, especialmente cuentan con sustancias naturales las cuales son toxicas para los hongos fitopatógenos.

Referencias

- Abobatta WF. 2017. "Nanotechnology A new key for Agricultural sector development". International Conference in Nanotechnology, Biotech and Spectroscopy ICNBS Egypt.
- Acosta, A. J. 2019. La nanotecnología: el mundo de las maquinas a escala nanométrica. RBA.
- Álvarez-Láinez, M. L., Martínez-Tejada, H. V., and Isaza, F. J. 2020. Nanotecnología: Fundamentos y aplicaciones. Universidad de Antioquia.
- Bramhanwade, K., Shende, S., Bonde, S., Gade, A.Rai, M. 2015. Fungicidal activity of Cu nanoparticles against Fusarium causing crop diseases. *Environmental Chemistry Letters*, 14(2), 229–235. Doi: 10.1007/s10311-015-0543-1
- Chavarro, L. Y. B., y Leal, L. C. S. 2018. Control biorracional de hongos del género Fusarium. *Biociencias*, 2(1), 1-19.
- Dean, R., Van Kan, JA, Pretorius, ZA, Hammond-Kosack, KE, Di Pietro, A., Spanu, P.D y Foster, GD. 2012. Los 10 principales patógenos fúngicos en patología vegetal molecular. *Patología vegetal molecular*, 13 (4), 414-430.
- Dasgupta, N., Ranjan, S., and Lichtfouse, E. 2020. Environmental Nanotechnology Volume 4. Environmental Chemistry for a Sustainable World. Doi: 10.1007/978-3-030-26668-4
- Echeverría, M. I. 2019. El tamaño sí importa: los nanofertilizantes en la era de la agricultura de precisión, desde el herbario Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY). *AC*, 11, 69-75.
- Gómez-Garzón, M. 2018. Nanomateriales, nanopartículas y síntesis verde. *Revista Repertorio de Medicina y Cirugía*, 27(2).
- Franco-Mora, O., A. Castañeda-Vildozol., y J.R. Sanchez Pale. 2017. Manejo sustentable de plagas de algunos cultivos de importancia económica en el Estado de México.
- Gurunathan S, Park Jh, Han Jw, Kim Jh. 2015. Comparative assessment of the apoptotic potential of silver nanoparticles synthesized by *Bacillus tequilensis* and *Calocybe indica* in MDA-MB-231 human breast cancer cells: targeting p.53 for anticancer therapy. *International journal of nanomedicine*. 10 (1178-2013 (Electronic)):4203-23.

Ijaz, I., Gilani, E., Nazir, A. y Bukhari, A. 2020. Revisión detallada sobre síntesis química, física y verde, clasificación, caracterizaciones y aplicaciones de nanopartículas. *Green Chemistry Letters and Reviews*. 13 (3), 223-245.

Ingle AP, Shende S, Gupta I, Rai M. 2019. Recent trends in the development of nano-bioactive compounds and delivery systems. Elsevier B.V. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-444-64323-0.00014-X>

Khan, I., Saeed, K. y Khan, I. 2019. Nanopartículas: Propiedades, aplicaciones y toxicidades. *Revista árabe de química*. 12 (7), 908-931.

Kharisov, BI, Kharissova, OV y Ortiz-Mendez, U. 2016. CRC enciclopedia concisa de nanotecnología. Prensa CRC.

Khodakovskaya, M., De silva, K., Biris, A., Dervishi, E., y Villagarcia, H. 2012. Carbon nanotubes induce growth enhancement of tobacco cells. *ACS nano*. 6(3), 2128-2135

Khodakovskaya, M., Kim, B., Kim, J., Alimohammad, M., Dervishi, E., Mustafa, T., and Cernigla, C. 2013. Carbon nanotubes as plant growth regulators: effects on tomato growth, reproductive system, and soil microbial community. *Small*. 9(1), 115-123.

Lira Saldivar, R. H., Méndez Argüello, B., Santos Villarreal, G. D. L., y Vera Reyes, I. 2018. Potencial de la nanotecnología en la agricultura. *Acta universitaria*, 28(2), 9-24.

Leslie, JF y Summerell, B.A. 2013. Una descripción general de *Fusarium*. *Fusarium*, 1-11.

Márquez Durán, E., Hernández Moreno, D., Míguez Santiyán, M. P., Soler Rodríguez, F., y Pérez López, M. 2021. Las nanopartículas y sus aplicaciones.

Manjunatha, SB, Biradar, DP y Aladakatti, YR. 2016. Nanotecnología y sus aplicaciones en la agricultura: una revisión. *J farm Sci*, 29 (1), 1-13.

Mikkelsen, R. 2018. Nanofertilizante y nanotecnología: una mirada rápida. *Mejores cultivos con alimentos vegetales*, 102 (3), 18-19.

Palma, R. J. M. (2020). Introducción a la nanotecnología y sus aplicaciones militares. *Armas y Cuerpos*, (145), 19-24.

Pokrajac, L., Abbas, A., Chrzanowski, W., Dias, GM, Eggleton, BJ, Maguire, S., y Mitra, S. 2021. Nanotecnología para un futuro sostenible: abordando los desafíos globales con la red internacional de nanotecnología sostenible.

Quintana, R. R. B., and Wilson, A. M. M. 2021. Un acercamiento a los fundamentos y aplicaciones de la nanotecnología. *TECNOCENCIA Chihuahua*, 15(3), 167-185.

Rajwade, JM, Chikte, RG y Paknikar, KM .2020. Nanomateriales: nuevas armas en una cruzada contra los fitopatógenos. *Microbiología aplicada y Biotecnología*. Doi: 10.1007/s00253-019-10334-y

Rampersad, S.N. 2020. Patogenómica y manejo de enfermedades por *Fusarium* en plantas. *Patógenos*, 9 (5), 340.

Ramsden, J. 2016. *Nanotechnology: an introduction*. William Andrew.

Rodríguez-Castro, A., Torres-Herrera, S., Domínguez-Calleros, A., Romero-García, A., y Silva-Flores, M. 2020. Extractos vegetales para el control de *Fusarium oxysporum*, *Fusarium solani* y *Rhizoctonia solani*, una alternativa sostenible para la agricultura. *Abanico Agroforestal*, 2.

Sánchez, J. 2005. *Nano Nanotecnología em España*, Edita Fundación para el conocimiento.

Schmid, G. 2010. *Nanoparticles: From Theory to Application: Second Edition*. 10.1002/9783527631544.

Sumalan, R. M., Alexa, E., y Poiana, M. A. 2013. Assessment of inhibitory potential of essential oils on natural mycoflora and *Fusarium* mycotoxins production in wheat. *Chemistry Central Journal*, 7(1), 1-12.

Summerell, B.A. 2019. Resolviendo *Fusarium*: Estado actual del género. *Revisión annual de fitopatología*, 57, 323-339.

Shuping, D. S. S., and Eloff, J. N. 2017. The use of plants to protect plants and food against fungal pathogens: A review. *African Journal of Traditional, Complementary and Alternative Medicines*, 14(4), 120-127.

Tena, A. R., Enríquez, G. R., Pérez, L. L., Martínez, Z. E., and Aguilar, E. E. Q. 2015. Lucha entre microbios: una herramienta para el control de enfermedades de plantas. Vol. 16, No. 11.

Velásquez, C. L., Khatib, S. K., and González, F. L. 2015. *Nanopartículas: fundamentos y aplicaciones*. Universidad de los Andes.

Vicent, A., Mira, J. L., Taberner, V., and Palou, L. 2015. Enfermedades fúngicas de importancia en campo y almacén. Pages 241-275 in: *El Cultivo del Caqui*. M. L. Badenes, D. S. Intrigliolo, A. Salvador, and A. Vicent, eds. Generalitat Valenciana, Valencia, Spain.

Villa-Martínez, A., Pérez-Leal, R., Morales-Morales, H. A., Basurto-Sotelo, M., Soto-Parra, J. M., y Martínez-Escudero, E. 2015. Situación actual en el control de *Fusarium* spp. y evaluación de la actividad antifúngica de extractos vegetales. *Acta agronómica*, 64(2), 194-205.

Weiss, B., Schaefer, U., Zapp, J., Lamprecht, A., Stallmach, A., and Lehr, C. 2006. Nanoparticles made of fluorescence-labelled poly (Llactide-co-glycolide): preparation, stability, and biocompatibility. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 6(9-10), 3048-3056.

Zaker, M. 2016. Natural Plant Products as Ecofriendly Fungicides for Plant Diseases Control- A Review. *The Agriculturists*, 14(1), 134–141. <https://doi.org/10.3329/agric.v14i1.29111>

Manuscritos

Manejo *in vitro* de *Fusarium acuminatum* con extractos vegetales adicionados con nanopartículas de óxido de silicio y zinc

In vitro management of *Fusarium acuminatum* with plant extracts added with silicon oxide and zinc nanoparticles

Irasema del Rosario Malacara-Herrera¹, Yisa María Ochoa-Fuentes¹, Ernesto Cerna-Chávez^{1*}, Jazmín Janet Velázquez-Guerrero¹, Antonio Orozco-Plancarte¹, Agustín Hernández-Juárez¹, Luis Alberto Aguirre-Urbe¹

¹Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Departamento de Parasitología. Laboratorio de Toxicología. Calzada Antonio Narro No. 1923. Buenavista, Saltillo, Coahuila de Zaragoza, México. C.P. 25315. Correos electrónicos: irasemamalacarah@gmail.com; yisa8a@yahoo.com; jabaly1@yahoo.com; jazzguerrero@hotmail.com; antonioorozco25@outlook.es; chinoahj14@hotmail.com; luisaguirreu@yahoo.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6644-4670>; <https://orcid.org/0000-0001-7859-8434>; <https://orcid.org/0000-0003-2263-4322>; <https://orcid.org/0000-0001-8562-467X>; <https://orcid.org/0000-0001-6644-0680>; <https://orcid.org/0000-0001-7059-4471>; <https://orcid.org/0000-0001-8462-1012>

*Autor de correspondencia.

Recibido: 24 de marzo de 2022

Aceptado: 5 de diciembre de 2022

Publicado: 31 de enero de 2023

<https://doi.org/10.33064/iycuaa2023883638e3638>

Resumen

El objetivo de la investigación fue evaluar la actividad antifúngica *in vitro* de dos extractos, gobernadora (*Larrea tridentata* L.) y mostaza (*Sinapis alba* L.) adicionados con nanopartículas de óxido de silicio (SiO) y óxido de zinc (ZnO), sobre el crecimiento micelial y la esporulación de *Fusarium acuminatum*. Se utilizó el método de medio envenenado, se determinaron las concentraciones inhibitorias y el número de conidios. Los datos fueron analizados mediante un análisis probit, ANOVA y prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Los resultados demostraron que los tratamientos de mostaza con ZnO tienen mejor efecto inhibitorio y en esporulación los tratamientos de gobernadora con SiO. Los extractos adicionados con nanopartículas son efectivos en el control *in vitro* de *F. acuminatum*.

Palabras clave: nanoformulados; fitopatógeno; efectividad; crecimiento micelial; esporulación.

Abstract

The objective of the research was to evaluate the *in vitro* antifungal activity of two extracts, governor (*Larrea tridentata* L.) and mustard (*Sinapis alba* L.) added with nanoparticles of silicon oxide (SiO) and zinc oxide (ZnO), on the mycelial growth and sporulation of *Fusarium acuminatum*. The poisoned medium method was used, inhibitory concentrations and the number of conidia were determined. Data were analyzed using a probit analysis, ANOVA and Tukey test ($p \leq 0.05$). The results showed that mustard treatments with ZnO have a better inhibitory effect and in sporulation governor treatments with SiO. Extracts added with nanoparticles are effective in the *in vitro* control of *F. acuminatum*.

Keywords: nanoformulates; phytopathogen; effectiveness; mycelial growth; sporulation.

Introducción

Los sistemas de producción de tipo intensivo, han traído considerables daños al suelo (Wall, 2019), siendo una de las consecuencias el desarrollo de patógenos, principalmente hongos (Ampt, van Ruijven, Raaijmakers, Termorshuizen & Mommer, 2019). Uno de los géneros más importantes es *Fusarium* (Ramírez-Mares & Hernández-Carlos, 2015), que afecta a las plantas provocando marchitez vascular. Dentro de este género se encuentra una de las especies con mayor difusión mundial, *F. acuminatum* (Seifi, Ketabchi, Aminian, Etebarian & Kamali, 2014). La cuál ocasiona pudrición basal en ajo (*Allium sativum* L.) y cebolla (*Allium cepa* L.) principalmente (Ochoa-Fuentes, Cerna-Chávez, Gallegos-Morales, Landeros-Flores, Delgado-Ortiz, Hernández Camacho & Olalde-Portugal, 2012). Este hongo se encuentra asociado a la producción de micotoxinas, en particular tricotecenos (Logrieco, Altomare, Moretti & Bottalico, 1992). Así mismo, ha sido reportado ocasionando Damping off en pino Aleppo (*Pinus halepensis*) en Algeria (Lazreg, Belabid, Sánchez, Gallego, Garrido-Cárdenas & Elhaitoum, 2013) y en fruto de Kiwi (*Actinidia deliciosa*) en China (Wang, Ai, Fan, Lv, Qin, Yang & Liu, 2015). Como alternativa para manejar este tipo de enfermedades se han realizado investigaciones sobre el uso de extractos vegetales, metabolitos y aceites esenciales que se encuentran en las plantas, ya que son de bajo costo, amigables con el medio ambiente y no dañan a la salud humana (Villa-Martínez, Pérez-Leal, Morales-Morales, Basurto-Sotelo, Soto-Parra & Martínez-Escudero, 2015). Así mismo ha surgido la nanotecnología que ha tenido auge en sistemas de agricultura sustentable, en la elaboración de plaguicidas

nanoparticulados aumentando su efectividad (Marín- Bustamante, Hernández-Flores & Cásarez-Santiago, 2021). Por esta razón, el objetivo del presente trabajo fue evaluar dos extractos comerciales de la empresa CULTA SA DE CV, adicionados con nanopartículas de óxido de silicio (SiO) y óxido de zinc (ZnO) para potenciar la efectividad de los extractos sobre el crecimiento micelial y la producción de esporas de *Fusarium acuminatum*

Desarrollo

La cepa del hongo de *Fusarium acuminatum* fue proporcionada por el Laboratorio de Toxicología del Departamento de Parasitología de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro en Saltillo, Coahuila. Los extractos gobernadora (*Larrea tridentata*) y mostaza (*Sinapis alba*) y las nanopartículas SiO y ZnO fueron proporcionados por la empresa Cultra

S.A de C.V. Se prepararon 12 tratamientos adicionados con nanopartículas, donde se usaron 1,3 y 5 mL de concentrado de nanopartículas de óxido de silicio y zinc previamente activadas y se aforó a 100 mL con extracto vegetal respectivamente, de modo que los tratamientos se denominaron: Gobernadora/Silicio 1, 3 y 5%, Gobernadora/Zinc 1, 3 y 5%, Mostaza/Silicio 1, 3 y 5% y Mostaza/Zinc 1, 3 y 5%. Los tratamientos evaluados fueron 14 incluyendo como tratamiento positivo a cada extracto vegetal sin nanopartículas, usando diferentes concentraciones (10, 100, 500, 1 000, 3 000 y 5 000 ppm) tomando el extracto crudo al 100%. Los bioensayos se llevaron a cabo implementando la metodología de medio envenenado con PDA en cajas Petri (Ochoa-Fuentes, Cerna-Chávez, Gallegos-Morales, Landeros-Flores, Delgado-Ortiz, Hernández Camacho & Olalde-Portugal, 2012). Se evaluó el crecimiento micelial para el porcentaje de inhibición mediante la fórmula: $\% \text{ inhibición} = \frac{\text{crecimiento micelial del testigo} - \text{crecimiento micelial del tratamiento}}{\text{crecimiento micelial del testigo}} \times 100$. Para el conteo de esporas se utilizó una cámara de Neubauer (Bustillo, 2010). Con los datos de porcentaje de inhibición se calcularon las dosis inhibitorias medias (DI50) mediante un análisis Probit, para evaluar la producción de esporas se realizó un análisis de varianza completamente al azar y una comparación de medias con el método Tukey ($p \leq 0.05$), utilizando el programa estadístico SAS System versión 9.0 en ambos casos. Los tratamientos de gobernadora con nanopartículas de óxido silicio y zinc al 5% (Tabla 1), presentaron menor DI50 de 846.61 y 939.63 ppm con respecto al extracto de gobernadora sin nanopartículas, que mostró una DI50 de 1355 ppm, mientras que los extractos de mostaza con nanopartículas de óxido de zinc y silicio al 5% lograron inhibir el 50% del hongo a una DI50 de 757.55 y 894.76 ppm con respecto

al extracto de mostaza que presentó una DI_{50} de 893.62 ppm. Observando que al añadir las nanopartículas a los extractos se requirieron menores concentraciones para inhibir el crecimiento micelial del hongo en un 50%. Es importante señalar que no existen reportes científicos relacionados a la determinación de concentraciones inhibitorias de extractos con nanopartículas de silicio y zinc. Sin embargo, Siddiqui, Parveen, Ahmad & Hashem. (2019) mencionan que las nanopartículas de Zinc poseen actividad antifúngica en *Fusarium* sp. González-Merino, Hernández- Juárez, Betancourt-Galindo, Ochoa-Fuentes, Valdez-Aguilar & Limón-Corona (2021). Encontraron que las nanopartículas de Óxido de Zinc controlan a *Fusarium oxysporum* en el cultivo del tomate. Por su parte, Huang, Roberts & Datnoff (2011) mencionó que al suministrar óxido de silicio en soluciones nutritivas reducen la severidad de la enfermedad causada por *Fusarium* sp. en plantas de tomate.

Tabla 1. Dosis Inhibitoria media (DI50) del crecimiento micelial de *Fusarium acuminatum* por los extractos de gobernadora y mostaza a los diferentes porcentajes de las nanopartículas de óxido de silicio y zinc.

Tratamiento	DI50 (ppm)	Limite Fiducial	
		Inferior	Superior
Gobernadora	1355	976.6	1714
Gobernadora/Silicio 1%	1376	910.27	1815
Gobernadora/Silicio 3%	2005	1589	2406
Gobernadora/Silicio 5%	846.61	296.47	1398
Gobernadora/Zinc 1%	1081	802.91	1368
Gobernadora/Zinc 3%	1026	756.74	1302
Gobernadora/Zinc 5%	939.63	725.17	1159
Mostaza	893.62	772.54	1031
Mostaza/Silicio 1%	999.11	825.73	1214
Mostaza/Silicio 3%	1013	850.71	1214
Mostaza/Silicio 5%	894.76	771.26	1035
Mostaza/Zinc 1%	851.34	740.91	973.78
Mostaza/Zinc 3%	1014	913.48	1132
Mostaza/Zinc 5%	757.55	695.12	823.07

Elaboración propia

La actividad esporulante (Tabla 2) disminuyó con el uso de Gobernadora/Silicio 1, 3 y 5% (1.49, 0.90 y 0.85x10⁶ mL⁻¹) a 3000 ppm con respecto al testigo 19.78 y 18.29x10⁶ mL⁻¹ en las concentraciones de 0 y 3000 ppm, mientras que los tratamientos con nanopartículas de óxido de zinc promovieron la producción de esporas. En los tratamientos de mostaza con nanopartículas de óxido de zinc y silicio, promovieron la esporulación con respecto al testigo en todas las concentraciones evaluadas. Los extractos de gobernadora se han utilizado como estrategia ecológica y se ha demostrado que son una alternativa para un manejo integrado para *Fusarium* (Peñuelas-Rubio, Arellano-Gil, Verdugo-Fuentes, Chaparro-Encinas, Hernández-Rodríguez, Martínez-Carrillo & Vargas-Arispuro, 2017). En un estudio sobre el uso de diferentes productos botánicos, entre ellos mostaza, demostraron que hubo una reducción en la germinación de conidios (Drakopoulos, Torrijos, Meca, Weber, Bänziger, & Vogelgsang, 2019).

Tabla 2. Efecto de las nanopartículas de Oxido Silicio y Zinc en la esporulación de *Fusarium acuminatum*.

Extractos	C	Tratamientos (Esporas x10 ⁶ mL ⁻¹)						
		Testigo	1%SiO	3%SiO	5%SiO	1%ZnO	3%ZnO	5%ZnO
Gobernadora	0	19.78 a	19.78 a	19.78 a	19.78 a	19.78 b	19.78 b	19.78 b
	1000	15.84 a	1.49 b	1.33 b	1.17 b	24.64 b	15.26 b	29.97 a
	3000	18.29 a	1.49 b	0.90 b	0.85 b	33.22 a	16.32 b	28.21 a
	5000	13.38 a	1.65 b	1.17 b	1.17 b	17.38 b	46.88 a	26.77 ab
Mostaza	0	19.78 a	19.78 a	19.78 a	19.78 a	19.78 a	19.78 a	19.78 a
	1000	0.37 b	4.53 b	3.89 b	0.42 b	1.81 c	5.33 b	4.37 bc
	3000	0 b	2.61 b	0 b	1.17 b	10.45 b	8.26 b	6.66 b
	5000	0 b	0.37 b	0 b	0 b	0.26 c	3.30 b	0 c

C= Concentración en ppm, los tratamientos con la misma letra son iguales y tratamientos con diferente letra son estadísticamente diferentes Tukey ($p \leq 0.05$).

Elaboración propia

Los tratamientos de mostaza con nanopartículas de ZnO tienen mejor efecto inhibitorio, pero en la esporulación sobresalieron los tratamientos de gobernadora con control *in vitro* de *F. acuminatum*, por lo que se evaluarán en invernadero y campo, los tratamientos que mejor efecto mostraron, para de esta manera integrarla como estrategia de manejo de la enfermedad.



Tratamientos del extracto de mostaza con nanopartículas de óxido de zinc

Fuente: Elaboración propia

Referencias

1. Ampt, E. A., van Ruijven, J., Raaijmakers, J. M., Termorshuizen, A. J. & Mommer, L. (2019). Vinculación de la ecología y la patología vegetal para desentrañar la importancia de los patógenos fúngicos transmitidos por el suelo en los pastizales ricos en especies. *Revista Europea de Patología Vegetal*, 154 (1): 141-156. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10658-018-1573-x>
2. Bustillo, A. (2010). Método para cuantificar suspensiones de esporas de hongos y otros organismos. Universidad Nacional de Colombia, Palmira, Colombia. DOI: 10.13140/RG.2.1.3594.5128
3. Drakopoulos, D., Luz, C., Torrijos, R., Meca, G., Weber, P., Bänziger, I., & Vogelgsang, S. (2019). Uso de botánicos para suprimir diferentes etapas del ciclo de vida de *Fusarium graminearum*. *Fitopatología*, 109 (12): 2116-2123. DOI: <https://doi.org/10.1094/PHYTO-06-19-0205-R>
4. González-Merino, A. M., Hernández-Juárez, A., Betancourt-Galindo, R., Ochoa-Fuentes, Y. M., Valdez-Aguilar, L. A., & Limón-Corona, M. L. (2021). Antifungal activity of zinc oxide nanoparticles in *Fusarium oxysporum*-*Solanum*. *Journal of Phytopathology*. 00:1-12. DOI:10.1111/jph.13023.
5. Huang, C. H., Roberts, P. D., & Datnoff, L. E. (2011). El silicio suprime la pudrición de la corona y la raíz por *Fusarium* del tomate. *Revista de fitopatología*, 159 (7-8): 546-554. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1439-0434.2011.01803.x>
6. Lazreg, F., Belabid, L., Sánchez, J., Gallego, E., Garrido-Cardenas, J.A., & Elhaitoum,
7. (2013). First report of *Fusarium acuminatum* causing Damping-off disease on *Aleppo pine* in Algeria. *Plant Disease*. 97(4). 577. DOI:<https://doi.org/10.1094/PDIS-06-12-0608-PDN>.
8. Logrieco, A., Altomare, C., Moretti, A., & Bottalico, A. (1992). Cultural and toxigenic variability in *Fusarium acuminatum*. *Mycological research*, 96(6), 518-523.
9. Marín-Bustamante, M. Q., Hernández-Flores, A., & Cásarez-Santiago, R. G. (2021). Nanotecnología y Agricultura: Detección, Monitoreo y Remediación de Contaminantes. *Revista Salud y Administración*, 8(23): 29-35.
10. Ochoa-Fuentes, Y. M., Cerna-Chávez, E., Gallegos-Morales, G., Landeros-Flores, J., Delgado-Ortiz, J.C.; Hernández Camacho, S. & Olalde-Portugal, V. (2012). Identificación de especies de *Fusarium* en semilla de ajo en Aguascalientes, México. *Revista mexicana de micología*, 36: 27-3
11. Peñuelas-Rubio, O., Arellano-Gil, M., Verdugo-Fuentes, A. A., Chaparro-Encinas, L

A., Hernández-Rodríguez, S.E., Martínez-Carrillo, J.L., & Vargas-Arispuro, I.C. (2017). Extractos de *Larrea tridentata* como una estrategia ecológica contra *Fusarium oxysporum radices-lycopersici* en plantas de tomate bajo condiciones de invernadero, *Revista mexicana de fitopatología*. 35-3: 360-376.

DOI: <https://dx.doi.org/10.18781/r.mex.fit.1703-3>

12. Ramírez-Mares, M. V. & Hernández-Carlos, B. (2015). Productos naturales derivados de plantas del continente americano para el control de hongos fitopatógenos: Unarevisión. *J. Globo. Innovador agrícola Soc. Sci*, 3: 2312-5225.
13. Seifi, T., Ketabchi, S., Aminian, H., Etebarian, H. R., & Kamali, M. (2014). Investigación y comparación de la actividad de nucleación del hielo en *Fusarium avenaceum* y *Fusarium acuminatum*. *En t. J. Farm. Allied Sci*, 3: 518-528.
14. Siddiqui, Z. A., Parveen, A., Ahmad, L., & Hashem, A. (2019). Effects of graphene oxide and zinc oxide nanoparticles on growth, chlorophyll, carotenoids, proline contents and diseases of carrot. *Scientia Horticulturae*, 249: 374-382.
15. Villa-Martínez, A., Pérez-Leal, R., Morales-Morales, H.A., Basurto-Sotelo, M., Soto-Parra, J.M, & Martínez-Escudero, E. (2015). Situación actual en el control de *Fusarium* spp. y evaluación de la actividad antifúngica de extractos vegetales. *Acta Agronómica*. 64(2): 194-205.
16. Wall, L. G. (2019). La ecología microbiana y la agricultura. Producciones Graficas S.A. Horizonte A.
<https://notablesdelaciencia.conicet.gov.ar/handle/11336/135423>
17. Wang, C. W., Ai, J., Fan, S. T., Lv, H. Y., Qin, H. Y., Yang, Y. M & Liu, Y. X. (2015). *Fusarium acuminatum*: A new pathogen causing postharvest rot on stored kiwifruit in China. *Plant Disease*. <http://doi.org/10.1094/PDIS-01-15-0021-PDN>. 99(11). 1644.

Evaluación de extractos vegetales adicionados con nanopartículas de óxido de silicio y zinc sobre *Fusarium oxysporum*

Irasema del Rosario Malacara Herrera¹, Yisa María Ochoa Fuentes¹, Ernesto Cerna Chávez^{1*}, Antonio Orozco Plancarte¹, Jerónimo Landeros Flores¹ y Luis Alberto Aguirre Uribe¹.

¹Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Departamento de Parasitología. Laboratorio de Toxicología. Calzada Antonio Narro # 1923. Buenavista, Saltillo, Coahuila de Zaragoza, México. C.P. 25315. Tel: (844) 411-03-26. * Autor de correspondencia: jabaly1@yahoo.com

Resumen. *Fusarium oxysporum* es un hongo patógeno vegetal de mayor importancia, infecta a cultivos, ocasionando el marchitamiento y pudrición de raíces. El objetivo del presente trabajo fue evaluar *in vitro* los extractos de gobernadora (*Larrea tridentata* L.) y mostaza (*Sinapis alba* L.), con nanopartículas de óxido de silicio (SiO₂) y de óxido de zinc (ZnO₂) sobre el crecimiento micelial y esporulación de *F. oxysporum*. Se determinaron las concentraciones inhibitorias y el número de conidios, mediante medios envenenados. Los datos se analizaron con un análisis Probit, ANOVA y prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Los resultados indicaron que los extractos de gobernadora y mostaza con SiO₂, presentaron mejor efecto inhibitorio sobre el crecimiento micelial, y se observó reducción significativa en la esporulación, a diferencia de los extractos adicionados con ZnO₂. Las nanopartículas de SiO₂ con extractos de gobernadora y mostaza son efectivas para el manejo *in vitro* de *F. oxysporum*.

Palabras clave: crecimiento micelial, efecto inhibitorio, nanotecnología, medios envenenados.

Summary. *Fusarium oxysporum* is a major plant pathogenic fungus that infects crops, causing wilting and root rot. The objective of the present work was to evaluate in vitro extracts of governatrix (*Larrea tridentata* L.) and mustard (*Sinapis alba* L.) with silicon oxide (SiO₂) and zinc oxide (ZnO₂) nanoparticles on mycelial growth and sporulation of *F. oxysporum*. Inhibitory concentrations and the number of conidia were determined using poisoned media. Data were analyzed by Probit analysis, ANOVA and Tukey's test ($p \leq 0.05$). The results indicated that governor and mustard extracts with SiO₂, presented better inhibitory effect on mycelial growth, and significant reduction in sporulation was observed, unlike the extracts added with ZnO₂. SiO₂ nanoparticles with governor and mustard extracts are effective for *in vitro* management of *F. oxysporum*.

Key words: mycelial growth, inhibitory effect, nanotechnology, poisoned media. El ajo (*Allium sativa* L.) es una hortaliza de bulbo de gran importancia por sus propiedades medicinales y condimentales (Escobar *et al.*, 2012). Su producción en México hasta marzo de 2021 fue de 87 249. 61 toneladas, la superficie sembrada de 7140.98 hectáreas y se cosecharon 6786.71 hectáreas, con un rendimiento de 12.86 udm/ha (SIAP, 2021). El estado con mayor porcentaje de producción a nivel nacional es Zacatecas con más del 50% del volumen total, otros estados productores del ajo son Aguascalientes, Sonora, Guanajuato, Puebla, Baja California, Michoacán y Veracruz (SADER, 2021). Por lo que se considera un cultivo importante y competitivo. Además, el mercado demanda un

producto comercial de calidad, por lo que es importante obtener bulbos que cumplan con exigencias comerciales, y así obtener también una alta rentabilidad (Marco, 2010). La principal causa de la disminución de su rendimiento y calidad de la semillas, son las enfermedades fitopatógenas (Izquierdo y Gómez, 2012), de las cuales se destaca la enfermedad de marchitez vascular por el hongo *Fusarium oxysporum* (Gordon, 2017), ya que ataca al cultivo desde el estado plántula, conocido dentro de los hongos de suelo, también se considera como enfermedad de la raíz, son uno de los problemas más complejos en el momento de su control (Ochoa *et al*, 2012). Por esta razón, el manejo de enfermedades ha sido una de las prácticas primordiales, siendo el control químico su principal método, la mayoría de los casos de manera excesiva, considerándose un riesgo para la salud humana, para el medio ambiente y creando resistencia en microorganismos que llevan a más enfermedades fúngicas, más agresivas que antes (Pupo-Feria *et al.*, 2016; Abdel-Monahim *et al.*, 2011). Por tal motivo es importante introducir alternativas ecológicas y económicas para reducir su impacto (Tamilselvi y Arumugan, 2017), por lo anterior han sido estudiados nuevos compuestos de derivados vegetales, como aceites esenciales y extractos vegetales, comprobando que son más seguros para el medio ambiente y humanos (Villa-Martínez *et al*, 2014). Por otra parte, ha surgido una nueva ciencia llamada nanotecnología, la cual tiene numerosas aplicaciones en otras ciencias y tecnologías, y ha ofrecido innovación que contribuye a solucionar los problemas que afectan a la sociedad, se basa en la producción de nanopartículas a partir de diferentes tipos de metales como el platino, oro y óxidos metálicos (Gómez, 2018; Gurunathan *et al.*, 2015). Para que el impacto de los plaguicidas sea menor, se

han utilizado como alternativa las nanopartículas, que mejoran su eficacia, ya que se utilizan dosis de aplicación muy bajas del producto (Patil *et al.*, 2012). Se pueden encontrar pesticidas elaborados a base de nanopartículas, su función es hacer más lenta y controlada su liberación, resultando que su nivel de acción sea mayor (Sun *et al.*, 2014; Kah, 2015). Por tal motivo, el objetivo fue evaluar *in vitro* los extractos de gobernadora (*Larrea tridentata* L.) y mostaza (*Sinapis alba* L.), adicionados con nanopartículas de óxido de silicio (SiO₂) y de óxido de zinc (ZnO) sobre el crecimiento micelial y esporulación de *F. oxysporum*, como potencializadores a la función de los extractos.

La investigación se llevó a cabo en el Laboratorio de Toxicología del departamento de parasitología, dentro de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

La cepa de *F. oxysporum* se obtuvo del cepario del laboratorio de Toxicología, las características morfológicas coincidieron con la descripción reportada por Lesley y Summer (2006), así mismo, fue reactivada en medio de cultivo Papa Dextrosa Agar (PDA) (MCD LAB[®]).

Los extractos evaluados fueron de gobernadora (*Larrea tridentata*) y mostaza (*Sinapis alba* L.), los cuales fueron proporcionados por la empresa Cultra S.A de C.V, al igual que las nanopartículas de SiO₂ y ZnO.

Los extractos fueron mezclados con las nanopartículas de SiO₂ y ZnO a 1, 3 y 5% por cada 100 ml de extracto y se obtuvieron 14 tratamientos incluyendo los extractos puros, ambos tratamientos se consideraron al 100 % para realizar las diferentes concentraciones (10, 100, 500, 1 000, 3 000 y 5 000 ppm), a excepción de la mostaza donde se añadieron 1 500 y 2 500 ppm. Los bioensayos se

realizaron utilizando la metodología de medio de cultivo PDA envenenado (Ochoa Fuentes *et al.*, 2012), empleando cajas Petri, se dejaron 24 h para su solidificación. Después se colocó en cada caja Petri un explante del fitopatógeno *F. oxysporum*, se incubaron a 26 °C hasta observar crecimiento del micelio, el cual se midió cada 24 h con un vernier, hasta que el testigo (PDA sin tratamiento) alcanzara las medidas de la caja Petri. El porcentaje de inhibición de crecimiento micelial se obtuvo con la fórmula propuesta por Enzziyani *et al.* (2004) % inhibición = crecimiento micelial del testigo - crecimiento micelial del tratamiento / crecimiento micelial del testigo x 100. Mientras que, para el conteo de esporas, se utilizó una cámara de Neubauer, siguiendo el método para cuantificación de suspensión de esporas de hongos, descrito por Bustillo (2010).

Se realizó un análisis Probit para obtener la dosis inhibitoria media (DI_{50}) con los porcentajes de inhibición, usando el programa estadístico SAS System versión 9.0. Para evaluar la producción de esporas se utilizaron los datos de esporulación de cada tratamiento y se hizo un análisis de varianza completamente al azar y comparación de medias por el método Tukey ($p \leq 0.05$), mediante el programa estadístico SAS System versión 9.0.

En la tabla 1 se muestran los tratamientos de gobernadora y mostaza sin y con nanopartículas de SO_2 y ZnO , donde las DI_{50} de gobernadora presentaron valores muy similares, siendo gobernadora silicio 3 % el tratamiento con el valor más bajo con 2 327 ppm, y gobernadora ZnO_2 al 5% el valor más alto con 2651ppm. Así mismo, se observó que en el tratamiento gobernadora más SiO_2 a 1 % arrojó un valor mayor al tratamiento de gobernadora sin nanopartículas, esto posiblemente se debe a que, al ser un tratamiento con un porcentaje

pequeño de nanopartículas, el hongo active un mecanismo de defensa para sobrevivir y su crecimiento sea vea acelerado como una respuesta de supervivencia (Carroll *et al.*, 2016), mientras que gobernadora SiO₂ al 3 y 5 % presentan valores menores que gobernadora sin nanopartículas. Sin embargo, los tratamientos con nanopartículas de ZnO fueron los que arrojaron DI₅₀ más altas, se puede observar que mientras va subiendo el porcentaje de las nanopartículas de ZnO, los valores van en aumento, observando que, en lugar de inhibir al hongo, este lo va activando. Estos resultados coinciden con una investigación que muestra que el ZnO no tiene actividad significativa en este hongo (Pariona *et al.*, 2020). Por otra parte, en los resultados de los tratamientos con mostaza se observó que los valores más bajos, fueron en los tratamientos de mostaza SiO₂ y mostaza ZnO al 5 % con 821.31 ppm y 843.79 ppm, respectivamente, seguido de mostaza SiO₂ y ZnO al 3 % con 1047 ppm y 1061 ppm. El valor más alto lo presentó mostaza SO₂ al 1% con 1567 ppm. En un estudio sobre los síntomas del marchitamiento por *Fusarium*, en plantas de banano, demostraron que al aplicar diferentes tratamientos con SiO₂, disminuyeron las enfermedades causadas por *F. oxysporum* (Fortunato *et al.*, 2012). Razón por la cual, mostaza con SO₂ mostró mejores resultados que en gobernadora. Drakopoulos *et al.*, 2010 en su investigación sobre el control de *Fusarium graminearum* con un extracto a base de mostaza in vitro, concluyeron que es un bioplaguicida que pueden favorecer a controlar las enfermedades causadas por ese hongo.

En relación con la actividad antiesporulante, el tratamiento de gobernadora demostró tener diferencias significativas en sus diferentes concentraciones,

siendo la de 5000 ppm la que obtuvo el menor número de esporas con 0.05 millones de esporas/ml (Tabla 2), mientras que los tratamientos al 3 y 5% de gobernadora más SiO₂ también presentan valores bajos con 0.83 y 0.64 millones de esporas/mL, respectivamente. Los tratamientos de mostaza a las dosis más altas con y sin nanopartículas de SO₂ mostraron que estadísticamente funcionan igual, ya que inhiben la producción de esporas. Mientras con el ZnO, en el extracto de gobernadora a los porcentajes de 1, 3 y 5 % se obtuvo una producción más alta de esporas, los valores más bajos los tiene la gobernadora sin las nanopartículas de ZnO en la concentración de 5000 ppm con 0.05 millones de esporas/ml y en el tratamiento de ZnO al 3 % la mayor producción se observó a las 5 000 ppm con 39.36 millones de esporas/ml, y las otras concentraciones estadísticamente son iguales, se puede observar que la producción de esporas con el tratamiento de ZnO incrementaron. En el extracto de mostaza con los diferentes porcentajes de ZnO, las tres concentraciones tienen el mismo comportamiento estadísticamente, el testigo es el que muestra la mayor producción se esporas, y en las 3 000 ppm hay una inhibición completamente de esporas. Estos resultados se asemejan a un estudio *in vitro* sobre la eficacia antifúngica de NPs de ZnO en *Fusarium oxysporum* de Yehia y Ahmed (2013) donde deducen que la actividad antifúngica del ZnO depende de la concentración, por lo que, a concentraciones más altas, el efecto será mejor.

Entre los tratamientos de gobernadora y mostaza con SiO₂ y con ZnO, los que presentan mejor inhibición son los que contienen nanopartículas de SiO₂, al observarse mayor inhibición en sus diferentes porcentajes, mientras que con ZnO, la producción de esporas aumento, resultados similares con el óxido de zinc

presenta Guerrero *et al.* (2020) probando oxido de cobre y óxido de zinc en alteraciones miceliales y daño a la membrana celular, donde el cobre tuvo mejores resultados que zinc. Mientras el silicio sigue mostrando sus mejores resultados, como en la investigación de Abbai *et al.* (2019) donde observaron una reducción del 50 % de las enfermedades fúngicas al utilizar diferentes tratamientos con silicio que se aplicó para la pudrición de la raíz del ginseng.

Tabla1. Dosis Inhibitoria media (DI₅₀) sobre el crecimiento micelial de *Fusarium oxysporum* por los extractos de gobernadora (*Larrea tridentata*), de mostaza (*Sinapis alba*), adicionadas a diferentes porcentajes de nanopartículas de óxido de silicio y zinc.

Tratamiento	DI ₅₀ (ppm)	Limite Fiducial		DI ₉₀ (ppm)	P-valor	Ecuación de predicción
		Inferior	Superior			
Gobernadora	2372	1969	2852	8932	<.0001	y=(-7.511719865 ± 2.2256065484)
Gobernadora/Silicio 1%	2379	1951	2898	9695	<.0001	y=(-7.091031757 ± 2.1001982485)
Gobernadora/Silicio 3%	2327	1922	2810	9326	<.0001	y=(-7.156405575 ± 2.1256037816)
Gobernadora/Silicio 5%	2331	1899	2857	10070	<.0001	y=(-6.790595941 ± 2.0165145785)
Gobernadora/Zinc 1%	2444	1937	3030	9246	<.0001	y=(-7.515045436 ± 2.2180382884)
Gobernadora/Zinc 3%	2558	2167	3010	10632	<.0001	y=(-7.059178847 ± 2.0713907138)
Gobernadora/Zinc 5%	2651	2086	3321	9733	<.0001	y=(-7.767956726 ± 2.269034895)
Mostaza	1451	456.66	3359	5587	0.0078	y=(-6.918469067 ± 2.1883091217)
Mostaza/Silicio 1%	1567	410.23	5965	6769	0.0136	y=(-6.442748389 ± 2.0165045653)
Mostaza/Silicio 3%	1047	473.12	2138	5309	0.0003	y=(-5.488408269 ± 1.8174422102)
Mostaza/Silicio 5%	821.31	341.59	1657	4722	0.0002	y=(-4.917342507 ± 1.6871939522)
Mostaza/Zinc 1%	1200	315.35	37715	61547	0.0026	y=(-2.307821614 ± 0.7494710185)
Mostaza/Zinc 3%	1061	415.77	3974	45111	<.0001	y=(-2.380970482 ± 0.7869144921)
Mostaza/Zinc 5%	843.79	476.29	1361	4269	<.0001	y=(-5.326123008 ± 1.8201277371)

Entre los tratamientos de gobernadora y mostaza con SiO_2 y con ZnO , los que presentan mejor inhibición son los que contienen nanopartículas de SiO_2 , al observarse mayor inhibición en sus diferentes porcentajes, mientras que con ZnO , la producción de esporas aumento, resultados similares con el óxido de zinc presenta Guerrero *et al.* (2020) probando oxido de cobre y óxido de zinc en alteraciones miceliales y daño a la membrana celular, donde el cobre tuvo mejores resultados que zinc. Mientras el silicio sigue mostrando sus mejores resultados, como en la investigación de Abbai *et al.* (2019) donde observaron una reducción del 50 % de las enfermedades fúngicas al utilizar diferentes tratamientos con silicio que se aplicó para la pudrición de la raíz del ginseng.

Tabla 2. Efecto de las nanopartículas de Oxido Silicio y Zinc en la esporulación de *Fusarium oxysporum*.

Tratamiento	Concentración (ppm)	Concentración (%)			
		0%	1%	3%	5%
Gobernadora +SO ₂	0	11.79 a	11.79 a	11.79 a	11.79 a
	1000	1.01 b	2.95 b	1.88 b	1.44 b
	3000	0.46 c	2.35 c	0.85 c	1.19 c
	5000	0.05 d	1.28 d	0.83 d	0.64 d
Mostaza +SO ₂	0	11.79 a	11.79 a	11.79 a	11.79 a
	1500	5.76 b	1.38 b	5.38 b	2.53 b
	2500	1.86 bc	1.7 b	2.77 bc	0.10 b
	3000	0 c	0.05 b	0 c	0 b
Gobernadora +ZnO	0	11.79 a	11.79 c	11.79 b	11.79 b
	1000	1.01 b	37.70 a	12.66 b	27.40 a
	3000	0.45 c	27.62 b	16.25 b	29.97 a
	5000	0.05 d	6.80 d	39.36 a	2.46 ab
Mostaza +ZnO	0	11.79 a	11.79 a	11.79 a	11.79 a
	1500	5.76 b	5.30 b	6.37 b	7.04 b
	2500	1.86 bc	0.907 bc	0.67 c	5.70 b
	3000	0 c	0 c	0 c	0 c

Los tratamientos con la misma letra son iguales y tratamientos con diferente letra son estadísticamente diferentes Tukey ($p \leq 0.05$).

Conclusiones

De acuerdo a los resultados obtenidos en esta investigación, el extracto de mostaza y los tratamientos adicionados con óxido de SiO₂ y ZnO, fueron los que mostraron valores estadísticamente significativos y se puede concluir que son más efectivos para inhibir el crecimiento de *F. oxysporum*. Sin embargo, los tratamientos adicionados con el óxido de zinc, no mostraron efectos significativos para el extracto de gobernadora, pero si para el crecimiento del hongo. Por lo tanto, el extracto de mostaza con SiO₂ y ZnO al 5 %, puede resultar efectivos en su aplicación para el manejo *in vitro* de este fitopatógeno.

Literatura citada

- Abbai, R.; Kim, Y.J.; Mohanan, P.; Farh, M.E.A.; Mathiyalagan, R.; Yang, D.U. y Yang, D.C. 2019. El silicio confiere un efecto protector contra la pudrición de la raíz del ginseng al regular la salida de azúcar al apoplasto. Informes científicos. 9 (1):1-10.
- Abdel-Monaim, M. F.; Abo-Elyousr K. A. M. y Morsy, K. M. 2011. Effectiveness of plant extracts on suppression of damping-off and wilt diseases of lupine (*Lupinus termis* Forsik). Crop protection. 30(2): 185-191.
- Ahmad, H.; Venugopal, K.; Rajagopal, K.; De Britto, S.; Nandini, B.; Pushpalatha, H.G. y Jogaiah, S. 2020. Síntesis y caracterización verde de nanopartículas de óxido de zinc utilizando glóbulos de eucalipto y su capacidad fungicida frente a hongos patógenos de manzanos. Biomoléculas.10 (3): 425.
- Carroll, K.C.; Hobden, J.A.; Miller, S.; Morse, S.A.; Mietzner, T.A.; Detrick, B.; Mitchell T.G.; McKerrow, J.H. y Sakanari, J.A. 2016. Crecimiento, supervivencia

y muerte de microorganismos. (Eds.). Microbiología médica. 27e. McGrawHill.
<https://accessmedicina.mhmedical.com/content.aspx?bookid=1837§ionid=128955900>

Drakopoulos, D.; Meca, G.; Torrijos, R.; Marty, A.; Kägi, A.; Jenny, E. y Vogelgsang, S. 2020. Control de *Fusarium graminearum* en trigo con botánicos a base de mostaza: De in vitro a in planta. *Fronteras en microbiología*. 11: 1595.

Escobar, H.; Pinzón, H. y Parra, M. 2012. Producción de semilla garantizada de ajo. Universidad Jorge Tadeo Lozano.

Fortunato, A. A.; Rodrigues, F. Á. and Nascimento, K. J. T. (2012). Physiological and biochemical aspects of the resistance of banana plants to *Fusarium* wilt potentiated by silicon. *Phytopathology*. 102(10): 957-966.

Guerrero, J.J.G.; Songkumarn, P.; Dalisay, T.U.; Pangga, I.B. y Organo, N.D. 2020. Toxicidad de nanopartículas de CuO y ZnO y sus contrapartes a granel en hongos seleccionados del suelo. *Agricultura y recursos naturales*. 54 (3): 325-332.

Gómez-Garzón, M. 2018. Nanomateriales, nanopartículas y síntesis verde. *Revista Repertorio de Medicina y Cirugía*. 27(2).

Gordon, T.R. 2017. *Fusarium oxysporum* y síndrome de marchitez por *Fusarium*. *Revisión anual de fitopatología*. 55: 23-39.

Gurunathan, T.; Mohanty, S. y Nayak, S.K. 2015. Una revisión de los desarrollos recientes en biocomposites basados en fibras naturales y sus perspectivas de aplicación. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 77: 1-25.

Kah, M. 2015. Nanopesticides and nanofertilizers: emerging contaminants or opportunities for risk mitigation. *Frontiers in Chemistry*.3:1-6.

Ochoa-Fuentes, Y. M.; Cerna-Chávez, E.; Gallegos-Morales, G.; Landeros-Flores, J.; Delgado-Ortiz, J. C.; Hernández Camacho, S. y Olalde-Portugal, V. 2012. Identificación de especies de *Fusarium* en semilla de ajo en Aguascalientes, México. *Revista mexicana de micología*. 36: 27-32.

Salazar, E.; Hernández, R.; Tapia, A. y Gómez-Alpizar, L. 2012. Identificación molecular del hongo *Colletotrichum* spp., aislado de banano (*Musa* spp) de altura en la zona de Turrialba y determinación de su sensibilidad a fungicidas poscosecha. *Agron. Costarricense*. 36(1):53-68. doi:10.15517/rac.v36i1.9964

SEDER.2021. Se ubica México como el noveno exportador mundial de ajos. Prensa. Comunicado. <https://www.gob.mx/agricultura/prensa/se-ubica-mexico-como-el-noveno-exportador-mundial-de-ajos?idiom=es>.

SIAP.2021. Avance de siembras y cosechas. Resumen nacional por cultivo. https://nube.siap.gob.mx/avance_agricola/

Sun, C.; Shu, K.; Wang, W.; Ye, Z.; Liu, T.; Gao, Y.; Zheng, H.; He, G. and Yin, Y. 2014. Encapsulation and controlled release of hydrophilic pesticide in shell cross-linked nanocapsules containing aqueous core. *International Journal of Pharmaceutics*. 463(1): 108-114

Patil, C.; Borase, H.; Patil, S.; Salunkhe, R. and Salunke, B. 2012. Larvicidal activity of silver nanoparticles synthesized using *Pergularia daemia* plant latex against *Aedes aegypti* and *Anopheles stephensi* and nontarget fish *Poecilia reticulata*. *Parasitology Research*. 111(2): 555-562.

Pariona, N.; Paraguay-Delgado, F.; Basurto-Cereceda, S.; Morales-Mendoza, J.E.; Hermida-Montero, L.A, y Mtz-Enriquez, A.I. 2020. Actividad antifúngica

dependiente de la forma de partículas de ZnO contra hongos fitopatógenos. *Nanociencia aplicada*. 10 (2): 435-443.

Pupo-Feria, C.; González-Ramírez, G.; Carmenate-Figueredo, O.; Peña-Molina, L.; Pérez-Lemes, V. y Rodríguez-Obrador, E. 2016. Respuesta del cultivo del ajo (*Allium sativum* L.) a la aplicación de dos bioproductos en las condiciones edafoclimáticas del centro este de la provincia Las Tunas, Cuba. *Cultivos Tropicales*. 37(4):57-66.

Rajiv, P.; Rajeshwari, S. y Venckatesh, R. 2013. Bio-fabricación de nanopartículas de óxido de zinc utilizando extracto de hoja de *Parthenium hysterophorus* L. y su actividad antifúngica dependiente del tamaño contra patógenos fúngicos de plantas. *Spectrochimica Acta Part A: Espectroscopía molecular y biomolecular*. 112: 384-387.

Tamilselvi, N. y Arumugam, T. 2017. Breeding Approaches for Sustainable Vegetable Production—A Review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. 6:2845-2860. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.611.336>

Villa-Martínez, A.; Pérez-Leal, R.; Morales-Morales, H. A.; Basurto-Sotelo, M.; Soto-Parra, J. M.; y Martínez-Escudero, E. 2015. Situación actual en el control de *Fusarium* spp. y evaluación de la actividad antifúngica de extractos vegetales. *Acta Agronómica*. 64(2):194-205.

Yehia, R. S. and Ahmed, O. F. 2013. In vitro study of the antifungal efficacy of zinc oxide nanoparticles against *Fusarium oxysporum* and *Penicillium expansum*. *African Journal of Microbiology Research*. 7(19): 1917-1923.

**Actividad antifúngica *in vitro* de nanoformulados para el control de
*Fusarium solani***

Irasema del Rosario Malacara Herrera¹, Yisa María Ochoa Fuentes¹, Ernesto Cerna Chávez^{1*}, Antonio Orozco Plancarte¹, Jerónimo Landeros Flores¹ y Luis Alberto Aguirre Uribe¹

¹Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Departamento de Parasitología. Laboratorio de Toxicología. Calzada Antonio Narro # 1923. Buenavista, Saltillo, Coahuila de Zaragoza, México. C.P. 25315. Tel: (844) 4-11-02-09

* Autor de correspondencia: jabaly1@yahoo.com

Resumen. El objetivo de la investigación fue evaluar la actividad antifúngica *in vitro* de dos extractos, gobernadora (*Larrea tridentata* L.) y mostaza (*Sinapis alba* L.) adicionados con nanopartículas de óxido de silicio y óxido de zinc, sobre el crecimiento micelial y la esporulación de *Fusarium solani*, uno de los fitopatógenos causante de la marchitez vascular y pudrición de raíces en más de 100 cultivos de importancia económica. Utilizando el método medios envenenados se determinaron las concentraciones inhibitorias y el número de conidios. Los datos fueron analizados mediante un análisis probit, ANOVA y prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Los resultados demostraron que los tratamientos de mostaza con SO₂ y ZnO tienen mejor efecto inhibitorio, y gobernadora con los tratamientos de SO₂ presento resultados significativos sobre la esporulación. Las nanopartículas de SO₂ son más efectivas para aplicarlas *in vitro* en *F. solani*.

Palabras claves: nanopartículas, crecimiento micelial y esporulación

Summary. The objective of this research was to evaluate the in vitro antifungal activity of two extracts, gobernadora (*Larrea tridentata* L.) and mustard (*Sinapis alba* L.) added with silicon oxide and zinc oxide nanoparticles, on mycelial growth and sporulation of *Fusarium solani*, one of the phytopathogens causing vascular wilt and root rot in more than 100 economically important crops. Inhibitory concentrations and the number of conidia were determined using the poisoned media method. Data were analyzed by probit analysis, ANOVA and Tukey's test ($p \leq 0.05$). The results showed that mustard treatments with SO₂ and ZnO have better inhibitory effect, and governor with SO₂ treatments presented significant results on sporulation. SO₂ nanoparticles are more effective for in vitro application on *F. solani*.

Key words: nanoparticles, mycelial growth and sporulation.

En México la producción hortofrutícola es una fuente importante de recursos económicos, ya que además de ser una actividad agrícola rentable, requiere de mano de obra para la trazabilidad del producto principal y es de los productos que más se exportan, por su importante valor nutrimental, ya que contiene vitaminas, fibras, minerales y antioxidantes que complementan una dieta diaria de las personas (Cedillo-Portugal y Anaya-Rosales, 2017). Por lo tanto para su exportación, se deben cumplir con los requisitos fitosanitarios que establecen cada uno de los países con los que México tiene convenio comercial, esto significa que tienen que estar libres de enfermedades, las cuales son ocasionadas por distintos organismos, sin embargo las enfermedades más importantes y que causan más pérdidas económicas, principalmente es por

hongos, que afecta la calidad del producto y por consiguiente el rechazo de la entrada al país exportador (SENASICA, 2020). La lista de las enfermedades de las plantas presentada por la Sociedad Americana de Fitopatología reporta que más de 81 de las 101 plantas de importancia económica tienen al menos una enfermedad causada por hongos del género *Fusarium* (Leslie y Summerell, 2006). Dentro del género *Fusarium* se encuentra la especie *F. solani*, uno de los fitopatógenos que causan marchitez vascular y pudrición de raíces en más de 100 cultivos (Šišić, 2018). Para su control, se recurre principalmente a la aplicación intensiva de fungicidas, originando riesgos a la salud y daños al medio ambiente, además, por lo tanto resulta poco favorable e inadecuado para controlar y erradicar la enfermedad, por lo cual es importante tomar en cuenta alternativas para su control (El-Mohamedy *et al.*, 2014). Algunas de las alternativas que se han estado investigando y evaluando, son los compuestos que se obtienen de plantas, como extractos vegetales y como aceites esenciales, investigaciones han demostrado que son seguros para el medio ambiente y los consumidores, y eficaces para el control de enfermedades causadas por *Fusarium*, además se han realizado pruebas con formulaciones botánicas comerciales, las cuales se mezclan con extractos vegetales y microorganismos de control biológico para analizar las interacciones y su función en determinados cultivos (Villa-Martínez *et al.*, 2014). Por otro lado, existe una tecnología que está teniendo un impacto destacable en diferentes sectores, en la agricultura tiene aplicaciones diversas, principalmente en la elaboración de nanopesticidas encapsulados, la producción de macro y micronutrientes a nivel nano y hacer más eficientes y sustentables a los pesticidas (Lira *et al.*, 2018). Por lo anterior,

el objetivo del presente trabajo fue probar diferentes extractos, adicionados con nanopartículas de óxido de silicio (SiO₂) y óxido de zinc (ZnO), para potenciar y mejorar la acción de los extractos, sobre el crecimiento micelial y producción de esporas de *Fusarium solani*.

El hongo *Fusarium solani* se reactivó en medio de agar papa dextrosa (PDA) después de ser identificada, al coincidir sus características morfológicas según Lesley y Summer (2006), la cepa se obtuvo del Laboratorio de Toxicología del Departamento de Parasitología en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Los extractos y las nanopartículas a evaluar fueron adquiridos por la empresa Culta S.A de C.V, gobernadora (*Larrea tridentata*) y mostaza (*Sinapis alba* L.) y las nanopartículas de SiO₂ y ZnO. Se obtuvieron 14 tratamientos donde se incluyen los extractos puros y los mezclados con las nanopartículas de SiO₂ y ZnO al 1, 3 y 5%, por cada 100 ml del extracto, para realizar las diferentes concentraciones (10, 100, 500, 1 000, 3 000 y 5 000 ppm) se consideró el extracto al 100%. Para realizar los bioensayos se siguió la metodología de medio envenenado con PDA, en cajas Petri, dejando 24 h para su solidificación, en cada caja Petri se colocó un explante del hongo fitopatógeno *Fusarium solani*, se incubaron a 26°C y se tomó la medida del crecimiento del micelio a las 24 h con un vernier, hasta que el testigo alcanzara las medidas de la caja Petri. Se tomó en cuenta el crecimiento micelial para obtener el porcentaje de inhibición mediante la fórmula: % inhibición = $\frac{\text{crecimiento micelial del testigo} - \text{crecimiento micelial del tratamiento}}{\text{crecimiento micelial del testigo}} \times 100$ (Enzziyyani *et al.* 2004). Por otra parte el conteo de esporas se realizó empleando una cámara de Neubauer según la metodología de cuantificación de suspensión de esporas de

hongos (Bustillo, 2010). Para obtener la dosis inhibitoria media (DI_{50}) se realizó un análisis Probit con los resultados de porcentaje de inhibición, mientras que para la evaluación de la producción de esporas se hizo un análisis de varianza completamente al azar y una comparación de medias con el método Tukey ($p \leq 0.05$), mediante el programa estadístico SAS Sistema versión 9.0. Los valores de los tratamientos de gobernadora y mostaza con las nanopartículas de SO_2 y ZnO se muestran en la tabla 1, donde se observa que el tratamiento de gobernadora con SO_2 al 5% obtuvo la DI_{50} más baja con 3140 ppm, seguido de gobernadora SO_2 al 1% con 3204 ppm, presentando la DI_{50} más alta, gobernadora SO_2 al 3% y gobernadora sin las nanopartículas muestran los resultados más altos con 3351 y 3238 ppm respectivamente, posteriormente los tratamientos de gobernadora con ZnO fueron los que presentaron valores más altos que con SO_2 , conforme el porcentaje de ZnO es más alto, los valores son más bajos, siendo gobernadora ZnO al 1% una DI_{50} de 4739 ppm el resultado más alto de todos los tratamientos de gobernadora, Tequeda-Meneses (2002) al evaluar la actividad antifúngica de diferentes extractos entre ellos gobernadora, los resultados mostraron que inhibió dos especies de *Fusarium* de un 41.5% hasta el 100%, mientras que otra investigación con óxido de silicio demuestra que la gravedad de la enfermedad por *Fusarium oxysporum* f.sp. *radicislycopersici* disminuyó considerablemente al trasplantar plantas de tomate en solución nutritiva adicionadas con silicio (Hung, 2011). Sin embargo los tratamientos de mostaza resultaron con los valores más bajos, donde mostaza sin las nanopartículas resultó con la DI_{50} más baja de 920.47 ppm, Drakopoulos *et al.*, 2010 demostró que mostaza puede ser un bioplaguicida que ayuda a controlar

enfermedades causadas por un hongo *Fusarium*, por otra parte mostaza con ZnO al 3% fue la DI_{50} más alta de 1329 ppm, mostaza ZnO al 1% y al 5% obtuvieron las DI_{50} más bajas con 1231 y 1244 ppm respectivamente, en cambio mostaza con SO_2 al 1, 3 y 5% mostraron valores similares y más altos, esto coincide con lo reportado por Siddiqui *et al.*, 2019 en un trabajo sobre el efecto inhibitorio de nanopartículas de Zinc sobre *F. solani* al ser la mejor solución al de otros tratamientos, siendo este el óptimo en la actividad antifúngica. En cuanto a la actividad esporulante los tratamientos de mostaza sin nanopartículas y gobernadora con SO_2 al 5 % presentaron el menor número de conidios (Tabla 2), sin embargo no hubo diferencias entre los tratamientos, siendo el testigo el que presentó un valor mayor con 7.8 millones de conidios/ml, mientras que en todos los tratamientos de mostaza a la concentración de 5000 ppm se observa que inhibe 100% la producción de esporas, sin embargo solo el 27% presenta diferencia entre sus concentraciones probadas, estos resultados coinciden con los reportados por Singh *et al.* en 2017 al probar 12 productos botánicos contra *Fusarium oxysporum*, donde la mostaza inhibió el 93.75% del hongo. Por otra parte gobernadora más 1 y 3% de SO_2 después de la mostaza y gobernadora al 5% muestran los valores bajos y muy similares entre sí, y no muestran diferencias significativas entre sus concentraciones, en donde gobernadora con SO_2 al 3 y 5% presentaron los resultados de conidios más bajos de 0.35 y 0.64 millones/ml, los extractos de gobernadora se han utilizado como estrategia ecológica y se ha demostrado que son una alternativa para un manejo integrado para *Fusarium* (Peñuelas-Rubio), y estos al estar enriquecidos con nano partículas de SO_2 prueban mejor su efectividad para *Fusarium solani*. Los tratamientos con ZnO

mostraron los valores más altos, donde en gobernadora el 70% de los resultados son más altos que el testigo, y no muestran diferencias entre ellos, donde la menor producción de esporas la presentó gobernadora con Zn al 3% a una concentración de 1000 ppm con 15.41 millones de conidios/ml, en tanto a los de mostaza con ZnO si muestran diferencias entre ellos y el mayor número de esporas se observa a la concentración de 1000 ppm después del testigo con 15.38 millones de conidios/ml. Labiadh *et al.*, 2016 reporta que las nanopartículas de ZnO tienen un efecto mayor y mejor en la actividad antibacteriana que antifúngica.

Conclusiones

El extracto de mostaza y sus tratamientos adicionados con SO₂ y ZnO son efectivos para inhibir el crecimiento de *F. solani*, y los tratamientos de gobernadora con SO₂ tienen un efecto mejor como antiesporulante.

Tabla1. Dosis Inhibitoria media (DI₅₀) sobre el crecimiento micelial de *Fusarium solani* por los extractos de gobernadora (*Larrea tridentata*) y mostaza (*Sinapis alba*), a diferentes porcentajes de nanopartículas de óxido de silicio y zinc

Tratamiento	Limite Fiducial			DI90 (ppm)	P-valor	Ecuación de predicción
	DI50 (ppm)	Inferior	Superior			
Gobernadora	3238	2106	4551	21024	<.0001	$y=(-5.536873217 \pm 1.5773482429)$
Gobernadora/Silicio 1%	3204	2661	3773	12065	<.0001	$y=(-7.801241684 \pm 2.225340777)$
Gobernadora/Silicio 3%	3351	2811	3921	11840	<.0001	$y=(-8.241009222 \pm 2.3377709636)$
Gobernadora/Silicio 5%	3140	2612	3692	11897	<.0001	$y=(-7.7458 \pm 2.215055154)$
Gobernadora/Zinc 1%	4739	4168	5292	9668	<.0001	$y=(-15.2126571 \pm 4.1387039234)$
Gobernadora/Zinc 3%	4061	3391	4640	9664	<.0001	$y=(-12.28192208 \pm 3.4035029437)$
Gobernadora/Zinc 5%	3988	3139	4684	10228	<.0001	$y=(-11.2798788 \pm 3.1326844079)$
Mostaza	920.57	827.41	1010	2573	<.0001	$y=(-8.51048383 \pm 2.8712269152)$
Mostaza/Silicio 1%	1281	1127	1414	2429	<.0001	$y=(-14.31996916 \pm 4.60831284193)$
Mostaza/Silicio 3%	1308	1241	1373	2278	<.0001	$y=(-16.58320233 \pm 5.3206547718)$
Mostaza/Silicio 5%	1298	1240	1353	2188	<.0001	$y=(-17.60324779 \pm 5.6541638072)$
Mostaza/Zinc 1%	1231	1064	1368	2611	<.0001	$y=(-12.11889233 \pm 3.9218341752)$
Mostaza/Zinc 3%	1329	1204	1442	2501	<.0001	$y=(-14.57031787 \pm 4.6649226381)$
Mostaza/Zinc 5%	1244	1168	1314	2191	<.0001	$y=(-16.14253382 \pm 5.215779407)$

Tabla 2. Efecto de las nanopartículas de Oxido Silicio y Zinc en la esporulación de *Fusarium solani*.

Extractos	Concentración	Test.	Tratamientos					
			1% SO ₂	3% SO ₂	5% SO ₂	1% Zn	3% Zn	5% Zn
Gobernadora	0	7.78 b	7.78 a	7.78 a	7.78 a	19.78 b	19.78 b	19.78 a
	1000	15.84 a	1.38 b	1.89 b	0.747 b	25.54 ab	15.41 b	26.93 a
	3000	18.29 a	1.17 b	1.22 b	0.48 b	35.25 a	17.38 b	27.04 a
	5000	13.38 ab	1.12 b	0.35 b	0.64 b	17.28 b	45.40 a	27.20 a
Mostaza	0	7.78 a	7.78 a	7.78 a	7.78 a	19.78 a	19.78 a	19.78 a
	1000	0.85 b	5.81 ab	2.45 b	3.68 b	15.38 ab	8.64 b	8.90 b
	3000	0.37 b	4.58 b	1.49 b	0.48 c	5.22 bc	5.44 bc	2.18 bc
	5000	0 b	0 c	0 b	0 c	0 c	0 c	0 c

Los tratamientos con la misma letra son iguales y tratamientos con diferente letra son estadísticamente diferentes Tukey ($p \leq 0.05$).

Literatura citada

Bustillo, A. 2010. Método para cuantificar suspensiones de esporas de hongos y otros organismos. Universidad Nacional de Colombia, Palmira, Colombia.

Doi: 10.13140/RG.2.1.3594.5128

Cedillo-Portugal, E. 2018. Implicaciones socioeconómicas por la implementación de programas de sanidad, calidad e inocuidad alimentaria en el sector productivo de frutas y hortalizas en México. *Agro Productividad*. 11(2).

Drakopoulos, D.; Meca, G.; Torrijos, R.; Marty, A.; Kägi, A.; Jenny, E. y Vogelgsang, S .2020. Control de *Fusarium graminearum* en trigo con botánicos a base de mostaza: De in vitro a in planta. *Fronteras en microbiología*. 11: 1595.

- El-Mohamedy, R.S.; Abdel-Kareem, F. y Daami-Remadi, M. 2014. Quitosano y *Trichoderma harzianum* como alternativas fungicidas para el control de la pudrición de la corona y la raíz por *Fusarium* del tomate. *Gestión*.3 (4): 5-6.
- Ezziyyani, M. Sánchez, C.P.; Requena, M.E.; Rubio, L y Castillo, M.E.C.2004 Biocontrol por *Streptomyces rochei*-Ziyani-, de la podredumbre del pimiento (*Capsicum annum* L.) causada por *Phytophthora capsici*. In *Anales de Biología*. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Murcia. No. 26: 61-68
- Huang, C.H.; Roberts, P.D y Datnoff, L.E. 2011. El silicio suprime la pudrición de la corona y la raíz por *Fusarium* del tomate. *Revista de fitopatología*. 159 (7-8): 546-554.
- Labiadh, H.; Lahbib, K.; Hidouri, S.; Touil, S. and Chaabane, T. B. 2016. Insight of ZnS nanoparticles contribution in different biological uses. *Asian Pacific journal of tropical medicine*. 9(8): 757-762.
- Leslie, J.F y Summerell, B.A. 2006. Talleres de laboratorio de *Fusarium*: una historia reciente. *Investigación sobre micotoxinas*. 22 (2): 73-74.
- Lira Saldivar, R. H.; Méndez Argüello, B.; Santos Villarreal, G. D. L. y Vera Reyes, I. 2018. Potencial de la nanotecnología en la agricultura. *Acta universitaria*. 28(2): 9-24.
- Peñuelas-Rubio, O.; Arellano-Gil, M.; Verdugo-Fuentes, A. A.; Chaparro-Encinas, L. A.; Hernández-Rodríguez, S. E.; Martínez-Carrillo, J. L. y Vargas-Arispuro, I. C. 2017. Extractos de *Larrea tridentata* como una estrategia ecológica contra *Fusarium oxysporum radices-lycopersici* en plantas de tomate bajo condiciones de invernadero. *Revista mexicana de*

fitopatología. 35-3: 360-376.

DOI: <https://dx.doi.org/10.18781/r.mex.fit.1703-3>

SENASICA.2020. Exportación de productos agrícolas. Las actividades se fundamentan en la Ley federal de sanidad vegetal. <https://www.gob.mx/senasica/acciones-y-programas/exportacion-de-productos-agricolas-149565>.

Siddiqui, Z. A.; Parveen, A.; Ahmad, L. and Hashem, A. 2019. Effects of graphene oxide and zinc oxide nanoparticles on growth, chlorophyll, carotenoids, proline contents and diseases of carrot. *Scientia Horticulturae*. 249: 374-382.

Singh, J.K.; Kumar, M.; Kumar, S.; Kumar, A. y Mehta, N. 2017. Efecto inhibitor de los botánicos sobre el crecimiento y la esporulación de *Fusarium oxysporum* que incita a la marchitez del chile (*Capsicum annum* L.). *Revista de farmacognosia y fitoquímica*. 6 (5): 2199-2204.

Šišić, A.; Baćanović-Šišić, J.; Al-Hatmi, AMS., *et al.* 2018. El número 'forma specialis' en *Fusarium*: un estudio de caso en *Fusarium solani* f. sp. psisi. *Informes científicos*. 8(1):1-17. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-19779-z>

Tequida-Meneses, M.; Cortez-Rocha, M.; Rosas-Burgos, E. C.; López-Sandoval, S. y Corrales-Maldonado, C. 2002. Efecto de extractos alcohólicos de plantas silvestres sobre la inhibición de crecimiento de *Aspergillus flavus*, *Aspergillus niger*, *Penicillium chrysogenum*, *Penicillium expansum*, *Fusarium moniliforme* y *Fusarium poae*. *Revista iberoamericana de micología*. 19(1): 84-88.

Villa-Martínez, A.; Pérez-Leal, R.; Morales-Morales, H. A.; Basurto-Sotelo, M.; Soto-Parra, J. M. y Martínez-Escudero, E. 2015. Situación actual en el control de *Fusarium* spp. y evaluación de la actividad antifúngica de extractos vegetales. *Acta Agronómica*. 64(2): 194-205.

Conclusiones Generales

Los efectos inhibitorios de los extractos de canela y cítricos no mostraron resultados significativos sobre el crecimiento micelial y antiesporulación en las tres especies de *Fusarium*, al igual que los diferentes tratamientos adicionados con las NPs de SiO₂ y ZnO.

En cambio los resultados obtenidos con los tratamientos de los extractos de mostaza y gobernadora, además de los enriquecidos con las NPs de SiO₂ y ZnO mostraron ser significativos sobre las tres especies de *Fusarium*, considerando que el extracto de mostaza con NPs de SiO₂ y ZnO resultaron efectivos para el control micelial y como antiesporulante *in vitro* sobre estas especies.