

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA  
DEPARTAMENTO DE PARASITOLOGÍA



Evaluación de Alternativas para el Control del Nematodo Agallador *Meloidogyne incognita* en Plantas de Tomate (*Solanum lycopersicum*)

Por:

**RICARDO JAHAZIEL LÓPEZ CORONADO**

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

**INGENIERO AGRÓNOMO PARASITÓLOGO**

Saltillo, Coahuila, México

Diciembre 2024

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA  
DEPARTAMENTO DE PARASITOLOGÍA

Evaluación de Alternativas para el Control de Nematodo Agallador *Meloidogyne incognita* en Plantas de Tomate (*Solanum lycopersicum*)

Por:

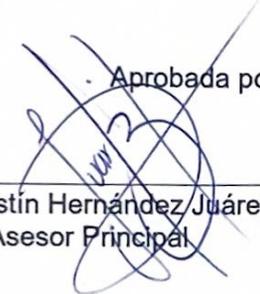
**RICARDO JHAZIEL LÓPEZ CORONADO**

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de

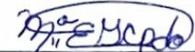
**INGENIERO AGRÓNOMO PARASITÓLOGO**

Aprobada por el Comité de Asesoría

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Agustín Hernández Juárez  
Asesor Principal

  
\_\_\_\_\_  
Dra. Fabiola Garrido Cruz  
Asesor Principal Externo

  
\_\_\_\_\_  
Dra. Miriam Desireé Dávila Medina  
Coasesor

  
\_\_\_\_\_  
Dra. Ma. Elizabeth Galindo Cepeda  
Coasesor

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Alberto Sandoval Rangel  
Coordinador de la División de Agronomía



Saltillo, Coahuila, México

Diciembre 2024

### Declaración de no plagio

El autor quien es el responsable directo, jura bajo protesta de decir verdad que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos:

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

Por lo anterior me responsabilizo de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaro que este trabajo es original.

Autor principal

Ricardo López C.

Ricardo Jahaziel López Coronado

## AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirme llegar a este momento de mi vida, gracias por las experiencias buenas y malas que me han ayudado a formar mi carácter y persona que soy.

Agradezco a la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro por mi formación académica y por ser mi segunda casa, además del departamento de parasitología y sus docentes que me brindaron ayuda cuando lo necesite.

A mis padres; Ricardo López Arredondo y Maribel Coronado Loera que me han brindado su cariño a lo largo de mi vida, que me han apoyado en mi carrera estudiantil y que se han esforzado al máximo para que no me falte nada. Son ellos mi ejemplo a seguir y a cada día esforzarme por ser mejor persona y poder darles quizá un poco de lo mucho que me han aportado.

Mis hermanas; Marisol López Coronado y Fernanda López Coronado que estuvieron siempre presentes en esta etapa de mi vida, que han aportado su grano de arena para que este sueño se haga realidad.

A mis tíos y primos, Sergio López, Violeta Castañeda, Abdiel López y Vasti López que me abrieron las puertas de su casa y siempre me vieron por igual, gracias por darme la confianza y hacerme parte de su familia. De igual manera a mis abuelitos Roberto López, Rosa Arredondo y Dora Coronado “Mami Dora”, por apoyarme y creer en mí.

Al Dr. Agustín Hernández Juárez por darme la oportunidad de trabajar con él y de apoyarme en este trabajo de investigación.

A la Dra. Desireé Dávila y la Dra. Elizabeth Galindo por apoyarme, por su tiempo y dedicación, además de darme su confianza para este proyecto.

A la Dra. Fabiola que me apoyo en este trabajo y también personalmente, porque más que una asesora de tesis se convirtió en mi amiga. Le agradezco su apoyo incondicional además de su paciencia y consideración.

A mis amigos, como lo son: “La perrada”; Pili Mesa, Angélica Miranda, Lalo Calderón, Elías Mendoza, Emanuel Ureña, Andrés Reyes, Jessy Huerta, Miguel Lara, Vanesa Sosa, Cecilia Sanchez, Aidyl Flores y Naydelin Escobar. A “Los Bichos”; Marisol Botello, Luis Jaime, Rubén García, Daniel Alfaro, Marlen Adán, Vanesa Gonzales, Kenia Maca, Monserrat García y Stefany Verazaluce. A todos ellos les agradezco por su apoyo y sincera amistad desde el primer día de clases en línea hasta nuestra última reunión, siempre los apreciare y los llevare en mi corazón.

## DEDICATORIA

“No importa cuán insuficiente parezca, lo imposible que pueda ser, Dios aún sigue siendo Dios y el cumple cada promesa que hizo”. Rev. William Branham. Es Dios el centro de todo y por eso le dedico este trabajo porque estuvo en cada momento e instante, me mantuvo con salud al igual que mi familia.

Dedico este trabajo principalmente a mis padres Ricardo López y Maribel Coronado que me enseñaron a ser un hombre dedicado y responsable, este título es tanto suyo como mío y además que todos los esfuerzos que hicieron, he hicimos juntos hoy tienen su resultado. Han sacrificado todo para darme siempre lo mejor y han creído en mi incluso cuando pensé que no lo lograría. Sé que son mucho más que padres, son personas extraordinarias, esposos y amigos leales. Aunque su mundo pareciera que gira alrededor de sus hijos, sé que también son personas con necesidades, pero a menudo ponen las nuestras por delante de las suyas, pero quiero que sepan que los aprecio y amo por todo lo que son.

A mis hermanas Marisol López y Fernanda López que, aunque quizás no lo diga lo suficiente, pero las quiero mucho. No puedo expresar la suerte que tuve de tenerlas como hermanas, no las cambiaría por nada, son unas personas especiales; sanas, hermosas, inteligentes, fantásticas y capaces de hacer grandes cosas por sí mismas y por las demás. Sé que siempre poder contar con ustedes y de igual manera siempre estaré cuando me necesiten.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>iv</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>vi</b>
<b>ÍNDICE DE CONTENIDO</b> .....	<b>vii</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>ix</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>x</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1 Justificación .....	3
1.2 Objetivo .....	3
1.3 Hipótesis.....	3
<b>2. REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	<b>4</b>
2.1 Tomate <i>Solanum lycopersicum</i> .....	4
2.2 Plagas y enfermedades del tomate.....	4
2.3 Nematodos fitopatógenos.....	6
2.4 Nematodo agallador <i>Meloidogyne</i> sp.....	7
2.4.1 Generalidades .....	7
2.4.2 Morfología .....	8
2.4.3 Ciclo de vida.....	9
2.4.4 Sintomatología .....	10
2.5.1 Control .....	11
2.5.6 Nanoparticulas.....	16
<b>3. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	<b>18</b>
3.1 Localización de Áreas de Estudio.....	18
3.2 Obtención de muestras.....	18
3.3 Extracción e identificación de nematodos.....	18
3.4 Preparación del inculo.....	20
3.5 Tratamientos utilizados .....	20
3.6 Evaluación de actividad nematocida de tratamientos <i>in vitro</i> .....	21
3.7 Preparación de planta.....	22
3.8 Trasplante.....	23
3.9 Diseño.....	23
3.10 Inoculación de nematodos en plantas.....	24
3.11 Aplicación de tratamientos .....	24

3.12	Número de agallas en plantas de tomate.....	25
3.13	Conteo de nematodos en el suelo.....	25
3.14	Las determinaciones de variables agronómicas se realizaron de la siguiente manera. ....	25
	Altura de planta (cm):.....	25
	Diámetro de tallo (cm):.....	26
	Longitud de raíz (cm):.....	26
	Peso fresco de raíz (g):.....	26
3.15	Análisis estadístico. ....	26
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>27</b>
4.1	Identificación de nematodos. ....	27
4.2	Evaluación de actividad nematicida de tratamientos <i>in vitro</i> .....	27
	.....	28
4.3	Evaluación del agallamiento en plantas de tomate bajo condiciones de invernadero.....	28
4.4	Conteo de nematodos en el suelo.....	30
4.5	Evaluación de variables agronómicas de plantas de tomate. ....	31
	4.5.1 Altura de planta.....	31
	4.5.2 Número de racimos. ....	32
	.....	33
	4.5.3 Longitud de raíz.....	33
	.....	34
	.....	34
	4.5.4 Peso fresco de raíz.....	34
	4.5.5 Diámetro de tallo. ....	35
<b>5.</b>	<b>CONCLUSIÓN .....</b>	<b>36</b>
<b>6.</b>	<b>LITERATURA CITADA .....</b>	<b>37</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proceso de extracción y tamizado .....	19
Figura 2. Cámara cuadrículada y contador para preparar el inóculo.....	20
Figura 3. Evaluación in vitro en el laboratorio de Nematología. ....	22
Figura 4. Preparación de la charola para la siembra de la semilla de tomate. ...	22
Figura 5. Germinación de la semilla.....	23
Figura 6. Trasplante de plántula.....	23
Figura 7. Inoculación de nematodos en la planta.....	24
Figura 8. Aplicación de nematodos en la planta.....	25
Figura 9. Corte perianal de <i>Meloidogyne incognita</i> . ....	27
Figura 10. Resultados de actividad nematocida in vitro .....	28
Figura 11. Índice de agallamiento al final del experimento. ....	29
Figura 12. Agallas en los tratamientos comparado con el testigo .....	29
Figura 13. Población de nematodos filiformes en el suelo al final del experimento. ....	31
Figura 14. Altura de las plantas al final del experimento.....	32
Figura 15. Número de racimos por tratamiento al final del experimento. ....	33
Figura 16. Longitud de la raíz.....	34
Figura 17. Peso fresco de la raíz medida con una cinta métrica.....	35
Figura 18. Diámetro del tallo en cm. ....	35

## RESUMEN

El tomate *Solanum tuberosum* L. (Solanaceae) es una de las hortalizas más comercializadas a nivel mundial. Este cultivo puede ser afectado por diversas plagas, entre las cuales destacan los nematodos fitopatógenos, específicamente *Meloidogyne incognita* (Kofoid & White) (Tylenchoidea: Meloidogynidae) es un género responsable de pérdidas económicas importantes. Su acción principal se manifiesta en las raíces, donde induce la formación de agallas que interfieren con la absorción de agua y nutrientes, debilitando la planta. El principal control se basa en el uso de nematicidas químicos, los cuales, en exceso pueden ocasionar un efecto negativo al medio ambiente y en la salud humana, además de inducir resistencia en los nematodos, por lo tanto, se estudian diversas alternativas con el fin de disminuir esta problemática. En la presente investigación se evaluaron diferentes tratamientos para el control de *M. incognita* como nanopartículas de cobre (NPsCu) y nanopartículas de óxido de cobre (NPsCuO), así como el actinomiceto *Streptomyces* sp. Wellington et al. (Kitasatosporales: Streptomycetaceae), la formulación botánico-microbial Nematrix® y el nematicida químico Oregon® 60 SC a base de abamectina contra *M. incognita* con el fin de observar control de los nematodos, así como también su efecto en las plantas. Se utilizó una muestra de suelo y raíces con la presencia de nematodos, se extrajeron hembras para la identificación, así como juveniles y huevecillos. Se evaluaron los tratamientos *in vitro* colocados en recipientes con 100 g de suelo contaminado con nematodos y se extrajeron después de 24 h por la metodología del embudo de Baermann. Se observó una disminución considerable de nematodos filiformes en los tratamientos de NPsCuO, *Streptomyces* sp., en el producto Nematrix y la abamectina, mientras que el tratamiento de NPsCu se comportó igual que el testigo absoluto con agua, con mayor número de filiformes.

Bajo condiciones de invernadero, en plantas de tomate de la variedad "Río Grande", se les inoculó juveniles y huevecillos de *M. incognita*, en este bioensayo se aplicaron los tratamientos en tres ocasiones durante cuatro meses de desarrollo del cultivo, y al finalizar, se evaluó el índice de agallamiento en las raíces, la presencia de juveniles en el suelo y diversas variables agronómicas. Los resultados mostraron diferencias significativas en el índice de agallamiento en comparación con el grupo testigo, que presentó el mayor número de agallas. Sin embargo, no se observaron diferencias estadísticas entre los tratamientos de control. De manera similar, se registraron diferencias en el número de juveniles presentes en el suelo. El tratamiento con NPsCuO mostró una mayor altura de planta con una media de 150.5 cm. Con respecto a los racimos, el tratamiento con mayor número lo presentó la abamectina, seguido de las NPsCuO. La longitud de raíz fue similar en todos los tratamientos. El mayor peso fresco de raíz se encontró en el tratamiento con abamectina, seguido por el testigo. En los resultados de diámetro del tallo no hubo diferencias estadísticas entre los tratamientos, con la mayor media en los tratamientos testigo y abamectina con 6.95 y 6.82 cm respectivamente. Este estudio evidenció la efectividad de alternativas para el control del nematodo agallador *M. incognita*, proponiendo opciones más sostenibles en comparación con los nematocidas químicos convencionales, al mismo tiempo que contribuye a la mejora de diversas variables agronómicas en las plantas.

**Palabras clave:** Nanopartículas de cobre, nanopartículas de óxido de cobre, nematocida botánico, nematodos fitopatógenos, *Streptomyces*

## 1. INTRODUCCIÓN

Los nematodos son los organismos multicelulares más abundantes. La mayoría de ellos son de vida libre, aunque también existen especies que son parásitos de plantas, las cuales tienen gran relevancia económica en la producción agrícola. Se ha reportado pérdidas superiores al 80% por nematodos fitopatógenos en zonas con alta infestación (Dong y Zhang 2006; Guerena 2006; Pakeerathan *et al.*, 2009; Raaijmakers *et al.*, 2009). El nematodo *Meloidogyne* sp. Goldi (Tylenchoidea: Meloidogynidae) es un endoparásito sedentario que forma nódulos en las raíces y tiene una amplia distribución geográfica. Se han descrito más de 90 especies, entre las que destacan *Meloidogyne arenaria* (Neal), *Meloidogyne javanica* (Treub), *Meloidogyne hapla* Chitwood y *Meloidogyne incognita* (Kofoid & White) (Tylenchoidea: Meloidogynidae) asociadas con pérdidas económicas significativas (De Jin *et al.*, 2005; Rodríguez *et al.*, 2007). En el cultivo de tomate *Solanum tuberosum* L. (Solanaceae), *Meloidogyne* sp. es uno de los patógenos más importantes, ya que limita la producción mundial, con pérdidas estimadas entre 28 y 68% (Pakeerathan *et al.*, 2009).

Los síntomas primarios por *Meloidogyne* se manifiestan en las hojas, que presentan amarillamiento, clorosis y marchitamiento, debido a la deficiencia de nutrientes, lo que puede llevar finalmente a la muerte de la planta. En raíces se forman agallas o nódulos visibles, que son causadas por las hembras de esta especie (Ortiz *et al.*, 2015). Este microorganismo se disemina fácilmente a través de materiales y herramientas de trabajo contaminados, así como por plantas infectadas, ya que no es visible a simple vista, lo que facilita su rápida propagación (Agrios, 2005). El método de control más utilizado es el uso de nematicidas químicos y principalmente los fumigantes para esterilizar el suelo, pero afecta a insectos benéficos y provoca daños al medio ambiente. Actualmente, debido al uso excesivo de estos químicos, se ha incitado en el desarrollo e investigación de diferentes alternativas menos dañinas. La principal técnica que se utiliza es el control biológico, ya que es un método efectivo para

controlar diversas plagas y respeta la fauna benéfica, al medio ambiente y a la salud de los consumidores (Huang *et al.*, 2018; Pacheco *et al.*, 2020).

Los actinomicetos son bacterias que se caracteriza por la formación de filamentos ramificadas semejantes a los hongos, que han sido utilizados en el control biológico. Estos son abundantes y cosmopolitas en el ambiente, lagos, ríos; son aeróbicos y se ubican en la superficie del suelo. Producen principalmente: antibióticos, antifúngicos, metabolitos, enzimas extracelulares (quitinasas, peroxidases y glucanasas), inhibidores enzimáticos, terpenoides anticancerígenos entre otros (Dávila *et al.*, 2013).

En la actualidad un enfoque interesante para el control de plagas y patógenos en la agricultura es el uso de nanopartículas, las cuales se obtienen por medio de la nanotecnología; esta se basa en la manipulación de la materia a escala casi atómica con el fin de la creación de nuevas estructuras, materiales y aparatos eficientes. Estas son partículas de dimensiones entre 1 a 100 nanómetros, las cuales poseen propiedades únicas que afectan sus reacciones físicas, químicas y biológicas, además de presentar cambios de conductividad eléctrica, actividad de superficie y reactividad (Stadler *et al.*, 2010).

En la actualidad en la agricultura se ha utilizado distintas aplicaciones, como el desarrollo de nanoformulaciones de agroquímicos para aplicar pesticidas y fertilizantes para el mejoramiento de los cultivos; el uso de nanosensores en la protección de cultivos para la identificación de enfermedades y residuos de agroquímicos; el empleo de nanodispositivos para la ingeniería genética de las plantas; los diagnósticos de enfermedades en plantas; y el manejo postcosecha. (Acevedo *et al.*, 2023). Las nanopartículas de oro, hierro, platino o de óxidos metálicos son en la actualidad las más usadas y caracterizadas las cuales se sintetizan a partir de iones de plata, debido a sus propiedades físicas (conductividad), químicas (estabilidad) y biológicas (actividad catalítica y antibacterial) (Gómez, 2018).

## **1.1 Justificación**

El uso excesivo de nematicidas químicos genera impactos ambientales y riesgos para la salud humana, además de inducir resistencia en nematodos fitopatógenos como *Meloidogyne incognita*. Esta investigación busca evaluar alternativas sostenibles, como microorganismos benéficos, nanopartículas y productos a base de extractos de plantas como métodos de control eficaces y ecológicamente responsables para la agricultura.

## **1.2 Objetivo**

Evaluar alternativas para el manejo del nematodo agallador *Meloidogyne incognita*, *in vitro* y en condiciones de invernadero, así como su efecto sobre variables agronómicas del cultivo del tomate.

## **1.3 Hipótesis**

Al menos uno de los tratamientos evaluados mostrara efecto nematicida sobre *Meloidogyne incognita*.

## 2. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1 Tomate *Solanum lycopersicum*

El tomate es la hortaliza más demandada y consumida a nivel mundial, gracias a su alto contenido de compuestos bioactivos como licopeno, betacaroteno, flavonoides, vitaminas y derivados del ácido hidroxicinámico, lo que lo convierte en uno de los alimentos preferidos por los consumidores (Rodríguez *et al.*, 2020). Este cultivo es de gran importancia a mundial debido a su volumen de producción, así como por su aceptación en fresco y procesado. La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación FAO (2023) muestra que en el año 2021 se produjeron 189.13 millones de t de tomate en el mundo. Siendo China el principal productor y consumidor de tomate, el cual en el 2021 cultivó 67.63 millones de t (35.76%), Estados Unidos el cuarto lugar con 10.47 millones de t (5.54%), mientras que México ocupó el séptimo lugar al producir 4.15 millones de t (2.19%) (Reyes *et al.*, 2020; Hernández y Alcalde, 2024).

Se estima que en las próximas décadas, será crucial satisfacer las demandas de alimentos sin propiciar la degradación ambiental, así que la sociedad enfrenta un desafío, no sólo para aumentar la producción agrícola en medio del cambio climático global, que amenaza con disminuir las cosechas en muchas áreas del mundo, sino también, para desarrollar tecnologías innovadoras que aumenten los rendimientos agrícolas, minimicen los insumos y eviten una mayor contaminación ambiental (Rivas *et al.*, 2021).

### 2.2 Plagas y enfermedades del tomate.

En el cultivo del tomate uno de los principales problemas que afectan su producción es la incidencia de plagas y enfermedades ya que pueden llegar a

disminuir hasta el 100% de la producción, además de que para su control se usa en exceso los agroquímicos (Garrido *et al.*, 2010).

Las plagas del tomate se han clasificado en 4 secciones. La primera sección son los que atacan el fruto que es causado por el gusano del fruto *Helicoverpa zea* Boddie (Lepidoptera: Noctuidae), en la segunda sección se encuentra los insectos chupadores; Mosquita blanca *Trialeurodes vaporariorum* (Westwood) y *Bemisia* spp. Quaintance & Baker (Hemiptera: Aleyrodidae), pulgones *Myzus persicae* (Sulzer) (Hemiptera: Aphididae), Trips *Frankliniella occidentalis* (Pergande) (Thysanoptera: Thripidae) y paratrioza *Bactericera cockerelli* Sulc. (Hemiptera: Liviidae). En la tercera sección se localizan las plagas que atacan al follaje; minador de la hoja *Liriomyza* spp. Mik. (Diptera: Agromyzidae) y la última sección son las plagas que atacan desde el suelo como la gallina ciega *Phyllophaga* spp. Harris (Coleoptera: Scarabaeidae) y los géneros de nematodos; *Meloidogyne* y *Globodera* Skarbilovich (Tylenchoidea: Heteroderidae) (INIFAP, 2010).

Dentro de los agentes bióticos y parásitos causantes de las enfermedades en el cultivo de tomate están bacterias, virus, fitoplasmas, nematodos, plantas parasitas y hongos. Entre los que destacan son *Botrytis cinerea* Pers. (Helotiales: Sclerotiniaceae), *Alternaria* Nees (Pleosporales: Pleosporaceae), *Laveillula taurica* (Lev.) Arnaud (Erysiphales: Erysiphaceae), *Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary (Peronosporales: Peronosporaceae), *Pythium aphanidermatum* (Edson) Fitzp. (Pythiales: Pythiaceae), *Fusarium oxysporum* Schldl. (Hypocreales: Nectriaceae), *Rhizoctonia solani* J.G. Kühn (Cantharellales: Ceratobasidiaceae); dichos patógenos atacan a nivel fruto y flor, y pueden llegar a causar pérdidas de más del 60% (Martínez *et al.*, 2016). Otro de los fitopatógenos importantes son las bacterias como *Pseudomonas syringae* van Hall (Pseudomonadales: Pseudomonadaceae) causante de la peca bacteriana, *Xanthomonas vesicatoria* Doidge (Lysobacterales: Lysobacteraceae) y *Clavibacter michiganensis* (Smith) Davis *et al.* (Micrococcales: Microbacteriaceae) causante del cancro bacteriano (Pérez *et al.*, 2020).

En el cultivo del tomate se han reportado diferentes nematodos fitopatógenos incluyendo los géneros: *Meloidogyne*, *Xiphinema* Cobb (Dorylaimida Longidoridae), *Criconemoides* Taylor (Tylenchomorpha: Criconematidae), *Trichodorus* Hooper (Diphtherophorina: Trichodoridae) y *Tylenchorhynchus* Cobb (Tylenchomorpha: Telotylenchidae) (Curay, 2022). Por otro lado, Osei *et al.* (2013) reportaron ocho especies que incluyeron *Helicotylenchus* spp. Steiner, *Hoplolaimus indicus* Sher (Tylenchomorpha: Hoplolaimidae), *Pratylenchus brachyurus* (Godfrey) (Tylenchomorpha: Pratylenchidae), *Rotylenchulus reniformis* Linford & Oliveira (Tylenchomorpha: Hoplolaimidae), *Scutellonema* spp. Andrassy (Tylenchomorpha: Hoplolaimidae), *Tylenchulus* spp. Cobb (Tylenchomorpha: Tylenchulidae), *Xiphinema elonguen* (Dorylaimida: Longidoridae) y *M. incognita*, siendo este último el de mayor distribución.

### **2.3 Nematodos fitopatógenos.**

Los nematodos fitopatógenos son organismos multicelulares, pseudocelomados, pertenecientes al Phylum Nematoda, poseen una simetría bilateral, son vermiformes en su mayoría, carecen de apéndices, su tamaño varía entre las 300 y 1000  $\mu\text{m}$ , cuentan con sistema digestivo, excretor, nervioso, muscular y reproductor, carecen de sistema circulatorio y respiratorio (Perry y Moens, 2011). Los fitonematodos presentan diversos lugares de alimentación en las plantas: Ectoparásitos que permanecen en el suelo y penetran el tejido alimentándose externamente, perforando las células que están al alcance del estilete, los nematodos ectoparásitos pueden ser sedentarios si se localizan en el mismo lugar o migratorios cuando extrae el contenido celular y luego retira el estilete para pasar a otra célula sin llegar a ser cercana a la superficie radicular y repite el proceso de alimentación. Semiendoparásitos, usualmente se alimentan introduciendo la parte anterior de la región cefálica y el cuerpo embebido en los tejidos de las raíces. Endoparásitos, son los que gran parte del cuerpo se encuentra embebido dentro del hospedante o entran en el tejido de la planta

completamente, pueden ser sedentarios o migratorios dentro del tejido de la planta (Shurtleff y Avert, 2000).

El ciclo de vida de estos nematodos fitopatógenos es muy similar entre ellos, y se completa de 2 a 4 semanas bajo las condiciones favorables de humedad y temperatura (Alcasio, 2014).

En el mundo, la pérdida anual ocasionada por nematodos en los cultivos ha llegado a alcanzar 14%, lo que equivale a 173 millones de dólares. Actualmente en México se cuenta con poca información de pérdidas causadas por nematodos fitopatógenos, sin embargo, en el valle agrícola de Tepeaca, Puebla, en condiciones protegidas se estimaron pérdidas del 100% en la producción (Tovar, 2014; Ramírez, 2014).

Los nematodos *M. incognita*, *M. hapla* y *Meloidogyne chitwoodi* (*Tylenchomorpha: Meloidogynidae*), causan grandes pérdidas cualitativas en diversos productos hortícolas, como zanahoria *Daucus carota* L. (*Apiaceae*), papa *Solanum tuberosum* L. (*Solanaceae*), y betabel *Beta vulgaris* L. (*Amaranthaceae*). *Meloidogyne* spp. deforman y manchan los tubérculos por lo que éstos pierden su valor comercial, además los nematodos formadores de agallas son económicamente los más importantes ya que para conseguir su control, se aplican en el mundo prácticamente la mitad de todos los nematicidas; les siguen en importancia los nematodos formadores de quistes (25%) y a cierta distancia otros grupos de nematodos fitoparásitos (23%) (Fe, 2002; Vicente, 2007).

## **2.4 Nematodo agallador *Meloidogyne* sp.**

### **2.4.1 Generalidades**

El género *Meloidogyne* está ampliamente distribuido en el mundo, ya que cuenta con más de 100 especies y un alto rango de hospederos. Las hembras poseen hábitos sedentarios y son formadoras de agallas en las raíces de plantas (Deseager, 2019; Philbrick *et al.*, 2020).

### 2.4.2 Morfología

Se conoce que *Meloidogyne* es sexualmente dimórfica; la hembra de este género es globosa, con 0.4 a 1.3 mm de largo y comúnmente se encuentra incrustada en los tejidos de la raíz que generalmente están hinchados o agrietados; su cuerpo es de una textura suave de color blanco perla y en forma redonda. El cuello sobresale anteriormente y el poro excretor está anterior al bulbo mediano y regularmente cerca de la base del estilete. Su vulva y ano son terminales o ligeramente elevados del contorno corporal, la cutícula de la región terminal forma un patrón perianal característico según su especie y que está formado por el atrofiado final de la cola, los fasmidios, las líneas laterales, la vulva y el ano rodeados de cuticular, además produce un promedio de 500 huevos. Las características del macho son diferentes, ya que presenta una forma larga, delgada y cilíndrica en forma de gusano, pero la región del labio tiene una cabeza distintiva, que incluye un disco labial rodeado por los labios laterales y medial. El esqueleto de la cabeza suele ser más débil y el estilete menos robusto y corto; de 18-24  $\mu\text{m}$  de largo (Marín, 2012).

Los juveniles infecciosos de la segunda etapa, a menudo libres en el suelo, suelen medir entre 0.3 y 0.5 mm de largo; son menos robustos, el estilete es delicado con pequeñas protuberancias basales, de menos de 20  $\mu\text{m}$  de largo y el esqueleto de la cabeza débil. El bulbo esofágico mediano está bien desarrollado y las glándulas esofágicas son extensas, superponiéndose al intestino en varios anchos corporales, principalmente ventralmente. La cola es cónica, a menudo termina en un extremo redondeado estrecho, pero la longitud de la cola es variable, 1,5-7 anchos del cuerpo anal entre especies, a menudo termina en una región hialina clara, cuya extensión puede ayudar a distinguir especies (Marín, 2012).

### 2.4.3 Ciclo de vida

Todas las especies de *Meloidogyne* cuentan con el mismo ciclo de vida sin embargo algunos autores indican que existen diferentes factores como el hospedero, luminosidad, altitud, pH, temperatura, tetera del suelo, etc., que hacen que el ciclo de vida varié de estos nematodos (Cepeda, 1996).

El ciclo comienza a partir del huevo, ya sea libres en el suelo o embebidos en una matriz gelatinosa, que puede estar adherida a los tejidos de la raíz de la planta hospedante o a la hembra, la que produce de 500 a 1000 huevos. El huevo se desarrolla pocas horas después de la ovoposición, dividiéndose en dos, cuatro, ocho o más células, hasta que se observa una larva completamente desarrollada con un estilete enrollado en la membrana del huevo; ésta puede moverse dentro del huevo, pero no es muy activa. Hasta esta etapa se tiene el primer estado larval y en él sucede la primera muda. Diez días después de la ovoposición, la larva emerge del huevo si las condiciones ambientales son favorables, para iniciar el segundo estadio larval. En esta etapa, la larva puede entrar a la raíz generalmente cerca de la punta (zona de actividad meristemática), moviéndose entre las células no diferenciadas de la raíz, e introduce su cabeza en el cilindro central en desarrollo. En hospedantes susceptibles estas larvas inducen la formación de células gigantes de las cuales continúan alimentándose, por medio de su estilete perforan las células en el cilindro vascular, aumentándose así la proporción de la división celular en el periciclo; esto da origen a células gigantes (sincitos) formadas por el agrandamiento de las células (hipertrofia). Al mismo tiempo hay una intensa multiplicación de las células vegetativas (hiperplasia) alrededor de la cabeza de la larva. Estos cambios son acompañados por el engrosamiento de la raíz o los tubérculos para formar agallas conspicuas. Cuando se completan la segunda y tercera muda en la hembra, desaparecen el estilete y el bulbo medio esofágico. Después de la cuarta muda, el estilete y el bulbo medio son regenerados, se forman el útero y la vagina, y el patrón perilineal se hace visible. En el macho, después de la segunda y tercera muda el estilete no es muy visible, el bulbo medio se ha degenerado y

sólo la gónada se ha alargado; posteriormente ocurre una metamorfosis: el cuerpo alargado se desarrolla dentro de una cutícula larval, se completa con el estilete, el esófago con el bulbo medio, y las espículas y el esperma en los testículos (Cepeda, 1996).

Un factor muy importante para el éxito de los nematodos es la flexibilidad de su reproducción. Varían enormemente de la reproducción sexual y asexualmente como *Heterodera* spp. Y *Meloidogyne incognita* que se reproducen por patogénesis. (Coke *et al.*, 2024)

En otras condiciones no favorables como las de sequía y temperaturas bajas se ha demostrado que la eclosión de huevecillos se detiene por tiempo indefinido; así se ha visto después de una sequía prolongada (Cepeda, 1996).

#### **2.4.4 Sintomatología**

El síntoma principal que se observa en las plantas perjudicadas son las agallas que hacen que se dificulte la absorción y translocación de agua y nutrientes en el sistema radicular lo que produce en la parte aérea como marchitamiento, achaparramiento y las plantas se pueden tornar de un color amarillamiento (Camues, 2019; Ozarlandan *et al.*, 2019; Pinheiro *et al.*, 2020).

El daño directo es causado cuando el nematodo se alimenta de la planta y así segrega saliva que se introduce en los tejidos de la planta. Los nematodos hacen esto para extraer parte del contenido citoplasmático (Agrios, 2005).

Durante el parasitismo, los nematodos del nudo de la raíz transportan secreciones del nematodo (efectores) a las células de la planta a través de sus estiletes, suprimiendo las defensas de la planta e induciendo y/o manteniendo los sitios de alimentación, es decir, las células gigantes (CG). Las células multinucleadas desarrolladas por las células gigantes mediante replicación intranuclear son la única fuente de nutrientes para el crecimiento y desarrollo de los nematodos del nudo de la raíz (Pu *et al.*, 2022).

### **2.5.1 Control**

El control de una plaga implica la aplicación de una o varias técnicas específicas en un plazo de tiempo limitado cuyo objetivo sea la eliminación de la población patógena o del perjuicio causado por la misma. Por el contrario, en el manejo, el objetivo no es la erradicación sino la manipulación del organismo patógeno hasta conseguir una reducción de la densidad de población por debajo del umbral de daño al cultivo, mediante el uso de diversos métodos de control durante un cierto periodo de tiempo (Fe, 2002).

### **2.5.2 Control químico**

El método más utilizado es el de productos químicos y mayormente cuando las técnicas agronómicas no reducen el problema de nematodos lo suficiente para seguir cultivando y teniendo una rentabilidad costeable de economía. Este método tiene un costo bastante elevado, pero aun así es el más frecuente en los diferentes cultivos de alta rentabilidad, lo que impulsa el desarrollo en la industria de pesticidas/nematicidas que se valora desde hace una década en los 500 millones de dólares. Los principales cultivos a los que se aplican nematicidas son hortícolas, especialmente tomate, papa, banana, tabaco y remolacha. Los países dominantes en cuanto al uso de nematicida son EUA y Japón seguidos de algunos países europeos. En cuanto a esto está demostrado que, en mayor o menor medida, la aplicación de todos los compuestos químicos con actividad nematicida tienen un riesgo potencial de contaminación medioambiental elevado y pueden llegar a ser muy tóxicos tanto para productores, consumidores y al medio ambiente (Fe, 2002).

Uno de los nematicidas más usados es la abamectina que pertenece al grupo de las avermectinas, y es una sustancia que se obtiene después de la fermentación de un actinomiceto. Es una sustancia natural y de síntesis química que por su acción como nematicida, acaricida e insecticida es muy utilizado en la agricultura. Esta sustancia con acción sistemática y de contacto ataca al sistema nervioso de

los nematodos provocando la inhibición de neurotransmisores y de receptores nicotínicos de las células musculares, causando parálisis y posteriormente la muerte del nematodo (Wagner, 2012; Abongwa *et al.*, 2017; Khan y Rahman, 2017).

El metam sodio de marca comercial Vapam es un nematicida que se usa regularmente, pero se ha restringido en algunas regiones debido a su toxicidad. El Fluensulfone de marca comercial Nimitz tiene un modo de acción como nematicida de contacto que interfiere con la actividad de los nematodos y al ser un nematicida de nueva generación tiene un bajo impacto ambiental y se usa contra nematodos agalladores de raíz en cultivos como pepino, tomate y pimiento.

### **2.5.3 Control cultural.**

Existen varios métodos culturales y actúan modificando las condiciones para que el ciclo de vida del nematodo sea interrumpido o afectado. A contrario del control químico este no los erradica, pero si tiene una reducción gradualmente, además de que los principales métodos son el barbecho, rotación de cultivos, temporada de siembra y cultivos resistentes (Cepeda, 1996; Madrigal *et al.*, 2023).

#### **a) Barbecho**

Esta práctica disminuye la población de nematodos parásitos en la mayoría de cultivos y consiste en dejar el suelo sin cultivar por un cierto periodo, se hace la recomendación de hacerla en los meses de verano y primavera. Esta práctica contrarresta el efecto dañino de los nematodos (Madrigal *et al.*, 2023).

#### **b) Rotación de cultivos**

Esta práctica consiste en incluir durante la rotación plantas no susceptibles al nematodo, o que son desfavorables como huéspedes; es muy efectiva y reduce notablemente las poblaciones. Cuando se trata de especies que tienen huéspedes específicos, se pueden seleccionar con facilidad plantas resistentes. Por lo general se utiliza maíz, sorgo y trigo (gramíneas), ya que está comprobado que disminuye la población de nematodos, por lo tanto, se recomienda hacerlo

con plantas no hospederas al patógeno, en el cultivo de tomate se recomienda un mínimo de 3 años de esta técnica en campos abiertos para observar una población baja (Cepeda, 1996; Philbrick *et al.*, 2020).

### **c) Biofumigación.**

Es el uso de material vegetal y compuestos producidos naturalmente por estos, cada vez ha sido más factible para controlar las plagas. El proceso actúa a través del crecimiento o la incorporación de material vegetal al suelo y este en el curso de su degradación, libera glucosinolatos que se descomponen en isotiocianatos nematotóxicos. Estos metabolitos secundarios de las plantas existen de forma natural en las plantas cultivadas comúnmente, la mayoría de las cuales pertenecen a la familia *Brassicaceae* (Barnes *et al.*, 2020)

### **2.5.4 Control genético**

Es una estrategia que se ha considerado como otra propuesta que puede ser ecológica, ya que reduce la dependencia de nematicidas químicos y sintéticos. Además, es compatible con otros métodos de control (Rodríguez *et al.*, 2020)

Aquí se hace la obtención de variedades resistentes y se lleva a cabo por hibridación de plantas susceptibles con las plantas resistentes, mediante cruzamientos de individuos, uno es variedad comercial que es necesario introducirle la resistencia del otro individuo. La primera generación que es donde obtiene híbridos, los cuales se van a cruzar con el progenitor recurrente para sólo fijar la característica deseada, que en este caso es resistencia (Cepeda, 1996).

Pu (2022) menciona que en la interacción de planta-patógeno ocurre el proceso donde las plantas producen rápidamente grandes cantidades de especies reactivas de oxígeno (ROS), la cual se considera como la primera señal de defensa y actualmente se han descubierto y descrito genes de resistencia como H1 que es resistente a los nematodos de quiste en la papa, Hslpro-1 contra *Heterodera* en remolacha azucarera, Mi-1 resistente a *M. incognita* en tomate.

### **2.5.5 Control biológico**

Este implica y consiste en el uso de organismos antagonistas vivos en cultivos para el control de nematodos. Los estudios han demostrado efectos significativos en el control de esta plaga y los productos utilizados suelen desarrollarse a partir de microorganismos (Bishop *et al.*, 2007)

En 1888 se descubrió por primera vez que un hongo (*Arthrobotrys oligospora*) era capaz de infectar nematodos. Los hongos nematófagos son, sin duda, fascinantes de observar al microscopio capturando nematodos. Por ello, parece adecuado estudiar las posibilidades de los hongos nematófagos como agentes de control biológico de nematodos fitopatógenos (López y Jansson, 2001).

Dentro de las alternativas biológicas para el combate de nematodos, destacan los hongos *Trichoderma* spp., y *Paecilomyces lilacinus* (Vargas *et al.*, 2015)

Pérez (2006) afirma que el hongo *Trichoderma* spp. Se considera como antagonista ya que es un biorregulador efectivo contra nematodos del género *Meloidogyne*, donde se pone de manifiesto la acción de sus toxinas e hifas. *Paecilomyces* sp parasita huevos, juveniles y hembras nematodo demostrado que tiene gran potencial para el control de estos microorganismos (Vargas *et al.*, 2015)

#### **2.5.5.1 Hongos atrapadores de nematodos o nematófagos**

Estos hongos capturan nematodos vermiformes en órganos especiales que se forman en las hifas. Los Deuteromycetes forman trampas adhesivas como las redes de *Arthrobotrys oligospora*, los pedúnculos de *Monacrosporium haptotylum* o las ramas de *Monacrosporium gephyropagum*. Los Zygomycetes nematófagos capturan nematodos directamente sobre sus hifas (*Stylopage hadra*). Las trampas mecánicas son anillos constreñibles como los de *Arthrobotrys dactyloides*, o no constreñibles (*M. haptotylum*). Los Hongos atrapadores de nematodos (excepto los Zygomycetes) son parásitos facultativos. *A. oligospora*,

es además capaz de atacar las hifas de otros hongos para obtener nutrientes (micoparasitismo) (López y Jansson, 2001).

#### **2.5.5.2 Bacterias con actividad nematocida.**

Existen diversas bacterias que han mostrado eficiencia para disminuir las poblaciones de nematodos, como son *Bacillus* sp. y *Pseudomonas* sp., que producen proteínas Cry y Cyt, que son las únicas ampliamente estudiadas como plaguicidas. (Garrido *et al.*, 2024) (Vázquez *et al.*, 2012)

Ruanpanum (2010) aisló y seleccionó al actinomiceto *Streptomyces* sp. de 23 muestras de suelos infectados por nematodos fitoparásitos, considerándolo como posible agente de control biológico, ya que redujo la tasa de eclosión de huevos en un 33.1%, y aumentó la tasa de mortalidad juvenil en un 82%. Los actinomicetos son bacterias Gram-positivas y no ácido alcohol resistente, que se caracterizan por formar filamentos ramificados semejantes a los hongos, son saprofitos y sus células son procariotas; son quimioautótrofos que realizan respiración aeróbica o en algunos casos fermentativa (Bergey *et al.*, 2000). Dentro de sus características particulares presentan un olor típico a suelo húmedo por la producción de un metabolito llamado "geosmina". Los actinomicetos son abundantes y cosmopolitas en el ambiente, lagos, ríos, suelo y estiércol de animales; son aerobios y se ubican en la superficie del suelo, aunque también viven en los horizontes inferiores, en especial en suelos alcalinos son indicadores biológicos de la calidad del suelo, debido a que son capaces de sobrevivir en presencia de contaminantes como plaguicidas, hidrocarburos y metales pesados y tienen un alto contenido de guanina y citosina en su ADN (Dávila *et al.*, 2013; Yáñez *et al.*, 2020).

Los productos de actinomicetos incluyen principalmente: antibióticos, antifúngicos, metabolitos, enzimas extracelulares (quitinasas, peroxidasas, glucanasas), inhibidores enzimáticos, neurotransmisores, terpenoides, pigmentos, anticancerígenos y pesticidas entre otros; presentan una alta actividad metabólica y son capaces de degradar la materia orgánica vegetal y

animal, producen sideróforos, sustancias promotoras del crecimiento vegetal in vitro, ayudan a la asimilación del hierro en la fijación de nitrógeno, lo cual contribuye indirectamente a la promoción de crecimiento vegetal. En diversos estudios se ha encontrado actividad antagonista de hongos fitopatógenos como *Alternaria sp.*, *Rhizoctonia sp.*, *Fusarium sp.* y *Colletotrichum sp.*, por lo tanto, tienen un alto potencial como controlador biológico de patógenos (Dávila *et al.*, 2013).

### **2.5.6 Nanoparticulas**

Las nanopartículas (NPs) son unas estructuras con tamaños no mayores a 100 nanómetros (es decir  $1 \cdot 10^{-7}$  metros), y se pueden sintetizar por diferentes materiales como el metal. Las nanoparticulas metálicas en particular poseen características o propiedades interesantes para la aplicación en diversas áreas tecnológicas. La nanotecnología se define como la disciplina centrada en el diseño, estudio, manipulación y aplicaciones de materiales, aparatos y sistemas funcionales mediante el control de los materiales a nanoescala y la explotación de la misma (Gómez, 2018).

Las nanopartículas de oro, hierro, platino o de óxidos metálicos son en la actualidad las más usadas y caracterizadas las cuales se sintetizan a partir de iones de plata (AgNPs), debido a sus propiedades físicas (conductividad), químicas (estabilidad) y biológicas (actividad catalítica y antibacterial) (Gómez, 2018)

En la actualidad en la agricultura se ha utilizado distintas aplicaciones, como el desarrollo de nanoformulaciones de agroquímicos para aplicar pesticidas y fertilizantes para el mejoramiento de los cultivos; el uso de nanosensores en la protección de cultivos para la identificación de enfermedades y residuos de agroquímicos; el empleo de nanodispositivos para la ingeniería genética de las plantas; los diagnósticos de enfermedades en plantas; y el manejo postcosecha. (Acevedo *et al.*, 2023).

Una de las posibles soluciones es el uso de NPs metálicas que, entre otras propiedades interesantes, tienen propiedades antimicrobianas. Las nanopartículas de cobre (NPsCu) u óxidos de cobre (NPsCuO) poseen dichas propiedades y, además, son de bajo costo y fácil obtención. Estas nanopartículas han sido utilizadas para múltiples aplicaciones como fungicidas y bactericidas, así como para promover el crecimiento de las plantas. Las propiedades de las NPs están ligadas a su tamaño y forma y, a su vez, estas características dependen del método de síntesis utilizado, que puede ser físico, químico o biológico (Acevedo *et al.*, 2023).

El-Ashry (2022) considera una herramienta prometedora y valiosa la utilización de nanopartículas como nematocida. En actuales investigaciones se han identificado varias biomoléculas en NPs Cu, entre ellas p-dioxano-2, 3-diol, benceno, 2-benciloxi-1-metoxi 4 (2nitroetenil), ácido octadecenoico, estearato de metilo, bencenamina, acetofenona, ácido octadecenoico, ácido alfa-benzamido-2-hidroxicinámico, (2E, 4E)-N- isobutiltetradeca-2, 4-dienamida, éster metílico del ácido hexadecanoico. Estos fotoquímicos se han utilizado como antagonista de microbios patógenos como nematodos fitoparásitos (Amid *et al.*, 2022).

### **3. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1 Localización de Áreas de Estudio.**

La primera etapa fue la producción de las nanopartículas en el Departamento de materiales avanzados del centro de investigación en química aplicada (CIQA) y la preparación de los actinomicetos que se produjeron en el Laboratorio de Microbiología de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Coahuila.

La segunda etapa fue en el Laboratorio de fitonematología en el Departamento de Parasitología ubicado en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

La última y tercera etapa se llevó a cabo en el invernadero de Parasitología de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro ubicada en Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.

#### **3.2 Obtención de muestras.**

La obtención de muestra fue en un rancho agrícola de la localidad del Venado en el estado de San Luis Potosí, México. El muestreo fue dirigido a plantas de pepino *Cucumis sativus* L. (Cucurbitaceae) con presencia de síntomas de clorosis, achaparramiento y agallas en sus raíces. Estas se trasladaron al Laboratorio de Nematología de la UAAAN para su procesamiento.

#### **3.3 Extracción e identificación de nematodos.**

La extracción del nematodo *M. incognita* fue realizada por el proceso de tamizado y centrifugado donde se utilizó las raíces infectadas con agallas, las cuales fueron lavadas con abundante agua hasta eliminar el suelo adherido, después se cortaron en trozos de 1 cm y se molieron en una licuadora 10 g de muestra, con 200 mL de agua y 0.5 mL de hipoclorito de sodio; se molió en tres repeticiones con intervalos de 10 segundos para después realizar el tamizado. El resultado

del licuado se agregó al tamiz de 50 mallas con un poco de agua para el lavado, una vez lavado se recolectó la muestra sobrante y se repitió el procedimiento en los tamices de 100, 200, 325 y 500 mallas. La muestra en 200 mallas se guardó para la obtención de hembras y así realizar cortes perianales y realizar la correcta identificación de la especie. Se recolectó lo obtenido en los tamices de 325 y 500 mallas (30 mL), se colocó en un tubo de centrifuga, se le agregó 1 g de caolín donde se mezcló muy bien y después se colocaron en tubos con muestra en la centrifuga por 5 minutos a 2500 RPM. Una vez acabado esto se decantó los tubos y se conservó el precipitado (Caolín con nematodos), con una solución de sacarosa los tubos se aforaron con 30 mL y se agito hasta obtener una mezcla homogénea (Figura 1). Posteriormente se centrifugaron por 3 minutos a 2500 RPM. Al final el líquido sobrenadante se pasó por el tamiz de 500 mallas y fue lavado con abundante agua, tomando una muestra de 40 mL aproximadamente, la cual se observó en el estereoscopio para confirmar la presencia de huevecillos como nematodos juveniles (Andrés y Verdejo, 2011).

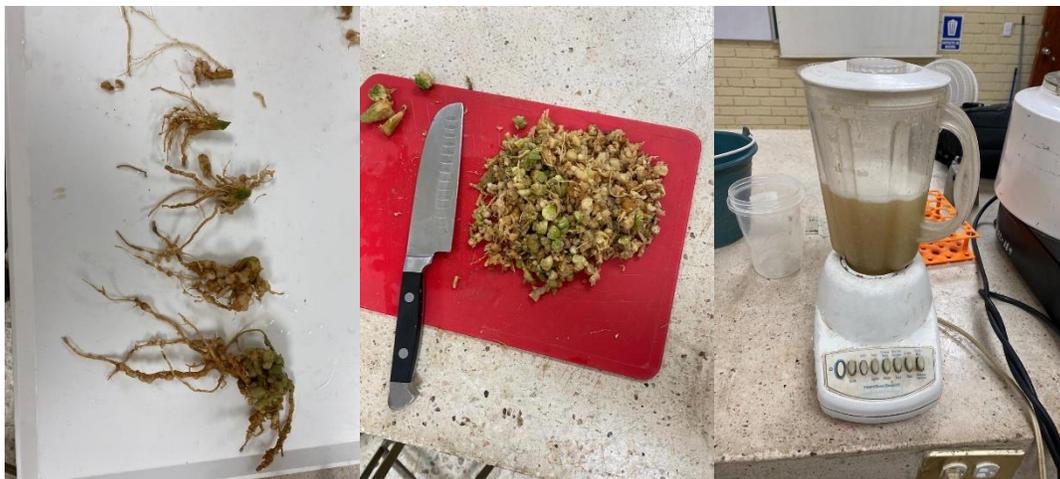


Figura 1. Proceso de extracción y tamizado

Se extrajeron hembras, juveniles y masas de huevos de *Meloidogyne* sp. a partir de raíces con agallas por medio de una aguja de disección y un estereoscopio a 45X. Luego, varias hembras se colocaron en portaobjetos para observar e identificar la especie de acuerdo con el método descrito por Franklin (1962). Y se

comparó la morfología de los diseños perineales con descripciones e ilustraciones elaboradas por Taylor y Sasser (1978) y Eisenback (1983).

### 3.4 Preparación del inocular.

En el laboratorio de fitonematología se preparó el inocular. En una cámara cuadriculada se colocó 1 mL de solución extraída por el tamizaje, y se realizó un conteo de nematodos y huevecillos obtenidos, repitiendo seis veces el procedimiento con el fin de obtener una media (Figura 2).

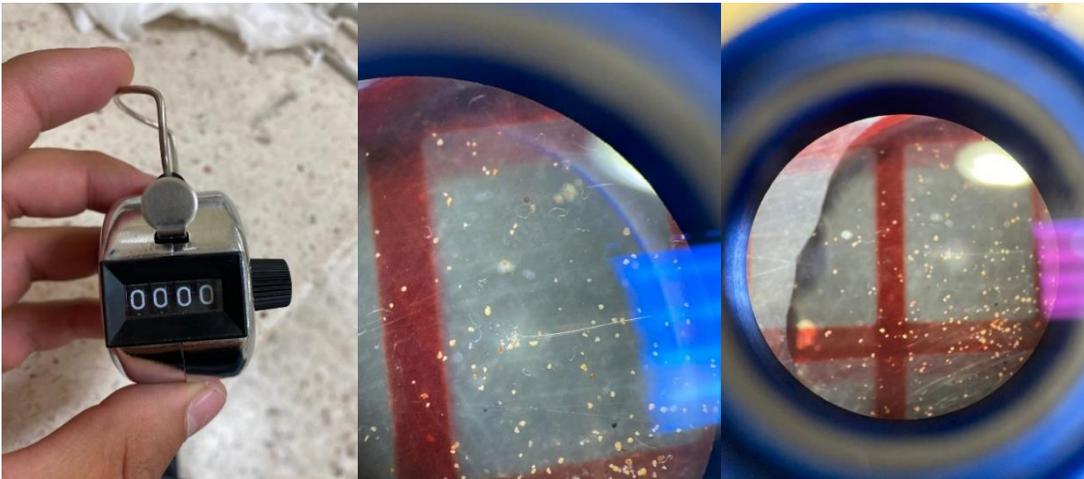


Figura 2. Cámara cuadriculada y contador para preparar el inocular.

### 3.5 Tratamientos utilizados

Las nanopartículas Óxido de cobre (NPsCuO) y nanopartículas de Cobre (NPsCu) se utilizaron a concentraciones de 1250 ppm.

Los *Streptomyces* sp, fueron aisladas a partir de suelo e identificadas por morfología macroscópica y microscópica en el Laboratorio de Microbiología de la facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Coahuila. Se inocularon en matraces Erlenmeyer de 1000 mL, en 500 mL de caldo de papa enriquecido con malta y levadura al 3%. Se incubaron a  $30^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}$  en un agitador rotatorio a 150 rpm por siete días. Al séptimo día de la fermentación líquida, se

determinó la concentración de las bacterias, por medio del vertido en placa extendido utilizando el conteo de las unidades formadoras de colonias (UFC) obteniendo.

El producto Nematrix es un nematicida comercial de origen botánico y con microorganismos, fue otorgado por la empresa Vidra. Está conformado por un complejo de bacterias como: *Paecilomyces* sp. Bainier (Eurotiomycetes; Eurotiomycetidae), *Pseudomonas* sp. Migula 1894 (Pseudomonadales: Pseudomonadaceae) y *Bacillus* sp. Cohn (Bacillales: Bacillaceae). además de extractos vegetales como nuez, *Yucca schidigera* Roezl ex Ortgies (Asparagales: Asparagaceae), lechuguilla y aceite de higuera. Este producto es recomendado en dosis de 4 a 6 L por hectárea y en los cultivos como café y tomate. Los principales nematodos que controla es *Meloidogyne* sp, *Pratylenchus* sp y *Dorylaimus* sp.

La abamectina comercial utilizada fue OREGON 60 SC, de la empresa FMC Agroquímica de México, S. de R.L. de C.V., es un nematicida recomendado para el control de nematodos en diversos cultivos y actúa por contacto e ingestión. La abamectina incrementa la liberación del ácido amino gamma butírico (GABA), el cual es un neurotransmisor inhibitorio de las terminales nerviosas de insectos y nematodos, que disminuye o detiene los impulsos nerviosos necesarios para el movimiento de los músculos. Las plagas quedan paralizadas, la alimentación se inhibe y en un periodo de dos a cuatro días (dependiendo de la especie y su estadio) muere (Wagner, 2012; Abongwa *et al.*, 2017; Khan y Rahman, 2017).

### **3.6 Evaluación de actividad nematicida de tratamientos *in vitro***

En la muestra de suelo proveniente del ejido “El Venado” en el estado San Luis Potosí, se observó que varias plantas del cultivo de pepino presentaban raíces con agallas. En las muestras de suelo se comprobó la abundante presencia de nematodos filiformes, principalmente del género *M. incognita*. En el laboratorio de fitonematología se colocaron 100 g del suelo, en 16 vasos desechables, con capacidad de 250 mL (Figura 3). En cada vaso con suelo, se agregaron 25 mL

de cada tratamiento a evaluar con 4 repeticiones, 48 h después se colocaron las muestras, en embudos de Baermann con el fin de extraer y contar los nematodos vivos que descendieron por el embudo, comparándolos con el testigo que consistía en agua destilada (Cromwell *et al.*, 2014).



Figura 3. Evaluación in vitro en el laboratorio de Nematología.

### 3.7 Preparación de planta

En el invernadero de Parasitología de la UAAAN, se realizó la preparación de la charola de siembra, con una mezcla de Peat Moss y perlita al 50% (Figura 4). Se utilizó la semilla de tomate variedad Rio Grande.



Figura 4. Preparación de la charola para la siembra de la semilla de tomate.

Se realizaron riegos cada tercer día con una fertilización basada en N, P y Ca.



Figura 5. Germinación de la semilla.

### 3.8 Trasplante.

El trasplante de plántula se realizó 30 días después de siembra en bolsas de polietileno con capacidad de 1 kg donde se utilizó una proporción de 50% Peat Moss y 50% perlita, sobre una cama de cintura en el invernadero de Departamento de Parasitología con una malla antiafidos (Figura 6).



Figura 6. Trasplante de plántula.

### 3.9 Diseño.

Se realizó un diseño experimental con bloques al azar, con seis tratamientos, con cuatro repeticiones.

### 3.10 Inoculación de nematodos en plantas

Después de 15 días del trasplante, se inocularon los nematodos juveniles y huevecillos de *M. incognita* en las macetas, con apoyo de una micropipeta. Se realizaron cuatro orificios alrededor del tallo alejados con uno y tres cm de profundidad, cerca de la raíz (Figura 7). La solución que se inoculó fue de 1mL por orificio, con un promedio de 3,000 nematodos de estadios juveniles y huevecillos por planta.



Figura 7. Inoculación de nematodos en la planta

### 3.11 Aplicación de tratamientos

La aplicación de los tratamientos fue en tres ocasiones. La primera aplicación fue 48 horas después de la inoculación de los nematodos, la segunda, a los 15 días después de la inoculación y la tercera después de 30 días (Figura 8).



Figura 8. Aplicación de nematodos en la planta

### **3.12 Número de agallas en plantas de tomate**

En el ensayo se cuantificó el número de agallas por raíz, mediante observación directa, extrayendo la raíz al final del cultivo.

### **3.13 Conteo de nematodos en el suelo.**

Al final del experimento de cada planta se recolectaron 100 g del sustrato y se colocó en embudo de Baerman. Pasadas las 24 horas se recolectaron 100 mL de la muestra filtrada sobre un vaso de precipitado para su observación en el microscopio según la metodología de Valero (2012).

### **3.14 Las determinaciones de variables agronómicas se realizaron de la siguiente manera.**

**Altura de planta (cm):** Se midió al final del experimento con ayuda de una cinta métrica y tomando desde la base del sustrato hasta la parte final o más alta de la planta.

**Diámetro de tallo (cm):** Para medir el tallo se hizo con ayuda de un vernier digital que se colocó en el tallo a 1 cm del sustrato. Esto se realizó al final del experimento.

**Flores:** Se contaron los botones florales al final del experimento.

**Longitud de raíz (cm):** Al final se hizo un lavado con abundante agua con presión para quitar todo el sustrato, prosiguiendo se cortó la parte aérea para solo dejar la raíz y hacer su medición con ayuda de una cinta métrica.

**Peso fresco de raíz (g):** Se colocó en una báscula digital solo la parte de la raíz para tomar su peso al final del experimento.

### **3.15 Análisis estadístico.**

Los resultados y datos de cada variable estudiadas y además de la prueba de efectividad fueron evaluados mediante un análisis de varianza y prueba de comparación de medias de Tukey ( $p \leq 0.05$ ) bajo un diseño experimental en bloques completamente al azar mediante el empleo del programa Statistical Analysis System (SAS).

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Identificación de nematodos.

De las raíces que se analizaron procedentes del ejido “El Venado”, se obtuvieron hembras adultas, y bajo el microscopio estereoscópico se le realizaron cortes perianales para su identificación, mostrando un arco dorsal alto y cuadrado, con estrías onduladas, sin líneas laterales visibles, corroborando la identificación de *Meloidogyne incognita* según las claves Eisenback *et al.* (1981) (Figura 9). A nivel mundial este nematodo es uno de los más importante por su presencia en más de 200 hospederos, ocasionando grandes pérdidas en tomate y pepino (El-Sappah *et al.*, 2019).



Figura 9. Corte perianal de *Meloidogyne incognita*.

### 4.2 Evaluación de actividad nematicida de tratamientos *in vitro*

Los resultados obtenidos en la prueba de suelo *in vitro* presentaron diferencias estadísticas significativas en comparación al testigo, que mostró una media de 18.83 nematodos filiformes en 1 mL del líquido extraído. A excepción de las NPsCu, los demás tratamientos mostraron gran disminución en el número de nematodos filiformes, aunque no presentaron diferencia estadística entre estos,

por otro lado, las NPsCuO fue el tratamiento con menor población, con una media de 2.66 y seguido de *Streptomyces* sp. con 3.66 nematodos (Figura 10).

Las NPsCuO mostraron el mejor resultado y se le puede atribuir a lo mencionado por Amir *et al.* (2022) ya que menciona que el óxido de cobre se puede oxidar por diferentes factores como el suelo, temperatura y pH, además al reaccionar con estos factores se puede crear diferentes compuestos y estos interferir con el metabolismo del nematodo.

En el caso de *Streptomyces*, puede atribuirse a produce diferentes metabolitos secundarios como enzimas extracelulares (quitinasas, peroxidasas y glucanasas); pudiendo ser estas enzimas las que afecten a la cutícula del nematodo causando la muerte (Dávila *et al.*, 2013).



Figura 10. Resultados de actividad nematicida *in vitro*

#### 4.3 Evaluación del agallamiento en plantas de tomate bajo condiciones de invernadero.

Los resultados mostraron gran diferencia estadística comparados con el testigo, quien presentó una media de 229 agallas. Los tratamientos de control no presentaron diferencia estadística entre estos, pero si visible y numéricamente, ya que las plantas con abamectina mostraron una media de 7.75 y *Streptomyces*

sp. 14.5. Los tratamientos con NPsCu, NPsCuO, y Nematrix lograron los resultados 49.75, 51.75, y 25.5 respectivamente (Figura 11).

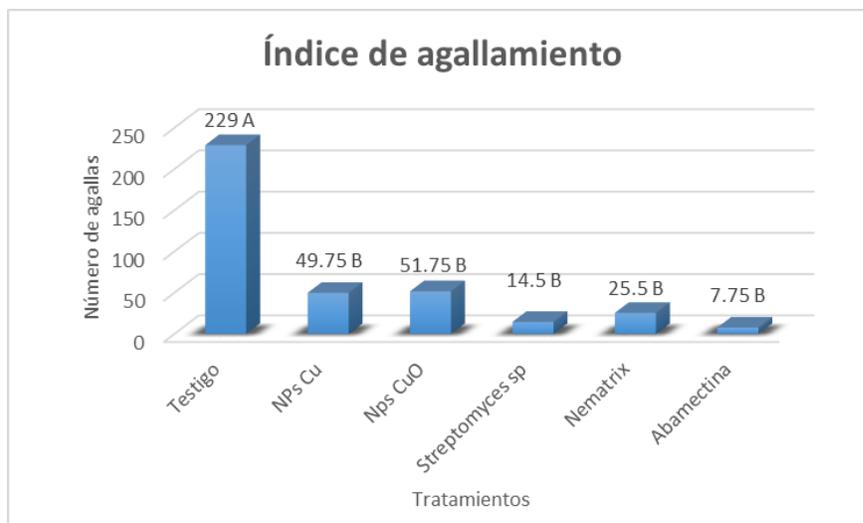


Figura 11. Índice de agallamiento al final del experimento.



Figura 12. Agallas en los tratamientos comparado con el testigo

En los resultados se puede observar que el tratamiento con *Streptomyces* sp. tuvo la misma eficacia que el tratamiento abamectina, y se comprueba lo mencionado por Ruanpanum (2010) que aisló *Streptomyces* sp y lo evaluó como posible agente de control biológico de nematodos fitoparásitos, reduciendo la tasa de eclosión de huevecillos y aumentando la tasa de mortalidad de juveniles.

Kaari *et al.* (2023) menciona que *Streptomyces* sp. produce exoenzimas y otros compuestos tóxicos que son eficaces contra los nematodos.

Rai *et al.* (2009) muestra que las NPs metálicas pueden tener una toxicidad directa con el nematodo según su tamaño, ya que pueden introducirse en el cuerpo de este directamente, provocando problemas fisiológicos y metabólicos causando la muerte o reduciendo su capacidad para hacer agallas. Esta investigación es consistente al tratamiento con NPsCuO y NPsCu. Para estas últimas, de igual manera Rai *et al.* (2009) mencionan que al ser un metal pesado en forma de nanopartículas puede generar especies reactivas de oxígeno que dañan las membranas celulares, proteínas y ADN del nematodo reduciendo una vez más su capacidad para formar agallas.

#### **4.4 Conteo de nematodos en el suelo.**

Al analizar los resultados de los nematodos en el sustrato de las plantas, se observó que todos los tratamientos presentaron mejores resultados que el testigo, ocasionando disminución de los nematodos filiformes (Figura 13). Entre estos estadísticamente no hubo diferencias. Numéricamente, se observa que el mejor agente de control fue el producto Nematrix con una media 35.75 filiformes vivos, seguido de abamectina con 43.50, y el actinomiceto con 92. Los tratamientos de NPsCu y NPsCuO obtuvieron resultados de 118.75 y 170.50 filiformes contabilizados, mientras que el testigo obtuvo 487.75.

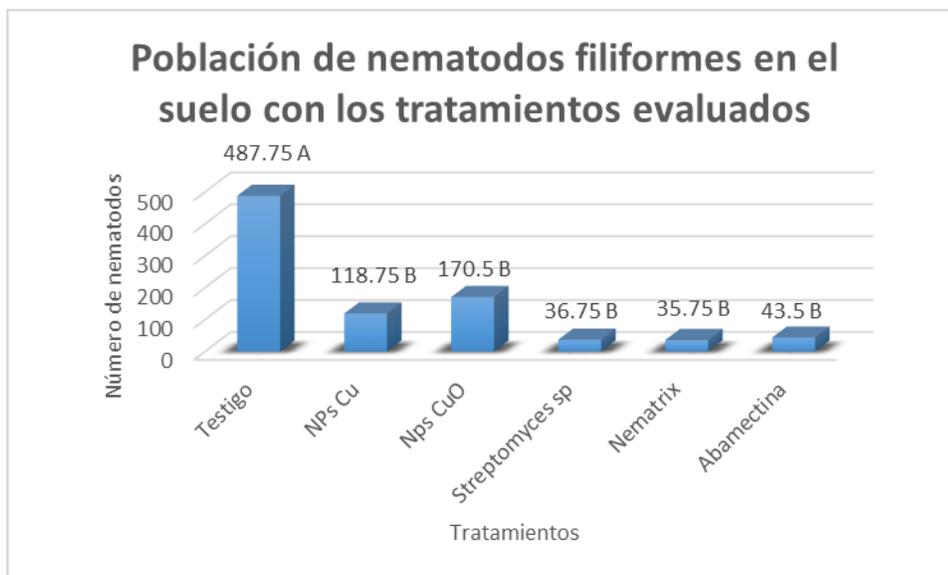


Figura 13. Población de nematodos filiformes en el suelo al final del experimento.

Se puede observar que en el tratamiento Nematrix se comportó muy parecido a la abamectina, esto se puede atribuir a su composición, ya que en su formulación cuenta con extractos de aceite de higuera y *Bacillus* sp. En este sentido, Siddiqui y Shaukat (2002) mencionan que estas producen las proteínas Cry que además de tener potencial insecticida puede afectar al nematodo en sus sistemas internos. También agregan que el aceite de higuera puede liberar diferentes compuestos en el suelo que dañan la biología e inhiben en el desarrollo del nematodo.

#### 4.5 Evaluación de variables agronómicas de plantas de tomate.

##### 4.5.1 Altura de planta

El resultado obtenido (Figura 14) al final del experimento demostró que el mejor tratamiento fue el de NPsCuO con una media de altura de 150.50 cm, seguido del testigo, abamectina, NPsCu, Actinomiceto y al final con menor altura el Nematrix con 131.75 cm, 121.75, 119.75, 115.75 cm y 90 cm respectivamente. Esto coincide con lo reportado por Engates y Shipley (2011) que mencionan que la aplicación de NPsCuO induce un mayor crecimiento en las plantas de

diferentes cultivos y esto puede deberse a que el cobre actúa en la síntesis de clorofila dentro del proceso de la fotosíntesis, lo cual da paso a un mejor y mayor desarrollo vegetativo.



Figura 14. Altura de las plantas al final del experimento.

#### 4.5.2 Número de racimos.

El tratamiento de abamectina mostró un mayor número de racimos con 4, seguido de las NPsCuO con 3.5 racimos (Figura 15). Este comportamiento se puede deber a las características y propiedades específicas de las NPs, lo que puede influir en la translocación y acumulación dentro de las plantas y así tener un efecto positivo en el desarrollo y crecimiento de las plantas (López *et al.* 2016).

Además, la abamectina influye en las respuestas hormonales de las plantas, en giberelinas y auxinas, siendo estas las involucradas en el crecimiento y la floración (Khater y El-Baky, 2013).



Figura 15. Número de racimos por tratamiento al final del experimento.

#### 4.5.3 Longitud de raíz.

En este parámetro no hubo una diferencia estadística entre los tratamientos, pero sí diferencia numérica. Las plantas con mayor longitud de raíz fueron las tratadas con abamectina, con una media de 55 cm, seguido de las NPs CuO con 54 cm, el testigo mostró una media de 44 cm en la longitud de su raíz (Figura 16).

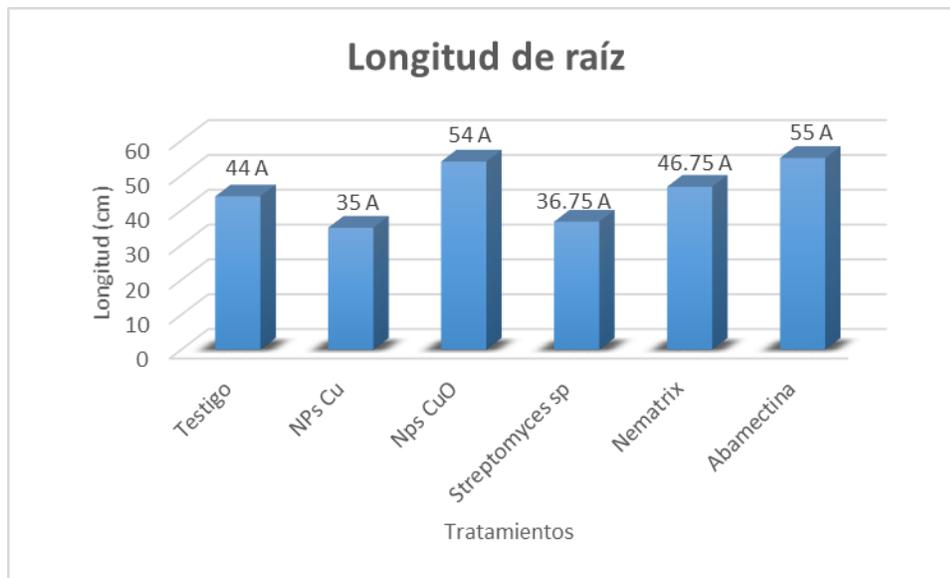


Figura 16. Longitud de la raíz.

#### 4.5.4 Peso fresco de raíz.

En este parámetro se observó diferencias estadísticas entre los tratamientos. El tratamiento con mayor peso de raíz fue la abamectina con 53 g en comparación al más bajo con NPsCu con 7.25 g. Los tratamientos NPsCuO, Nematrix, actinomiceto y el testigo obtuvieron los resultados 22.50, 15.50, 9.75 y 26.50 g (Figura 17). Esto difiere a lo mencionado por Rivera *et al.* (2021) que indica que las NPsCu y NPsCuO aumenta significativamente el peso fresco de la raíz y puede ser ocasionado por las concentraciones mayores a 1000 ppm. Medina (2024) menciona que la longitud área del tallo y al igual que la raíz disminuyen cuando se aumenta la concentración de NPs.

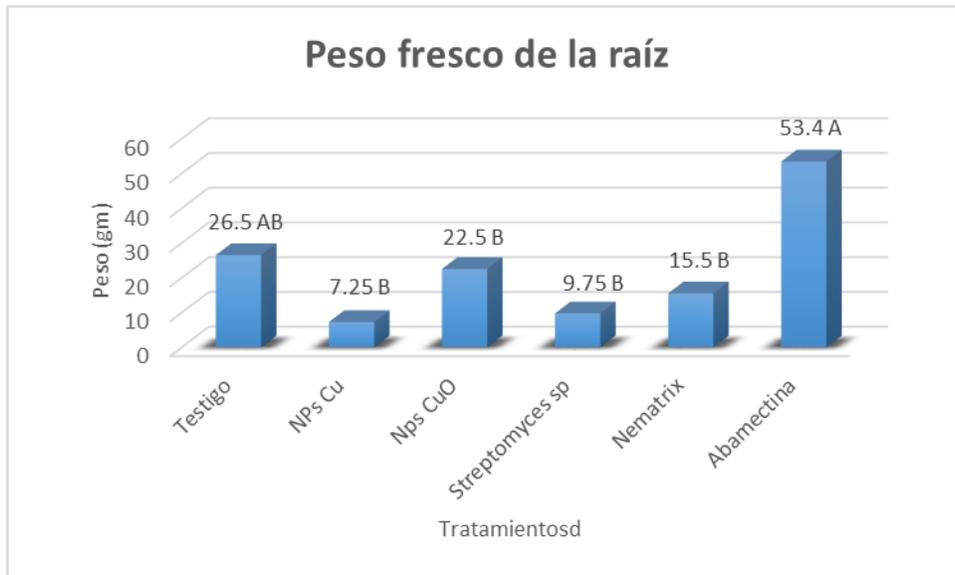


Figura 17. Peso fresco de la raíz medida con una cinta métrica.

#### 4.5.5 Diámetro de tallo.

No se presentó diferencia estadística entre los tratamientos, ya que los resultados fueron muy similares, el testigo con 6.95 cm, abamectina con 6.82 cm, NPsCuO con 6.15 cm, *Streptomyces* sp. con 6.1 cm, Nematrix y NPsCu con 4.75 cm y 4.22 cm (Figura 18). Esto difiere con Rico (2009) y Rivera *et al.* (2021) que mencionan que las NPs incrementa las variables agronómicas en concentraciones de 1000 ppm y que las cepas de actinomicetos tienen un efecto benéfico en cuanto a la promoción de crecimiento de la planta, como el incremento radicular, y en este trabajo no se logró observar ese efecto.

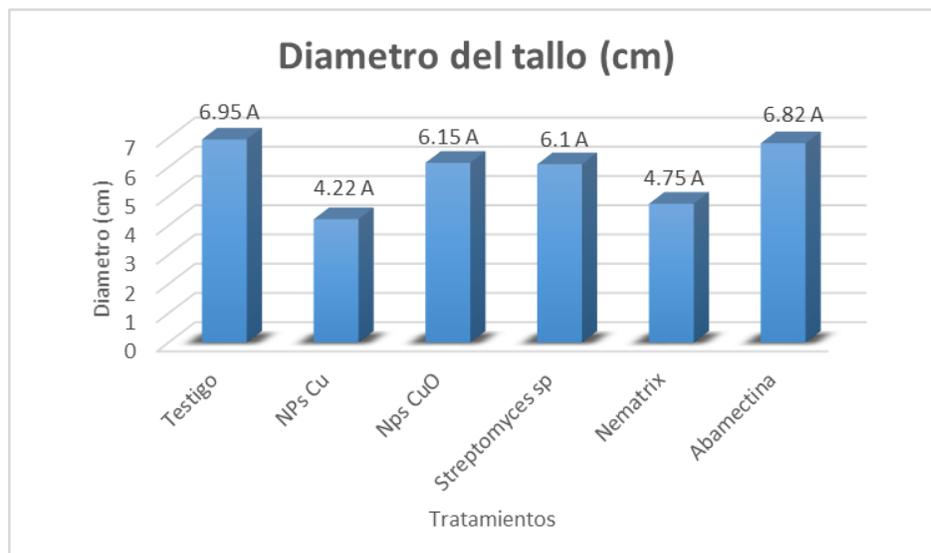


Figura 18. Diámetro del tallo en cm.

## 5. CONCLUSIÓN

Los tratamientos evaluados demostraron actividad nematicida tanto en pruebas *in vitro* como en condiciones de invernadero, provocando mortalidad de nematodos filiformes en el suelo y una reducción significativa en el número de agallas en las raíces inoculadas con *Meloidogyne incognita*. Su eficacia fue comparable al nematicida químico comercial, lo que indica que son alternativas prometedoras, más seguras para el medio ambiente y la salud humana. Además, mostraron efectos positivos en algunas variables agronómicas evaluadas, reforzando su potencial para el control sostenible de este fitonematodo.

## 6. LITERATURA CITADA

- Abongwa, M., Martin, R. y Robertson, A. (2017). A BRIEF REVIEW ON THE MODE OF ACTION OF ANTINEMATODAL DRUGS. *Acta Veterinaria*, 67(2): 137.
- Acevedo, D., Ossa, C. & Torres, A. (2023). Evaluación de protocolos de síntesis de nanopartículas de cobre u óxidos de cobre. *Ingeniería*, 28(2),
- Agrios, G. N. (2005). *Plant pathology*. Nueva York: 5 ed. Elsevier Academic Press.
- Alcasio, R. (2014). Generalidades de los nematodos fitopatógenos. *Revista Mexicana de Fitopatología*. 32 (suplemento): 30-31.
- Amid, K., Manar, B., Mohtaram, D., Mohamed, S., Mohd, K., Sajid, A., Mohamed, H., Saad, A. y Faheem, A. (2022). Las nanopartículas de óxido de cobre sintetizadas a través de la ruta verde actúan como antagonistas del nematodo agallador patógeno, *Meloidogyne incognita* *Green Chemistry Letters and Reviews* , 15 (3), 491–507.
- Barnes, R., Glaze, S., Wick, R y Hashemi, M. (2020). Biofumigación: Una estrategia alternativa para el control de nematodos fitoparásitos. *Revista de Agricultura Integrativa*. 19 (7). 1680-1690
- Bishop, A., Gowen, S., Pembroke, B. y Troter, J., (2007). Morphological and molecular characteristics of a new species of *Pasteuria* parasitic on *Meloidogyne ardenensis*. *Journal of invertebrate pathology*, 96: 28-33
- Camues, I. (2019). Identificación de los síntomas causados por *Meloidogyne* sp. en el cultivo de tomate riñón (*Lycopersicon esculentum* Mill.) bajo invernadero y sus métodos de control en el Sector de Chaltura. Examen de grado para optar por el título de Ingeniero Agrónomo. Universidad Técnica de Babahoyo. Carchi, Ecuador. 37p.
- Cepeda, S. (1996). *Nematología Agrícola*. Pp. 132-136.

- Coke, M., Bell, C. y Urwin, P. (2024). The Use of *Caenorhabditis elegans* as a Model for Plant-Parasitic Nematodes: What Have We Learned? *Annu. Rev. Phytopathol.* 62: 162.
- Cromwell, W., Yang, J., Starr, J. y Jo, Y. (2014). Nematicidal Effects of Silver Nanoparticles on Root-knot Nematode in Bermudagrass. *J Nematol.* 46(3):261-6.
- Curay, S., Mangui, J., Pérez, M. y Telenchana, N. (2022). Biofumigación y solarización como estrategias de manejo de nematodos en tomate (*Solanum lycopersicum*).
- Dávila, M., Gallegos, G., Hernández, F., Ochoa, Y. & Flores, A. (2013). Actinomicetos antagónicos contra hongos fitopatógenos de importancia agrícola. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 4(8): 1187-1196.
- De Jin, R., Suh, J., Park R. y Kim, Y. (2005). Effect of chitin compost and broth on biological control of *Meloidogyne incognita* on tomato (*Lycopersicon esculentum Mill.*). *Nematology*. Vol. 7(1):125-132.
- Desaeger, J. (2019). *Meloidogyne hapla*, the Northern Root-Knot Nematode, in Florida Strawberries and Associated Double-Cropped Vegetables. (1): 15
- Dong L. y Zhang Q. (2006). Microbial control of plantparasitic nematodes: a five-party interaction. *Plant Soil.* 288:31–45.
- Eisenback, J., Hirschmann, H., Sasser, J. y Triantaphyllou, A. (1983). Guía para la identificación de las cuatro especies más comunes del nematodo agallador (*Meloidogyne* especies), con una clave pictórica. Departamento de Fitopatología del Colegio de Posgraduados. Montecillo, Estado de México. 48 p.
- El-Ashry, R., El-Saadony, M., El-Sobki, A., El-Tahan, A., Al-Otaibi, S., El-Shehawi, A., Saad, A. y Elshaer, N. (2022). Biological silicon nanoparticles maximize the efficiency of nematicides against biotic

stress induced by *Meloidogyne incognita* in eggplant. Saudi Journal of Biological Sciences.

El-Sappah, A., El-Awady, H., Yan, S., Qi, S., Liu, J., Cheng, G. y Liang, Y. (2019). Tomato Natural Resistance Genes in Controlling the Root- Knot Nematode. *Genes*, 10(11), 925.

Elling, A. (2013). Major emerging problems with minor *Meloidogyne* species. *Phytopathology*. 103: 1092-1102.

Engates, K.E. y H.J. Shipley. 2011. Adsorption of Pb, Cd, Cu, Zn, and Ni to titanium dioxide nanoparticles: effect of particle size, solid concentration, and exhaustion. *Environmental Science and Pollution Research*, 18(3), 386-395.

Fe, A. (2002). Estrategias en el control y manejo de nematodos fitoparásitos. *Ciencia y medio ambiente-CCMA-CSIC*. Pp 221.

Franklin, M. (1962). Preparation of posterior cuticular patterns of *Meloidogyne* spp. for identification. *Nematologica* 7:336-337.

Huang, B., Li, J., Wang, Q., Guo, M., Yan, D., Wensheng F., y Yuan J. (2018). Effect of soil fumigants on degradation of abamectin and their combination synergistic effect to root-knot nematode.

Garrido, E., Hernández, E., Camas, R., Quiroga, R., Noriega, D. y Farrera, D. (2010). Manejo integrado de las principales plagas y enfermedades del jitomate en Chiapas. Folleto Para Productores N° 9. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional Pacífico Sur. Campo Experimental Centro de Chiapas, Ocozocoautla de Espinosa, Chiapas, México. P 46.

Garrido, F., Dávila, M. y Hernández, A. (2024). Nematodos asociados al cultivo de pepino (*Cucumis sativus*) y efecto de rizobacterias promotoras de

- crecimiento sobre *Meloidogyne incognita* (Tylenchida: Heteroderidae).  
Revista de Ciencias Biológicas y de la Salud. 26: 1
- Guerena M. (2006). Nematodes: Alternative Controls. A Publication of ATTRA-  
National Sustainable Agriculture. 18.
- Ghareeb, R., El-Din, N., El-Maghraby, D., Ibrahim, D., Abdel, A. y Abdelslam, N.  
(2022). Nematicidal activity of seaweed-synthesized silver nanoparticles  
and extracts against *Meloidogyne incognita* on tomato plants.
- Godoy, P., Zolezzi, M. y Sepúlveda, P. (2018). Principales plagas y  
enfermedades en lechuga, tomate y cebolla. Boletín INIA N° 388,  
Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Centro Regional de  
Investigación La Platina, La Pintana, Chile. 58 p.
- Gómez, M. (2018). Nanomateriales, Nanopartículas y Síntesis verde. Revista  
Repertorio De Medicina Y Cirugía, 27(2).
- Hernández, S. y Alcalde, J. (2024). Un Análisis de la Competitividad del Tomate  
Mexicano en el Mercado de Estados Unidos. *The journal of Globalization,  
Competitiveness, and Gobernality*. 18 (3): 51-68.
- Juárez, A., Ortega, H., Benavides, A., Cadenas, G. y Pérez, F. (2015). Efecto en  
el rendimiento, contenido de minerales y compuestos antioxidantes en  
lechuga con aplicación de nanopartículas de Cu absorbidas en  
hidrogeles de quitosano. XV congreso iberoamericano para el  
desarrollo y aplicación de los plásticos en la agricultura, 318 pp.
- Kaari, M., Manikkam, R., Annamalai, K. y Joseph, J. (2023). Actinobacteria as a  
source of biofertilizer/biocontrol agents for bio-organic agriculture. *Journal  
of Applied Microbiology*, 134, Ixac047
- Khan, M., y Rahman, M. (2017). Pesticide residue in foods: Sources,  
management, and control. In *Pesticide Residue in Foods: Sources,  
Management, and Control*.
- Khater, H. y El-Baky, R. (2013). *Bioquímica y fisiología de los plaguicidas*

- López, L. y Jansson, H. (2001). Biodiversidad del suelo: control biológico de nematodos fitopatógenos por hongos nematófagos. Cuadernos de biodiversidad. 6: 10.
- López, M., Avilés, L., Pérez, N., Irizarry, B., Perales, O., Cedeno, M. y Román, F. (2016). Effect of cobalt ferrite (CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) nanoparticles on the growth and development of *Lycopersicon lycopersicum* (tomato plants). *Science of the Total Environment*, 550, 45–52.
- Martínez, E., Cervantes C., Aíl, L., Hernández C., y Rueda, E. (2016). Hongos fitopatógenos asociados al tomate (*Solanum Lycopersicum* L.) En la zona árida del noroeste de México: la importancia de su diagnóstico. *European Scientific Journal*, 12.
- Medina, J., Navarro, K., Acevedo, E., Alonso, M., Funes, A., Olvera, M. y Cruz, G. (2024). Evaluation of the phytotoxicity of metallic copper and copper oxide II nanoparticles in the germination of *Capsicum annuum* (pepper) seeds. *JÓVENES EN LA CIENCIA*, 28, 1–7.
- Ortiz, R., Guzmán, Ó. y Leguizamón, J., (2015). Manejo integrado del nematodo del nudo radical [*Meloidogyne incognita* (Kofoid y White) Chitwood y *Meloidogyne mayaguensis* Rammh & Hirschmann] en almácigos de guayabo (*Psidium guajava* Linneo), variedad Palmira.
- Osei, K., Osei, M., Mochiah, M., Lamptey, J. y Berchie, J. (2012). Plant parasitic nematodes associated with tomato in Ghana. *Nematol Mediterr.*40(1): 337
- Ozarslandan, A., Ata, A. y Keles, D. (2019). Investigation of resistant of eggplant genotypes against knot nematode *Meloidogyne incognita* (Kofoid & White, 1919) Chitwood, 1949. *Fresenius Environmental Bulletin* 28(6): 4811 4815.
- Pacheco, M., Reséndiz, F. y Arriola, V. (2020). Organismos entomopatógenos como control biológico en los sectores agropecuario y forestal de México. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 10(56), 4-32.

- Pakeertham K., Mikunthan G. y Tharshani N. (2009). Effect of different animal manures on *Meloidogyne incognita* on tomato. *World Journal of Agricultural Sciences*.5(4):432-435.
- Pérez, J. (2006). Trichoderma, alternativa para el control biológico de nematodos dentro de una agricultura sostenible. 1.
- Pérez, J., Guerra, D., Reyes, B., Cuevas, J., y Guerra, P. (2020). Actividad antimicrobiana in vitro de extractos de *Jatropha dioica* Seseé contra bacterias fitopatógenas de tomate. *Polibotánica*, (49), 125-133.
- Perry, R., y Moens, M. (2011). Introduction to Plant Parasitic Nematodes; Modes of Parasitism, Chapter 1. En: Jones, J., Gheysen, G., y Fenoll, C. Edit. *Genomics and molecular genetics of plant-nematode interactions* Dordrecht, The Netherlands Springer Press.
- Philbrick, A., Adhikari, T., Louws, F., y Gorny, A. (2020). *Meloidogyne enterolobii*, a Major Threat to Tomato Production: Current Status and Future Prospects for Its Management. *Frontiers in Plant Science*, 11: 1773.
- Pinheiro, J., Silva, G., Macedo, A., Biscaia, D., Ragassi, C., Ribeiro, C., Carvalho, S. y Reifschneider, F. (2020). New resistance sources to root-knot nematode in *Capsicum pepper*. *Horticultura Brasileira*, 38 (1): 33-40.
- Pu, W., Xiao, K., Luo, S., Zhu, H, Yuan, Z., Gao, C. y Hu, J. (2022) Characterization of Five *Meloidogyne incognita* Effectors Associated with PsoRPM3. *Int. J. Mol. Sci.* 23: 1498.
- Raaijmakers, J., Paulitz, T., Steinberg, C., Alabouvette, C. y Moenne, L. (2009). The rhizosphere: a playground and battlefield for soilborne pathogens and beneficial microorganisms. *Plant Soil*. 321:341-361.
- Rai, M., Yadav, A. y Gade, A. (2009). *Nanopartículas de plata como una nueva generación de antimicrobianos* . \*BiotAvances en biotecnología, 27(1)
- Ramírez, S. (2014). Especies cuarentenadas de nematodos fitoparásitos para México. *Revista Mexicana de Fitopatología*. 32: 39-40.

- Reyes, J., Rivero, M., García, E., Beltrán, F. y Ruiz, F. (2020). Aplicación de quitosano incrementa la emergencia, crecimiento y rendimiento del cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum L.*) en condiciones de invernadero. *Biotecnia*, 22(3): 156-163.
- Rivera, Y., Cadenas, G., Benavides, A., Sandoval, A., Cabrera, M. y Gonzáles, S. (2021). Complejo PVA-quitosán-nCu mejora el rendimiento y la respuesta de defensa en tomate. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 12: 6
- Rivas, T., González, L., Boicet, T., Jiménez, M., Falcón, A. y Terrero, J. (2021). Respuesta agronómica de dos variedades de tomate (*Solanum lycopersicum L.*) a la aplicación del bioestimulante con quitosano. *Terra Latinoamericana*, 39: 796.
- Rizwan, M., Ali, S., Qayyum, M., Adrees, M., Ibrahim, M. y Abbas, A. (2017). Effect of metal and metal oxide nanoparticles on growth and physiology of globally important food crops: a critical review. *Journal of hazardous materials* (322), 2-16.
- Rodríguez, J., Pérez, A., Ortega, L. y Arteaga, M. (2020). Estudio hidrosostenible en el cultivo del tomate, su efecto en el rendimiento y calidad del fruto. *Cultivos Tropicales*, 41(2).
- Rodríguez, M., Gómez L. y Peteira, B. (2007). *Meloidogyne mayaguensis* plaga emergente para la agricultura tropical y subtropical. *Revista de Protección Vegetal*. 22(3):183-198.
- Ruanpanum, P., Tangchitsomkid, N. y Hyde, K. (2010). Actinomycetes and fungi isolated from plant-parasitic nematode infested soils: screening of the effective biocontrol potential, indole-3-acetic acid and siderophore production. *World J Microbiol Biotechnol* 26: 1569–1578
- Sánchez, S. (2020). "Recent advances in nematicide management for sustainable agriculture." *Crop Protection*, 137, 105295.

Shurtleff, M. y Avera, C. (2000.) Diagnosing Plant Diseases Caused by Nematodes. Segunda reimpression. APS Press. 187 p

SIAP 2023

Siddiqui, Z. y Shaukat, S. (2002). Control biológico de nematodos fitoparásitos mediante agentes microbianos. *Biología y bioquímica del suelo*

Smith, S. y Read, D. (2008). Mycorrhizal Symbiosis, Ed 3. Academic Press, New York, London, Burlington, San Diego.

Stadler, T., Buteler, M., y Weaver, D. (2010). Nanoinsecticidas: nuevas perspectivas para el control de plagas.

Tovar, S. (2014). Géneros y especies de importancia en la agricultura en México. *Revista Mexicana de Fitopatología*. 32: 34-35.

Vargas, R., Wang, A., Obregón, M., y Araya, M. (2015). Efecto de *Trichoderma* spp., *Paecilomyces lilacinus* y la inyección de nematicida en el pseudotallo en el combate de *Radopholus similis* y la producción de banano. *Agronomía Costarricense*, 39(2), 61-76.

Vázquez, A., Bravo, A., Mendoza, P., Liébano, E., Hernández, I., Yáñez, N., Aguilar, L., Ramírez, G., Hernández, E., Gutiérrez, Isidro. y López, M. (2012). Uso de productos derivados de *Bacillus thuringiensis* como alternativa de control en nematodos de importancia veterinaria: Revisión. *Revista mexicana de ciencias pecuarias*, 3(1), 77-88.

Vicente, N. (2007). Nematodos. Conjunto Tecnológico para la Producción de Tomate.

Wagner, W. (2012). Avermectins. *Drugs Made in Germany*, 27(4): 13–24.

Yáñez, G., Sánchez, M., Portilla, N., Marmolejo, Y., Águila, P., Lugo, J. & Vaca, R. (2020). Densidad poblacional de actinomicetos en suelos florícolas, enmendados con vermicomposta. *Terra Latinoamericana*, 38(4): 745-753.

Zhang, X. (2021). "The role of chemical nematicides in integrated pest management strategies." *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 69(18): 5360-5367.