

**UNIVERSIDAD NACIONAL  
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y EL MAR  
ESCUELA CIENCIAS AGRARIAS  
LICENCIATURA EN AGRICULTURA ALTERNATIVA**

**Efecto de tres bacterias promotoras del crecimiento vegetal sobre el nematodo agallador (*Meloidogyne* sp.) y variables agronómicas en el cultivo de chile (*Capsicum annum* L.) con fertilización convencional y orgánico en condiciones de invernadero en Barva, Heredia.**

**Trabajo final de graduación bajo la modalidad de tesis de grado sometida a consideración del Tribunal Examinador de la Escuela de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional para optar al grado de Licenciatura en Ingeniería en Agronomía**

**BACH. ANA VICTORIA VALVERDE JUÁREZ**

**Heredia, Costa Rica  
Julio, 2023**

**UNIVERSIDAD NACIONAL**  
**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y EL MAR**  
**ESCUELA DE CIENCIAS AGRARIAS**  
**LICENCIATURA EN AGRICULTURA ALTERNATIVA**

**Efecto de tres bacterias promotoras del crecimiento vegetal sobre el nematodo agallador (*Meloidogyne* sp.) y variables agronómicas en el cultivo de chile (*Capsicum annum* L.) con manejo convencional y orgánico en condiciones de invernadero en Barva, Heredia.**

Por

Bach. Ana Victoria Valverde Juárez

Tutor:

M.Sc. José Alonso Calvo Araya

Asesores:

Ph.D. Martha Orozco Aceves

M.Sc Arlette Orozco Muñoz

Campus Omar Dengo

Heredia, Costa Rica, 2023

**Trabajo final de graduación presentado como requisito parcial para optar al grado de Licenciatura en  
Ingeniería en Agronomía.**

**Tribunal Examinador.**

---

**M.Sc. Mairon Madriz Martínez**

Representante del Decanato de Facultad de Ciencias de la Tierra y el Mar

---

**M.Sc. Mauricio Arias Gamboa**

Representante Dirección de la Escuela de Ciencias Agrarias

---

**M.Sc. José Alonso Calvo Araya**

Director de tesis

---

**PhD. Martha Orozco Aceves**

Asesora

---

**M.Sc. Arlette Orozco Muñoz**

Asesora

---

**Bach. Ana Victoria Valverde Juárez**

Postulante

## **Dedicatoria**

*Al estado costarricense y a la Universidad Nacional de Costa Rica por darme a mí y al resto de la ciudadanía acceso a una educación pública de altísima calidad, el acceso a una beca la cual me permitió llevar a cabo concluir mis estudios.*

*A mí misma, por nunca haber dado un paso atrás a pesar de las adversidades que se presentaron. Por no haberme dejado vencer por los momentos difíciles que se me presentaron a lo largo de la carrera universitaria y siempre mantener mi frente en alto, sin perder el objetivo.*

*A mi padre Víctor Hugo Valverde Fernández por los valores inculcados como: respeto, trabajo duro, amor por el campo, pasión por las cosas que hago, constancia y perseverancia ante los problemas de la vida y admiración por el trabajo duro de cada uno los agricultores del país.*

*A Misha, la cual me ha acompañado desde mi primer año de universidad y ha estado en todos los altos y bajos que se han presentado a lo largo de mi vida durante estos últimos seis años.*

## **Agradecimientos**

*En primer lugar, quiero agradecer a mi tutor M.Sc. José Alonso Calvo Araya y asesores Ph.D. Martha Orozco Aceves y M.Sc. Arlette Orozco Muñoz por su paciencia, dedicación y guía del presente trabajo final de graduación. También quiero agradecer a la Escuela de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional por mi formación profesional.*

*Al profesor M. Sc. Alejandro Vargas Martínez por la ayuda en el diseño experimental y análisis estadístico de los datos. A mis colegas M. Sc. Mairon Madriz Martínez, Lic. Mauricio Arias Gamboa, Lic. Jose Padilla Fallas, Lic. José Mario Núñez Arroyo, Ing. Cristian Barquero Zúñiga, Ing. Juan Campos Barquero, Ing. Arie Esquivel Monge y a el Ing. Abelardo Arroyo Vargas, por todo el apoyo y ayuda brindada durante el desarrollo de este estudio.*

*A mis amigos Kevin Quesada Araya, Yaudieth Medina Navarrete, Heison Navarro Castillo y Yenci Medina Navarrete, los cuales también han formado parte importante de mi vida en estos últimos seis años y han estado ahí dándome su apoyo y consejos en las distintas etapas que he sobrellevado. También a mis amigos de la escuela, mis hermanos de la alama que amo con todo mi ser, José Fernández Flores, Maynor Rojas Cruz, Deiber Granados Vega, Ian Rojas Trejos y Eddy Guzmán Arroyo, porque a pesar de la distancia siempre estuvieron dándome todo su apoyo, sus consejos, sus buenos deseos y sacándome de los momentos de estrés con esas llamadas que nunca hicieron falta. Por último, quiero agradecer a cada una de las personas que me apoyaron y animaron en distintas ocasiones durante este proceso.*

## Resumen

El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de tres bacterias promotoras del crecimiento vegetal; *Bacillus amyloliquefaciens*, *Pseudomonas fluorescens* y *Streptomyces griseoviridis* y dos tipos de fertilización; química y orgánica (lombricomposta) en suelo para el control del nematodo agallador (*Meloidogyne* sp.), y su efecto en el desarrollo y producción del cultivo de chile para su implementación en el manejo ecológico de nematodos en condiciones de invernadero. Las plantas de chile dulce de la variedad Nathalie fueron inoculadas con el nematodo *Meloidogyne* sp. a los 15 días de trasplantadas, posteriormente se realizaron las aplicaciones de las bacterias promotoras de crecimiento y del nematicida oxamyl de acuerdo con la recomendación del fabricante. Se realizaron cuatro fertilizaciones, tanto químicas como orgánicas, en el momento del trasplante y a los 15, 30 y 45 días posteriores al trasplante. El ensayo tuvo una duración de cinco meses. Se establecieron un total de 9 tratamientos (3 tipos de bacterias + 1 control químico × 2 tipos de fertilización + 1 testigo con agua), cada uno de ellos con 4 repeticiones para un total de 36 plantas. Se realizaron mediciones de porcentaje de agallamiento (PA), índice de agallamiento (IA) y se determinó la eficiencia de los tratamientos. También se determinaron los pesos secos y frescos, tanto de la parte aérea como de la raíz de las plantas, incluyendo un conteo de la producción de frutos. El PA presentó diferencias significativas de acuerdo con los tratamientos aplicados. El mayor grado de afectación se presentó en el tratamiento testigo con un 71,2% de PA, mientras que el menor PA se observó en el tratamiento fertilización química × *B. amyloliquefaciens*. El IA no presentó diferencias significativas entre tratamientos, debido a que el efecto negativo del agallamiento fue contrarrestado por un adecuado crecimiento radical, lo cual fue especialmente visible en tratamientos como fertilización química × *B. amyloliquefaciens* y fertilización orgánica × oxamyl. En cuanto a la eficiencia, los mejores tratamientos fueron fertilización química × *B. amyloliquefaciens* y fertilización orgánica × *P. fluorescens*. Por otra parte, el tratamiento con mayor peso promedio de frutos correspondió a fertilizante orgánico × *P. fluorescens* (88,67 g) y fertilizante orgánico × *S. griseoviridis* (82,67g). Los frutos de menor peso se presentaron en fertilización química × oxamyl con peso promedio de 49 g. Los pesos fresco y seco promedio de la parte aérea de la planta fueron mayores en el tratamiento con fertilizante químico × *B. amyloliquefaciens* (151,38 g). En el caso del peso fresco de raíces, los valores más altos de registraron en el tratamiento de fertilizante químico × *S. griseoviridis*. El mayor peso seco

promedio de raíces se obtuvo en el tratamiento fertilizante orgánico  $\times$  *P. fluorescens*. Se concluye que las bacterias promotoras de crecimiento son una buena alternativa para el control de la afectación a causa del nematodo *Meloidogyne* sp. y que la fertilización orgánica tiene efectos positivos sobre la producción de frutos y su peso.

**Palabras clave:** bacterias promotoras de crecimiento, nematodo, chile dulce, lombricomposta.

## Abstract

The objective of this study was to evaluate the effect of three bacteria that promote plant growth; *Bacillus amyloliquefaciens*, *Pseudomonas fluorescens* and *Streptomyces griseoviridis* and two types of fertilization; chemical and organic (worm compost) in soil for the control of the root-knot nematode (*Meloidogyne* sp.), and its effect on the development and production of the chili crop for its implementation in the ecological management of nematodes in greenhouse conditions. Sweet pepper plants of the Nathalie variety were inoculated with the nematode *Meloidogyne* sp. 15 days after transplanting, the growth-promoting bacteria and oxamyl nematicide were subsequently applied according to the manufacturer's recommendation. Fertilizations, both chemical and organic, were applied as follows: first application to transplant, second fertilization 15 days after transplant, third fertilization 30 days after transplant, and fourth fertilization 45 days after transplant. The trial lasted for five months. A total of 9 treatments were established (3 types of bacteria + 1 chemical control  $\times$  2 types of fertilization + 1 control with water), each with 4 repetitions for a total of 36 plants. Percentage of gall (PA) and gall index (AI) were measured, and the efficiency of the treatments was determined. The dry and fresh weights of both the aerial part and the root of the plants were also determined, including a count of fruit production. The PA presented significant differences according to the applied treatments. The highest degree of involvement occurred in the control treatment with 71.2% PA, while the lowest PA was observed in the chemical fertilization  $\times$  *B. amyloliquefaciens* treatment. The AI did not present significant differences between treatments, because the negative effect of galling was counteracted by adequate root growth, which was especially visible in treatments such as chemical fertilization  $\times$  *B. amyloliquefaciens* and organic fertilization  $\times$  oxamyl. Regarding efficiency, the best treatments were chemical fertilization  $\times$  *B. amyloliquefaciens* and organic fertilization  $\times$  *P. fluorescens*. On

the other hand, the treatment with the highest average fruit weight corresponded to organic fertilizer × *P. fluorescens* (88.67 g) and organic fertilizer × *S. griseoviridis* (82.67 g). The fruits of lower weight were presented in chemical fertilization × oxamyl with an average weight of 49 g. The average fresh and dry weights of the area part of the plant were higher in the treatment with chemical fertilizer × *B. amyloliquefaciens* (151.38 g). In the case of the fresh weight of roots, the highest values were registered in the chemical fertilizer treatment × *S. griseoviridis*. The highest average dry weight of roots was obtained in the organic fertilizer treatment × *P. fluorescens*. It is concluded that growth-promoting bacteria are a good alternative for the control of the affectation caused by the nematode *Meloidogyne* sp. and that organic fertilization has positive effects on fruit production and weight.

**Keywords:** growth promoting rhizobacteria, nematode, bell pepper, vermicompost.

# ÍNDICE

Resumen.....	vi
Abstract.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE TABLAS .....	xii
ÍNDICE DE ANEXOS .....	xiii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS .....	3
<b>Objetivo general</b> .....	3
<b>Objetivos específicos</b> .....	3
3. MARCO TEÓRICO.....	4
<b>3.1 El cultivo de chile dulce</b> .....	4
<b>3.2 Importancia del cultivo de chile dulce en Costa Rica</b> .....	5
<b>3.3 Requerimientos nutricionales</b> .....	5
<b>3.4 Requerimientos agroclimáticos</b> .....	6
3.4.1 Temperatura .....	6
3.4.2 Humedad relativa .....	6
<b>3.5 El híbrido Nathalie</b> .....	7
<b>3.6 Plagas en el cultivo de chile</b> .....	7
<b>3.7 El nematodo agallador <i>Meloidogyne</i> sp.</b> .....	7
3.7.1 Importancia económica.....	7
3.7.2 Clasificación taxonómica.....	8
3.7.3 Características morfológicas .....	9
3.7.4 Ciclo de vida .....	9
3.7.5 Síntomas.....	10
3.7.6 Manejo de <i>Meloidogyne</i> sp. ....	10
3.7.6.1 Métodos culturales .....	11
3.7.6.2 Combate químico de <i>Meloidogyne</i> sp.....	11
3.7.6.3 Combate biológico .....	12

<b>3.8 Bacterias promotoras del crecimiento vegetal</b> .....	12
3.8.1 Generalidades de las bacterias promotoras del crecimiento vegetal .....	12
3.8.2 Bacterias promotoras del crecimiento vegetal y su efecto sobre nematodos fitoparásitos .....	14
<b>4. METODOLOGÍA</b> .....	14
<b>4.1 Localización del estudio</b> .....	14
<b>4.5 Recolección, tratamiento y caracterización de suelo</b> .....	15
<b>4.2 Material vegetal y siembra</b> .....	17
<b>4.6. Preparación de inóculo de <i>Meloidogyne</i> e inoculación de plantas</b> .....	18
<b>4.3 Tratamientos evaluados</b> .....	20
<b>4.7 Aplicación de los tratamientos</b> .....	22
Fertilización .....	22
Productos nematicidas.....	23
Riego.....	24
<b>4.9 Variables evaluadas</b> .....	24
4.9.1 Porcentaje de agallamiento .....	24
4.9.2 Índice de agallamiento .....	24
4.9.3 Eficacia de los productos sobre <i>Meloidogyne</i> sp. ....	25
4.9.4 Variables para determinar el desarrollo de la planta .....	26
<b>4.10 Diseño experimental</b> .....	26
<b>4.11 Análisis estadístico</b> .....	27
<b>5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	28
<b>5.1 Porcentaje de agallamiento</b> .....	28
<b>5.3 Eficacia de los tratamientos sobre <i>Meloidogyne</i> sp.</b> .....	35
<b>5.4 Producción y peso de frutos.</b> .....	37
<b>5.5 Peso fresco y seco de parte aérea y raíz</b> .....	38
<b>6. CONCLUSIONES</b> .....	43
<b>7. RECOMENDACIONES</b> .....	44
<b>8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	45
<b>9. ANEXOS</b> .....	58

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Distribución de la producción mundial de chile dulce por continente .....	4
Figura 2. Curva de absorción de nutrientes (N= nitrógeno, P= fosforo, K= potasio) a lo largo del ciclo del cultivo de chile dulce. Esta curva nos permite determinar los requerimientos nutricionales del cultivo.....	6
Figura 3. Países en los cuales <i>M. incognita</i> está presente. El color rojo indica alta presencia del nematodo.....	8
Figura 4. Ciclo biológico de <i>Meloidogyne</i> sp. ....	10
Figura 5. Invernadero de docencia utilizado para elaboración de ensayo. ....	15
Figura 6. Caracterización del suelo utilizado en el ensayo. ....	16
Figura 7. Parcela de cultivos de anuales de la FESL de donde se recolectó el suelo utilizado. ...	16
Figura 8. Tratamiento del suelo para el experimento. A. autoclavado; B. suelo almacenado en bolsas plásticas; C. llenado de macetas.....	17
Figura 9. Plántulas sembradas y aplicación de primera fertilización.....	18
Figura 10. Proceso de preparación de inóculo. A. Raíces con agallamiento causado por <i>Meloidogyne</i> sp; B. Centrifugado de los huevecillos y juveniles en la solución azucarada; C. Lavado de material recolectado del proceso de centrifuga; D. Suspensión de nematodos extraídos de las raíces .....	19
Figura 11. Inoculación de las plantas de chile dulce con <i>Meloidogyne</i> siete días después del trasplante.....	20
Figura 12. Dilución del oxamyl para realizar la aplicación a las plantas. ....	23
Figura 13. Croquis de la disposición de las macetas con plantas de chile dulce mediante un diseño completamente al azar.....	27
Figura 14. Agallamiento ocasionado por <i>Meloidogyne</i> en plantas de chile dulce. ....	34
Figura 15. Efecto del tratamiento en el control contra <i>M. incognita</i> en plantas de chile dulce bajo condiciones de invernadero.....	35
Figura 16. Gráfico de barras del peso parte aérea frescos y secos con las medias y el error estándar de cada tratamiento.. ....	40
Figura 17. Gráfico de barras del peso de raíz frescos y secos con las medias y el error estándar de cada tratamiento. ....	41
Figura 18. Raíz en fresco del tratamiento OP y OT respectivamente.....	42

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Descripción de los tratamientos establecidos. ....	21
Tabla 2. Resumen de fertilizaciones realizadas a lo largo del ciclo productivo de tomate. ....	22
Tabla 3. Escala visual de agallamiento utilizada en la evaluación del índice de agallamiento en raíces de chile dulce en condiciones de invernadero. ....	25
Tabla 4. Valores promedio y medidas de dispersión del porcentaje de agallamiento (PA) ocasionado por <i>M. incognita</i> en el cultivo de chile dulce, sometido a dos tipos de fertilización; química (C) y orgánica (O) y cuatro tipos de nematicida ( <i>Pseudomonas fluorescens</i> , <i>Bacillus amyloliquefaciens</i> , <i>Streptomyces griseoviridis</i> y Oxamyl). ....	30
Tabla 5. Valores promedio y medidas de dispersión el índice de agallamiento (IA) ocasionado por <i>M. incognita</i> en el cultivo de chile dulce, sometido a dos tipos de fertilización; química (C) y orgánica (O) y cuatro tipos de nematicida ( <i>Pseudomonas fluorescens</i> , <i>Bacillus amyloliquefaciens</i> , <i>Streptomyces griseoviridis</i> y oxamyl).....	32
Tabla 6.Efecto de los tratamientos sobre la producción de frutos en las plantas de chile dulce a los 70 ddt. A= agua; T= oxamyl. ....	35

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Establecimiento del sistema de riego .....	58
Anexo 2. Almacigo de chile dulce trasplantado el 7 de octubre del 2021 .....	58
Anexo 3. Desarrollo de plantas a los 28 ddt con fertilización química vs fertilización orgánica respectivamente.....	59
Anexo 4. Inicios de primera aparición de botones en plantas con fertilización orgánica y retraso en plantas con fertilización química .....	60
Anexo 5. Malformación de fruto en plantas del tratamiento testigo.....	60
Anexo 6. Medidas de resumen de los 9 tratamientos para la variable de peso fresco y seco de la parte foliar. ....	61
Anexo 7. Medidas de resumen de los 9 tratamientos para la variable de peso fresco y seco de la raíz.....	63
Anexo 8. Valores P obtenidos para cada variable de peso fresco y seco de parte foliar y área. ..	64
Anexo 9. Comparaciones realizadas con la prueba de LSD de Fisher para la variable de peso foliar fresco.....	65
Anexo 10. Comparaciones realizadas con la prueba de LSD de Fisher para la variable de peso raíz fresco.....	65
Anexo 11. Comparaciones realizadas con la prueba de LSD de Fisher para la variable de peso raíz seco. ....	66
Anexo 12. Valores de P obtenidos para las interacciones de tipo de fertilizantes.....	66
Anexo 13. Producto lombricomposta utilizado. ....	67
Anexo 14. Frutos primer cosecha realizada a los 70 ddt. ....	67

## 1. INTRODUCCIÓN

El cultivo de chile dulce (*Capsicum annuum* L.) pertenece a la familia de las solanáceas (Solanaceae) y es la principal especie cultivada del género *Capsicum*. Tiene como centro de origen el continente americano, probablemente el sur de Brasil, pero la especie fue domesticada en diferentes regiones de México donde fue cultivada extensamente desde la época precolombina (Ministerio de Agricultura y Ganadería [MAG], 2007). Esta hortaliza es de gran importancia a nivel nacional y mundial, su producción ha crecido en los últimos años la cual se estima en unos 4,5 millones de toneladas (t) de producto seco y 36 millones de t de producto fresco. En el 2019, esta hortaliza tuvo un área cultivada de 3,8 millones de hectáreas (ha), distribuidas en 126 países en todos los continentes (FAO, 2021). El mayor productor mundial es China con 18 millones de t producidas anualmente, seguido de México con 3,5 millones de t (Tripodi y Kumar, 2019).

Esta hortaliza es de importancia por su alto valor nutritivo debido a su gran contenido de vitamina C, así como de vitaminas A y B (Barrantes, 2010). En el caso de Costa Rica, la producción de chile dulce es destinada al mercado nacional e internacional. La producción se desarrolla en el Valle Central, pero se ha ido desplazando a otras zonas del país, que en muchos casos no presentan las condiciones agroclimáticas ideales para el cultivo, por lo que sus costos de producción aumentan (Badilla, 2018).

El nematodo agallador *Meloidogyne* spp. (Chitwood, 1949) es una de las principales plagas que afecta a los cultivos hortícolas incluyendo al cultivo de chile dulce. Este nematodo puede llegar a causar pérdidas en la producción equivalentes a entre \$77 y 125 billones (Abawi y Widmer, 2000; Chitwood, 2003) en diferentes cultivos. Las pérdidas asociadas a este nematodo en el cultivo de chile a nivel mundial corresponden a un 24-28% (Parvatha, 2014). El control de nematodos agalladores en cultivos hortícolas se ha basado en el uso de nematicidas de amplio espectro. Tal es el caso del uso de cloropicrina, 1,3-dicloropropeno y otros plaguicidas que son usados ampliamente para el control de nematodos fitoparásitos a nivel mundial (Calvo y Zapata, 2020).

Actualmente los nematicidas más utilizados en hortalizas son los organofosforados y carbamatos como el oxamyl, que son inhibidores de la acetilcolinesterasa, enzima necesaria en la transmisión de impulsos nerviosos, siendo activo por contacto directo o por ingestión. Sin embargo, cada vez más nematicidas están siendo restringidos en su uso en diversos cultivos debido a su toxicidad o impactos ambientales asociados a su aplicación (Kearn, 2016). Además, estos

nematicidas son considerados nematostáticos, es decir, paralizan a los nematodos, o afectan diferentes aspectos de su comportamiento, pero no los matan, debido a las dosis recomendadas. A menudo estos nematodos paralizados logran recobrar movilidad y probablemente vuelven a ser infectivos (Oka, *et al.*, 2012), por lo que el uso de estas moléculas sintéticas en algunas ocasiones resulta poco eficiente. Así mismo, la efectividad de métodos químicos y físicos para el manejo de esta plaga es limitada, lo cual hace difícil su manejo. Lo anterior, se puede traducir en un aumento de los daños que causan los nematodos en los cultivos.

En Costa Rica, el nematicida oxamyl es el de mayor uso en el cultivo de hortalizas para el control de nematodos agalladores, y en el año 2020 fue clasificado por el Servicio Fitosanitario del Estado (SFE) en la categoría de mayor toxicidad aguda (Banda de color roja) (SFE, 2020).

Actualmente los consumidores evidencian un descontento debido a la presencia de residuos de plaguicidas en las hortalizas; asimismo, se percibe una animadversión de la población contra la aplicación de productos químicos que dañan al ser humano y al ambiente. La preocupación pública por la presencia de residuos de plaguicidas en los productos agrícolas, razones ambientales y problemas de resistencia a plaguicidas por parte de plagas y enfermedades ha intensificado en los últimos años la búsqueda de alternativas de combate de estos problemas fitosanitarios (Calvo, 2011; Zhao, *et al.*, 2021).

Como resultado del contexto anterior, se han desarrollado métodos de combate alternativos, como parte de una estrategia dentro del concepto de manejo integrado de nematodos, para reducir o disminuir los problemas ocasionados por nematodos agalladores en el cultivo de chile. A su vez, estas alternativas permiten disminuir el uso de nematicidas químicos. Sin embargo, las alternativas deben ser evaluadas y validadas para ser posteriormente recomendadas a las personas agricultoras. Por lo tanto, con la presente investigación se evaluó el efecto de bacterias promotoras del crecimiento vegetal en el cultivo de chile como un método para el control de nematodos agalladores, en la procura de dar alternativas ecológicas para disminuir el uso de nematicidas químicos.

## 2. OBJETIVOS

### Objetivo general

Evaluar el efecto de tres bacterias promotoras del crecimiento vegetal (*Bacillus amyloliquefaciens*, *Pseudomonas fluorescens* y *Streptomyces griseoviridis*) y un abono orgánico aplicado al suelo sobre el nematodo agallador (*Meloidogyne* sp.) y su efecto en el desarrollo y producción del cultivo de chile dulce para su implementación en el manejo ecológico de nematodos en condiciones de invernadero.

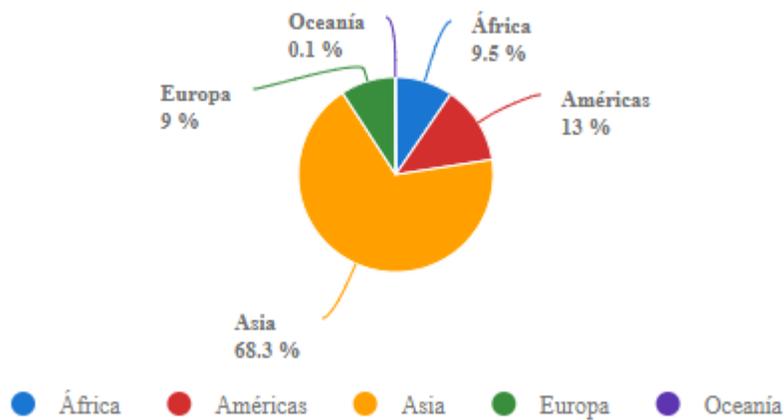
### Objetivos específicos

- Analizar el efecto individual y combinado de la aplicación de abono orgánico y tres bacterias promotoras del crecimiento (*B. amyloliquefaciens*, *P. fluorescens* y *S. griseoviridis*) al suelo sobre el nematodo agallador en el cultivo de chile dulce para el establecimiento de estrategias de manejo alternativo.
- Evaluar el efecto individual y combinado de la aplicación de abono orgánico y tres bacterias promotoras del crecimiento (*B. amyloliquefaciens*, *P. fluorescens* y *S. griseoviridis*) al suelo para el mejoramiento del desarrollo y productividad del cultivo del cultivo de chile dulce.

### 3. MARCO TEÓRICO

#### 3.1 El cultivo de chile dulce

El chile dulce o pimentón pertenece a la familia de las solanáceas y es la principal variedad cultivada del género *Capsicum*, el cual tuvo su origen en el continente americano, probablemente en el sur de Brasil, pero la especie *C. annuum* fue domesticada en México siendo cultivada extensamente desde la época precolombina. Durante los siglos XV y XVI fue llevada a Europa, África y Asia por los colonizadores españoles y portugueses. Actualmente, se cultiva en la mayoría de los países tropicales y subtropicales del mundo (MAG, 2007). En el año 2019 la producción mundial fue de 38.027.164 t, siendo 25.965.986 t producidas en el Continente Asiático, lo que representó así el 68,3% de la producción mundial, seguido del Continente Americano (Figura 1). Los principales países productores en orden de mayor producción corresponden a China, México, Turquía, Indonesia y España (FAO, 2021).



**Figura 1.** Distribución de la producción mundial de chile dulce por continente

**Fuente:** FAO, 2021

### **3.2 Importancia del cultivo de chile dulce en Costa Rica**

En Costa Rica, el chile dulce se ha registrado como la sexta hortaliza más cultivada con un área de 500 ha aproximadamente, con una producción de 8 533 toneladas métricas aproximadamente. Por otra parte, es importante destacar que la producción es desarrollada por pequeños y medianos productores de la región central occidental (Soto y Monge, 2023). Además, los últimos años en Costa Rica se ha observado un aumento en el consumo de chile dulce bajo sistema de invernadero. Utilizar estos tipos de sistema permite brindar un mejor manejo al cultivo, ampliar la superficie de siembra, entre otros beneficios (Elizondo y Monge, 2016).

Estos sistemas se adaptan a la demanda de esta hortaliza en Costa Rica y el mundo, la cual ha venido creciendo; por lo tanto, el aumento se refleja en el precio del chile dulce al presentar tan alta demanda con pocos ofertantes. Por ejemplo, en 2015 hubo un aumento de esta hortaliza del 9,01% en la oferta (Instituto Nacional de Estadística y Censos [INEC], 2015) y para el 2017 se registró un aumento del 50,0% (Madrigal, 2017). Por otra parte, en datos registrados por el INEC en el censo agrícola del año 2014, de las 1085,6 fincas sembradas de chile dulce, se registró un total de 978,5 de fincas cosechadas. En el caso de la provincia de Cartago fue la que mostró valores más altos en ventas locales, a la agroindustria y las realizadas propiamente en cada finca (Instituto Nacional de Estadística y Censos [INEC], 2015).

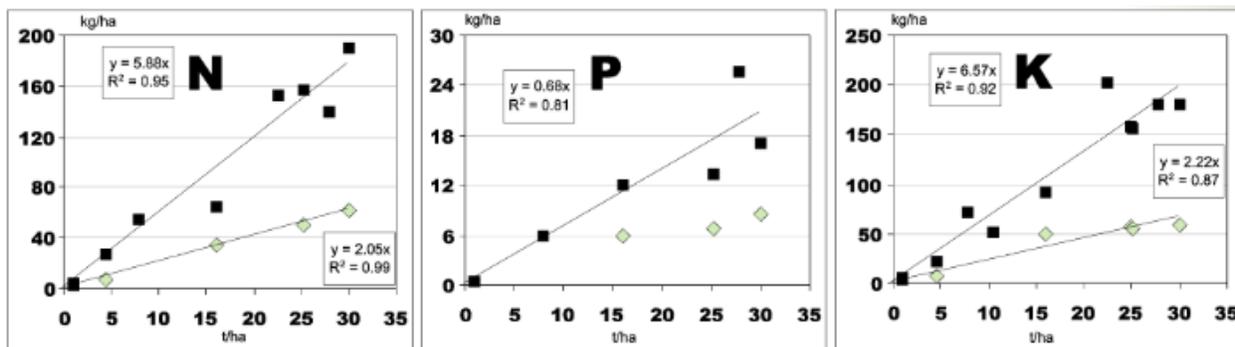
Según INTA, (2018), el consumo per cápita en la dieta costarricense es de 3,5 kg al año. También es considerada como fuente balanceada de la mayoría de los nutrientes esenciales para el ser humano (Ca,P, y Fe) con alto contenido de vitaminas (provitamina A, vitamina B y vitamina C). Por otra parte, al cultivo se le han asociado con la prevención de enfermedades cardiovasculares, arteriosclerosis, cáncer, hemorragias, retraso del proceso de envejecimiento, evita el colesterol, etc (Monge y Loría, 2018).

### **3.3 Requerimientos nutricionales**

Los cultivos hortícolas difieren grandemente en sus requerimientos nutricionales (Balladares, 2002). En el caso del chile dulce, el nutriente que más absorben las plantas es potasio (K), seguido de nitrógeno (N), fósforo (P), calcio (Ca), azufre (S) y finalmente magnesio (Mg). Se

han registrado extracciones de 8,88 g de K por planta, mientras que de Mg se han registrado extracciones de 0,619 g por planta (Azofeifa y Moreira, 2008).

De acuerdo con Berstsch (2009) los requerimientos de elementos minerales para el cultivo de chile dulce son los siguientes:



**Figura 2.** Curva de absorción de nutrientes (N= nitrógeno, P= fosforo, K= potasio) a lo largo del ciclo del cultivo de chile dulce. Esta curva nos permite determinar los requerimientos nutricionales del cultivo.

**Fuente:** Berstsch, 2009

### 3. 4 Requerimientos agroclimáticos

#### 3.4.1 Temperatura

El chile dulce se puede cultivar en zonas donde la temperatura media anual está en el rango de 13 a 24°C. Dentro de este ámbito, las temperaturas altas aumentan la tasa de crecimiento del cultivo y las bajas lo reducen. Las temperaturas necesarias durante la germinación son mayores en comparación con las que requiere en las fases de desarrollo vegetativo y de floración. La mayor fructificación se logra dentro de rangos de temperaturas de 18 a 27 °C durante el día y de 12 a 16°C durante la noche (MAG, 2007).

#### 3.4.2 Humedad relativa

La planta de chile dulce al igual que la mayoría de los vegetales absorbe el agua que necesita por las raíces junto con los nutrientes minerales disueltos. En condiciones normales de

temperatura, la planta se desarrolla bien a una humedad relativa del 50 al 70%. La humedad relativa más elevada, si bien es beneficiosa para el desarrollo de la planta, tiene el inconveniente de favorecer el desarrollo de enfermedades fúngicas que obligan a la realización de los tratamientos fitosanitarios correspondientes (Espinosa, 2010).

### **3.5 El híbrido Nathalie**

El híbrido Nathalie elaborado por la empresa Syngenta, presenta las siguientes características: produce un fruto de maduración verde-rojo, alto rendimiento, una larga vida poscosecha, un alto vigor y una cosecha prolongada. El tiempo de cosecha es de aproximadamente 80-90 días y presenta una alta resistencia a *Phytophthora capsici* Leonian. Según la ficha técnica, hay menor pérdida de plantas, una producción continua de frutos y menor pudrición de frutos (Syngenta, 2022).

### **3.6 Plagas en el cultivo de chile**

Dentro de las principales plagas que afectan el cultivo de chile se encuentran: el picudo de chile (*Anthonomus eugenii* Cano), mosca blanca (*Bemisia tabaci* (Gennadius)), áfidos (*Myzus persicae* (Sulzer)) y *Aphis gossypii* (Glover), gallina ciega (*Phyllophaga* spp.), marchitez (*P. capsici*), nematodos agalladores (*Meloidogyne* spp.) y otra gran cantidad de plagas de las cuales se debe estar atentos para evitar su ataque (Álvarez, 2018).

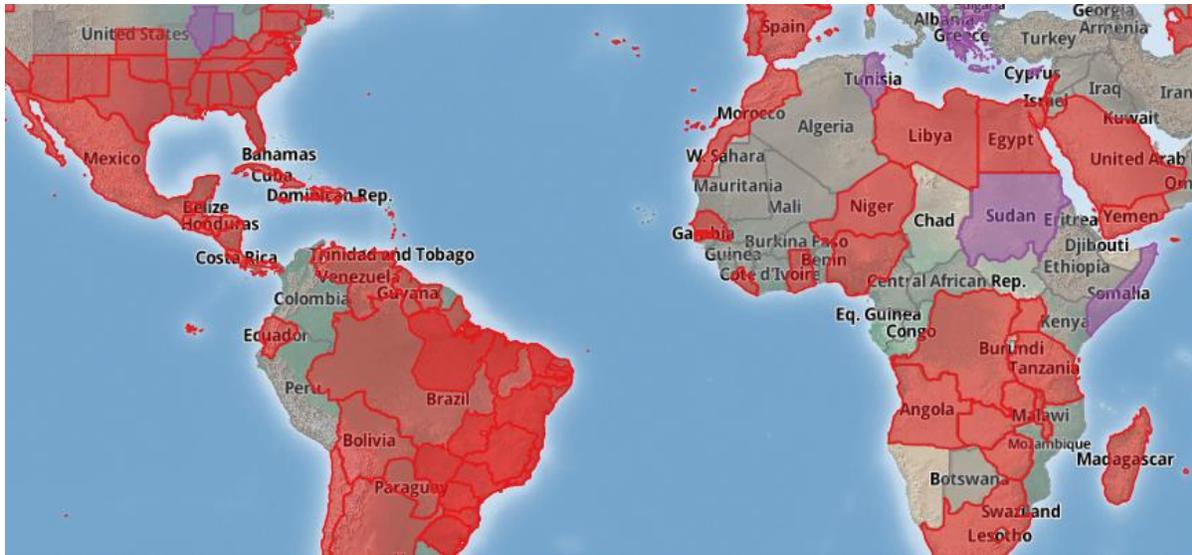
### **3.7 El nematodo agallador *Meloidogyne* sp.**

#### **3.7.1 Importancia económica**

El nematodo agallador (*Meloidogyne* spp.) es considerado como uno de los más importantes en los cultivos hortícolas debido a la afectación que produce en las raíces y su capacidad destructiva sobre muchas especies de plantas (Badilla, 2018). El daño en el sistema radicular de la planta afecta el transporte de agua y nutrientes (Pinheiro, *et al.*, 2020). Por otra parte, a nivel de invernadero se ha logrado evidenciar una disminución severa en el rendimiento debido al ataque de nematodos (Ozarslandan, *et al.*, 2019). Los daños causados por estos

nematodos representan una reducción del 11,0 al 20,0% de la producción a nivel mundial, con pérdidas de 161.000 millones de dólares aproximadamente (Badilla, 2018).

Si bien es cierto el género *Meloidogyne* sp. comprende una gran variedad de especies, la especie que presenta más importancia económica en el cultivo corresponde a *Meloidogyne incognita* (Kofoid & White) Chitwood (Badilla, 2018), presente en todo el mundo (Figura 3).



**Figura 3.** Países en los cuales *M. incognita* está presente. El color rojo indica alta presencia del nematodo.

**Fuente:** CABI, 2021

### 3.7.2 Clasificación taxonómica

Según Bermeo (2015) la clasificación taxonómica de *Meloidogyne* sp. es la siguiente:

Phylum: Nematoda

Clase: Secernentea

Subclase: Diplogasteria

Orden: Tylenchida

Familia: Heteroderidae

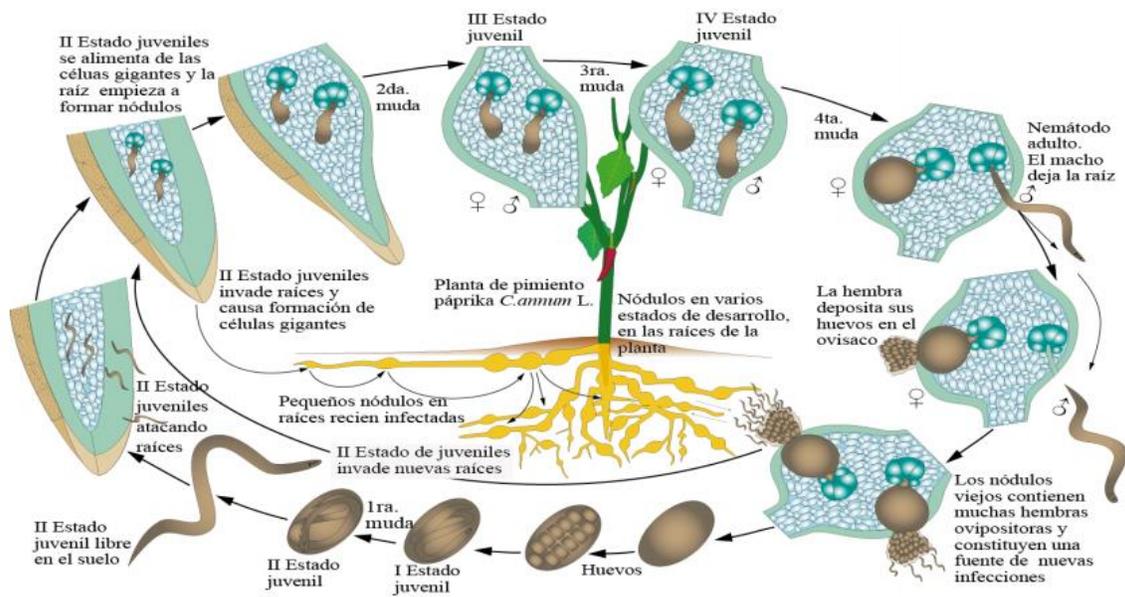
Género: *Meloidogyne*

### 3.7.3 Características morfológicas

Este nematodo presenta un estilete con una punta cónica con una abertura la cual conduce al lumen esofágico adherido a los nódulos. Cerca de la parte posterior de estos nódulos el lumen cuenta con una ramificación corta llamada orificio de la glándula dorsal (Cuadra, 2017). El dimorfismo sexual es evidenciable en las hembras que se caracterizan por tener el cuerpo en forma de pera, sin protuberancia posterior con presencia de un estilete que varía en longitud de 15 a 16  $\mu\text{m}$ . El padrón perineal usualmente con arco dorsal relativamente alto sin retenciones laterales (Machaca, 2017).

### 3.7.4 Ciclo de vida

El ciclo de vida de *Meloidogyne* concluye a los 25 días a una temperatura de 27°C (Machaca, 2017), y comprende: i. un estado de huevo, los cuales son ovipositados por las hembras en un estado de célula simple, estos se encuentran en una masa gelatinosa de glicoproteína llamada comúnmente matriz gelatinosa, que los protege de la deshidratación y una falsa envoltura como membrana del huevo, y ii. cuatro estados juveniles, en el primer estado la larva puede ser móvil en el huevo, cuando la larva emerge se conoce como juvenil 2 ( $J_2$ ), siendo este el estado infeccioso donde las larvas buscan una raíz de la cual alimentarse y finalmente, iii. un estado adulto (Bermeo, 2015) (Figura 4).



**Figura 4.** Ciclo biológico de *Meloidogyne* sp.

**Fuente:** Bermeo, 2015

### 3.7.5 Síntomas

El principal síntoma observado en las plantas afectadas por esta plaga son las agallas que dificultan la absorción y translocación de agua y nutrientes en el sistema radicular lo que finalmente se traduce en un marchitamiento, ya que estas agallas Al afectar la absorción de nutrientes, provoca una limitación en la productividad (Pinheiro, *et al.*, 2020). Por otra parte, a nivel de invernadero se ha logrado evidenciar una disminución severa en el rendimiento de producción debido al ataque de estos nematodos (Ozarslandan, *et al.*, 2019) y cuando las infestaciones son severas las plantas pueden tornarse de un color amarillento (Camues, 2019).

### 3.7.6 Manejo de *Meloidogyne* sp.

Un manejo adecuado de este nematodo debe estar enfocado en los principios de un manejo integrado de plagas (MIP), donde son de suma importancia la combinación del manejo cultural, biológico y en el último caso, químico (Badilla, 2018). Para el control alternativo de este nematodo se ha estudiado el uso de microorganismos antagonistas los cuales tiene un efecto directo sobre

este fitoparásito. Para lograr un control eficiente, estos deben ser atacados en sus etapas más vulnerables las cuales corresponden a la etapa de huevo y las etapas juveniles (J<sub>2</sub>) (Xiang, *et al.*, 2018). También se ha reportado la utilización de ácidos húmicos los cuales inhiben la eclosión de los huevos en un 50 - 100% y también presentan un efecto detrimental sobre los J<sub>2</sub> (Seenivasan & Senthilnathan, 2018).

#### 3.7.6.1 Métodos culturales

Entre las prácticas culturales implementadas para el control de nematodos fitoparásitos, se encuentra la rotación de cultivos, aunque en algunos casos es difícil ya que, en el caso de *M. incognita* cuenta con más de 1.000 especies de plantas reportadas como hospedantes. La práctica de barbecho es otra práctica cultural la cual consiste en dejar el suelo sin cultivar por un cierto periodo de tiempo. Se utilizan también los cultivos trampa cuyo principio es atraer a los nematodos fitoparásitos (Lezaun, 2016); por ejemplo, el cultivo de la lechuga ya que, el nematodo infecta la raíz, pero no logra reproducirse (Sorribas, *et al.*, 2006). Se ha logrado observar este comportamiento en las familias de las brassicaceas (Ros, *et al.*, 201), por lo tanto, se han demostrado resultados positivos con la práctica mencionada (Cuadra, 2000).

#### 3.7.6.2 Combate químico de *Meloidogyne* sp.

En Costa Rica los nematicidas químicos más utilizados según encuestas realizadas corresponden a: fenamifos, oxamyl y forato, los cuales se aplican durante las distintas etapas de crecimiento (Badilla, 2018). Además del uso de otros ingredientes activos como el carbamato, el cual se ha evidenciado que es el más utilizado para el control específico del género *Meloidogyne* sp..

Esta información evidencia el número limitado de ingredientes activos para el manejo de esta plaga, lo cual propicia la mala práctica agrícola de utilizar otros ingredientes activos no autorizados ya sea para el control de este nematodo o no autorizados en el cultivo de chile dulce (Acosta, *et al.*, 2016). Además del problema de resistencia, en Costa Rica se presentan casos de envenenamiento e intoxicación en humanos por los carbamatos (Saborío, *et al.*, 2019), lo que constituye otro problema vinculado al uso de estas sustancias biocidas.

### 3.7.6.3 Combate biológico

Una de las mejores alternativas para el combate de nematodos fitoparásitos, de manera que no afecte el ecosistema ni la salud humana, corresponde al control biológico (Delgado, 2010). Ante la necesidad de buscar alternativas para el combate de nematodos, y disminuir el uso de nematicidas que en muchas ocasiones se retiran del mercado por razones toxicológicas, o bien porque las plagas llegan a presentar resistencia. Entre estos agentes de control biológico se puede identificar el uso de hongos antagonistas, hongos nematófagos, los cuales incluyen más de 200 especies y los cuales se encuentran ampliamente distribuidos en los suelos de Costa Rica (Peraza, *et al.*, 2014).

## 3.8 Bacterias promotoras del crecimiento vegetal

El deterioro ambiental durante los últimos años ha sido constante y se ha agravado como resultado de actividades del ser humano que no han sido reguladas, como el uso de agroquímicos de una forma no controlada. Para amortiguar estos efectos, se ha promovido el uso de agentes biológicos como las bacterias para hacer frente a los problemas sanitarios de los cultivos (Bashan, *et al.*, 2012). Además, las bacterias promueven el crecimiento de las plantas ya que facilitan la obtención de nutrientes como nitrógeno, fósforo y hierro (Gamalero & Glick, 2011).

### 3.8.1 Generalidades de las bacterias promotoras del crecimiento vegetal

En el suelo habitan millones de microorganismos, los cuales juegan un papel muy importante en el ciclo global de nutrientes. La salud del suelo y los nutrientes que este posee dependen de la estructura y composición del microbioma del suelo. A su vez, los microorganismos son responsables de regular el metabolismo y la señalización de las plantas mediante la producción de sustancias metabólicas (Fuke, *et al.*, 2021).

Entre los microorganismos, las bacterias pueden tener tres efectos sobre las plantas, estos efectos pueden ser, beneficiosos, dañinos o neutros. Las bacterias benéficas llamadas también bacterias promotoras del crecimiento vegetal participan en una serie de mecanismos directos como,

facilitar la adquisición de nutrientes que para las plantas son difíciles de obtener del suelo. Hay bacterias capaces de fijar el nitrógeno y después disponer de este para las plantas (Benjumeda, 2017). También existen otras capaces de solubilizar el fósforo, ya que este si bien es cierto, se encuentra en altas cantidades en el suelo, la gran mayoría no es asimilable por las plantas (Sánchez, *et al.*, 2012). También pueden suministrar hierro, el cual es quelatizado para formar sideróforos, que son fácilmente absorbidos por las plantas. En algunos casos, estos sideróforos ayudan a aliviar el estrés a causa de contaminación por metales pesados (Aguado, *et al.*, 2012). También modulan los niveles de fitohormonas, producción de citoquininas y giberelinas, entre otros beneficios (Glick, 2012).

La bacteria *P. fluorescens* es una especie no patógena que se encuentra frecuentemente en el suelo y asociada a las plantas (Noureldeen, *et al.*, 2021). Tiene la capacidad de mejorar el grosor de los tallos en plantas y aumentar el área foliar de las hojas. Se ha logrado determinar su efecto como controlador de nematodos y ha mostrado ser eficaz para controlar enfermedades foliares y de raíces. Esta bacteria es capaz de producir catalasa y oxidasa, además de amoníaco a partir de la arginina, y puede utilizar citrato como única fuente de carbono (Avilez, 2021).

Otra bacteria promotora del crecimiento vegetal es *Bacillus amyloliquefaciens*, la cual está presente libremente en el suelo y en algunas plantas y tiene capacidad de inhibir el crecimiento de diferentes microorganismos fitopatógenos, incluyendo nematodos, debido a la producción de metabolitos secundarios (Chowdhury, *et al.*, 2015; Zhao, *et al.*, 2021). *B. amyloliquefaciens* es una bacteria aeróbica, ubicua, formadora de endosporas y Gram positiva, puede ser aislada de la rizosfera en cultivos de chile y tomate. Tiene capacidad de secretar grandes cantidades de amilasa al igual que *B. subtilis*, debido a esto es que por mucho tiempo se consideraban la misma especie, pero son distintas genética y fisiológicamente (Bones, 2021). *B. amyloliquefaciens* también se está utilizando como biofertilizante (Corrales, *et al.*, 2017).

Dentro del género *Streptomyces* sobresale la especie *S. griseoviridis* capaz de reducir el porcentaje de germinación de hongos fitopatógenos como *Sclerotinia* (Shrestha, *et al.*, 2019). Por otra parte, la inoculación de esta bacteria también ha demostrado disminución en el ataque de patógenos como *Botrytis cinerea* Pers. (Tapio & Pohto, 1991).

### 3.8.2 Bacterias promotoras del crecimiento vegetal y su efecto sobre nematodos fitoparásitos

Se han identificado los géneros *Azotobacter*, *Bacillus*, *Serratia* y *Pseudomonas* como promotores de crecimiento y a su vez controladores de nematodos fitoparásitos (Rostami, *et al.*, 2021). La bacteria *Bacillus thuringiensis* es la bacteria más utilizada como agente de control microbiano, esta se logra encontrar en más del 90% del mercado de los bioinsecticidas. La primera vez que se logró determinar el efecto del nematocida a base de *B. thuringiensis* fue por Meadows y otros autores en el año 1990. En el año 1993, Zuckerman y otros autores utilizaron la bacteria en semillas, plantas y suelos, y se logró observar un efecto detrimental sobre el nematodo *M. javanica* Treub y *Tylenchulus semipenetrans* Coob (Márquez y Fernández, 2006).

La bacteria *Streptomyces* sp., además de antagonizar al nematodo *Meloidogyne* spp., promueve aumentos en el porcentaje de germinación, longitud de raíz, entre otros parámetros medidos en el cultivo de tomate (Sharma, *et al.*, 2020).

## 4. METODOLOGÍA

### 4.1 Localización del estudio

Esta investigación se realizó en el invernadero de docencia de la Finca Experimental Santa Lucía (FESL), de la Universidad Nacional (UNA), ubicada en Santa Lucía de Barva, Heredia (Figura 5). Este sitio se encuentra entre las coordenadas 10.022246 latitud norte y -84.112144 longitud oeste, a una altitud de 1.200 msnm. Presenta una precipitación promedio anual de 2403.5 mm, con una temperatura promedio anual de 20.2°C, una humedad relativa de 75.0% y una velocidad del viento de 15.5 km·h<sup>-1</sup>(Instituto Meteorológico Nacional [IMN], 2021).



**Figura 5.** Invernadero de docencia donde se instaló el ensayo.

**Fuente:** Valverde, 2021.

#### **4.5 Recolección, tratamiento y caracterización de suelo**

El suelo utilizado se recolectó de la parcela de cultivos anuales de la FESL (Figura 6). Este suelo pertenece al orden Andisol, de origen volcánico. Se recolectaron 400 kg de suelo a una profundidad de 20 cm para el experimento. Además, se tomaron dos muestras representativas de 500 g cada una para realizar la caracterización química respectiva, las cuales fueron enviadas al laboratorio de suelos del Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA) (Marín, *et al.*, 2017).



**Figura 6.** Parcela de cultivos de anuales de la FESL de donde se recolectó el suelo utilizado en el ensayo.

**Fuente:** INTA, 2021.

El suelo utilizado presentó las siguientes características mostradas en la figura 7. Las características estándar de un suelo Andisol son pH 5.5%, materia orgánica (MO) 20.0%, nitrógeno (N) 26.0%, fósforo (P) 500 ppm, potasio (K) 0.27 meq 100·ml<sup>-1</sup>, calcio (Ca) 8 meq 100·ml<sup>-1</sup>, magnesio (Mg) 1.40 meq 100·ml<sup>-1</sup>. Con respecto a las proporciones de los componentes de textura presenta arena, arcilla y limo de 30.37 y 33.0%, respectivamente (Cabanilla, *et al.*, 2021). Las características del suelo utilizado coinciden parcialmente con las de un Andisol estándar.

Identificación en campo	pH H <sub>2</sub> O	Cmol(+) / L				Mg / L					% de saturación	% MO
		K**	Ca	Mg	Acidez	P	He	Cu	Zn	Mn	Acidez	
Niveles críticos medios	5.6-6.5	0.2-0.6	4-20	1-5	0.5-1.5	10-20	10-100	2-20	2-10	5-50	10-50	3-8
01 Ana Victoria Valverde Juárez	5.9	0.69	7.4	0.5	0.3	4	89	5	4.8	10	3	10.93

**Figura 7.** Caracterización del suelo utilizado en el ensayo.

**Fuente:** Valverde, 2021.

Los 400 kg de suelo se tamizaron y colocaron en bolsas limpias para ser transportados al Laboratorio de Fitopatología de la Universidad Nacional y se realizó el autoclavado. El suelo se sometió a un proceso de doble esterilización en autoclave (Figura 8) a una temperatura de 121 °C

y una presión de 15 psi, durante 20 minutos. Este proceso garantizó la eliminación de cualquier otro microorganismo que interfiriera con el ensayo. El suelo esterilizado se almacenó en bolsas plásticas nuevas para evitar cualquier contaminación, hasta su uso. En el invernadero de la FESL se procedió a depositar 8.0 kg de suelo en macetas No. 1200 (Figura 8), cada maceta se humedeció hasta llegar a su capacidad de campo 24 horas antes de la siembra.



**Figura 8.** Tratamiento del suelo para el experimento. A. Autoclavado; B. Suelo almacenado en bolsas plásticas; C. Llenado de macetas.

**Fuente:** Valverde, 2021.

#### 4.2 Material vegetal y siembra

El híbrido del cultivo de chile dulce utilizado fue el Nathalie, este material vegetal presenta altos valores de rendimiento, además, los frutos tienen una larga vida post cosecha. Por otra parte, la planta al estar desarrollada completamente presenta una alta vigorosidad y rusticidad. Otro de los factores importantes a destacar de este híbrido, es la resistencia que presenta a *P. capsici*.

El almácigo se adquirió de la empresa Coopebrisas ubicada en Zarcero, Alajuela. Se realizó la compra de una bandeja la cual contaba con un aproximado de 220 plántulas, las plántulas se trasplantaron cuando presentaron cuatro hojas verdaderas, según la información brindada por la casa comercial. Para esto, se realizó un hoyo de 5.0 cm de profundidad en el centro de cada maceta para sembrar la plántula de chile dulce (Figura 9).



**Figura 9.** Plántulas sembradas y aplicación de primera fertilización.

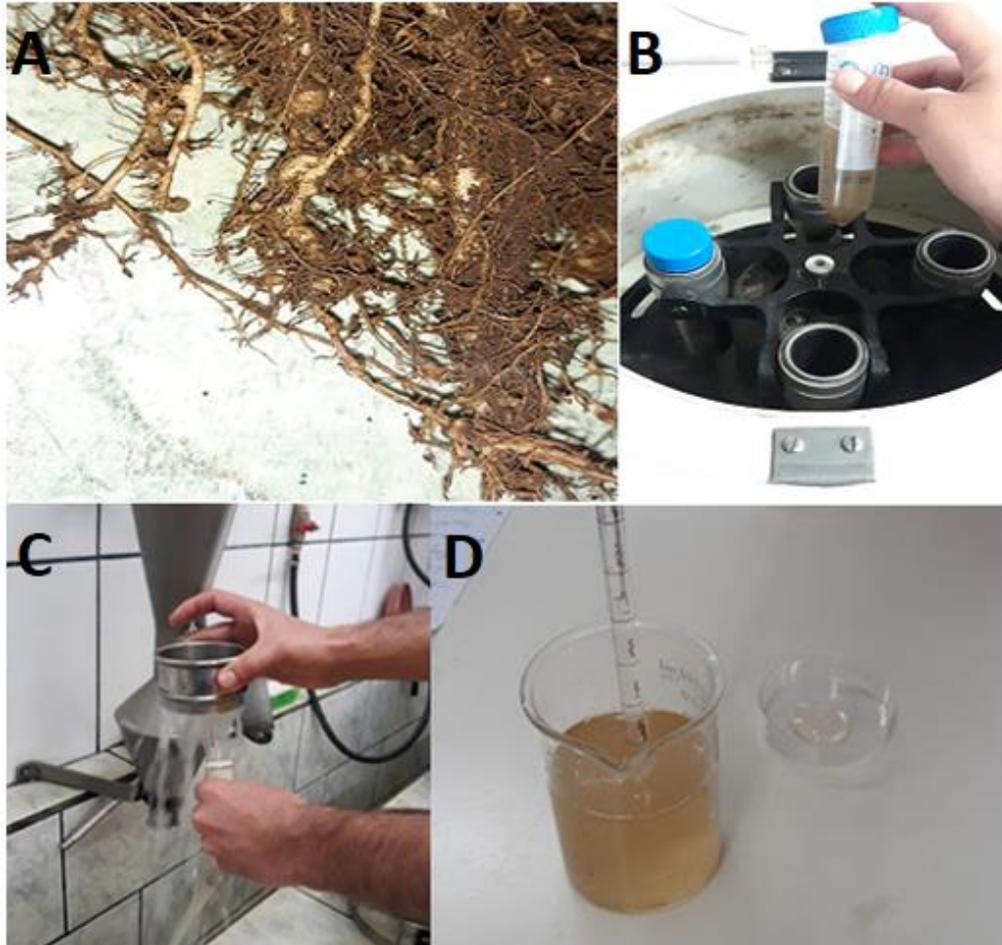
**Fuente:** Valverde, 2021.

#### **4.6. Preparación de inóculo de *Meloidogyne* e inoculación de plantas**

El inóculo de *Meloidogyne* sp. para el ensayo se obtuvo en una finca localizada en la zona hortícola de Tapezco, Zarcero. En la finca se realizaron 2 muestreos en dos lotes diferentes (uno con más antigüedad que el otro), en los cuales se identificaron plantas que presentaban síntomas de marchitamiento y poco crecimiento en una plantación comercial de Chile. Las plantas con estas características se extrajeron para verificar el agallamiento causado por nematodos. Las plantas agalladas fueron transportadas en bolsas plásticas en una hielera para realizar la extracción de huevos y juveniles en el Laboratorio de Nematología de la Escuela de Ciencias Agrarias.

Las raíces recolectadas se lavaron en el chorro de agua y se cortaron en trozos más pequeños (tamaños de 1.0-2.0 cm) (Figura 10). Para la extracción de los nematodos se utilizaron en total 160 g de raíces, previamente desinfectada con hipoclorito de sodio (0.5%) que se agitaron por 3,0 minutos en dicha solución (Soto, 2016). Posteriormente se licuaron por 30 segundos para liberar los huevecillos y juveniles de las agallas, el resultado del procedimiento de licuado se pasó por una serie de tamices de 100 y 400 mallas. Posteriormente el material retenido en el tamiz de 400 mallas se recolectó en un tubo de 50 ml para realizar el proceso de centrifugación, el mismo consistió en colocar la muestra por 3.0 minutos a 3.000 revoluciones por minuto (rpm),

posteriormente la solución sobrenadante fue decantada y al precipitado se le agregó una solución azucarada de gravedad específica (1,18) y se centrifugó nuevamente por un minuto. Posterior a la segunda centrifugada, el sobrenadante se decantó en un tamiz de 500 mallas y se realizaron lavados para eliminar el exceso de la solución azucarada, finalmente, se recolectó el material del tamiz en un beaker de 80.0 ml.



**Figura 10.** Proceso de preparación de inóculo. A. Raíces con agallamiento causado por *Meloidogyne* sp. B. Centrifugado de los huevecillos y juveniles en la solución azucarada. C. Lavado de material recolectado del proceso de centrifugación. D. Suspensión de nematodos extraídos de las raíces

**Fuente:** Valverde, 2021.

De la suspensión de nematodos extraídos de las raíces, se tomaron 10 alícuotas de 5.0 ml para realizar conteos de nematodos. Se calcularon los promedios de los conteos y se determinó agregar una suspensión de 3.8 ml por planta para inocular 2.000 unidades de inóculo (Zhao, *et al.*, 2018), es decir, 2.000 huevos y/o juveniles de *Meloidogyne* sp. La inoculación se realizó siete días después del trasplante (ddt) en la zona radicular de las plantas de chile dulce (aproximadamente a un cm del tallo) (Figura 11).



**Figura 11.** Inoculación de huevos y/o juveniles de *Meloidogyne* sp. en las plantas de chile dulce siete días después del trasplante.

**Fuente:** Valverde, 2021.

### 4.3 Tratamientos evaluados

En el ensayo se evaluaron dos tipos de fertilización: comercial y orgánica, y tres productos biológicos (bacterias promotoras del crecimiento) para el manejo de *Meloidogyne* sp.: *P. fluorescens*, *B. amyloliquefaciens* y *S. griseoviridis*. En el ensayo se incorporó un control positivo constituido por el nematicida comercial oxamyl y un control negativo, que consistió en agua. En total se establecieron nueve tratamientos con cuatro repeticiones por tratamiento, lo que

correspondió a cuatro macetas por cada tratamiento, con un total de 36 unidades experimentales (Tabla 1).

**Tabla 1.** Descripción de los tratamientos establecidos.

<b>Tratamientos</b>	<b>Código</b>	<b>No. de repeticiones</b>
1. Fertilización química + testigo comercial (oxamyl)	CT	4
2. Fertilización química + <i>P. fluorescens</i>	CP	4
3. Fertilización química + <i>B. amyloliquefaciens</i>	CB	4
4. Fertilización química + <i>S. griseoviridis</i>	CS	4
5. Fertilización química + Agua	CA	4
6. Fertilización orgánica + testigo comercial (oxamyl)	OT	4
7. Fertilización orgánica + <i>P. fluorescens</i>	OP	4
8. Fertilización orgánica + <i>B. amyloliquefaciens</i>	OB	4
9. Fertilización orgánica + <i>S. griseoviridis</i>	OS	4
<b>Total:</b>		<b>36</b>

## 4.7 Aplicación de los tratamientos

### Fertilización

La fertilización del cultivo de chile dulce fue distinta en cada etapa fenológica ya que las plantas crecen y elaboran su biomasa a partir de nutrientes que absorben, el dióxido de carbono y la energía solar. Se realizaron cuatro fertilizaciones en total; una fertilización química inicial basada en la formulación citada por Azofeifa y Morera (2020). Para la fertilización orgánica se siguió las indicaciones de Canizales, *et al.* (2005).

Al realizar el trasplante de las plántulas, se realizó un hoyo de 20.0 cm al cual se agregó el fertilizante químico y la lombricomposta (Anexo 13) según lo indicado en el diseño estadístico. Se colocaron 20.0 g de fórmula 10-30-10 y posteriormente se colocó la plántula. Se realizó el mismo procedimiento para la fertilización orgánica, del cual se colocaron 120 g al hoyo previo al trasplante. Al haber transcurrido 15 ddt, se realizó la segunda fertilización química y orgánica la cual correspondió a 20.0 g de 10-30-10 junto con 5 g de 18-5-15-6-2 y 125.0 g de lombricomposta respectivamente. La tercera fertilización química y orgánica se realizaron a los 30 días después de la segunda fertilización y las cantidades utilizadas fueron la siguientes: 2,5 g de nitrato de amonio ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) junto con 2,5 g de la fórmula 18-5-15-6-2 y 130.0 g de lombricomposta. Finalmente, la cuarta fertilización se realizó a los 45 días después de la última fertilización, las cantidades aplicadas fueron 5.0 g de  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  junto con 2.5 g de la fórmula 18-5-15-6-2 y 140.0 g de lombricomposta respectivamente para los tratamientos químico y orgánico. En la tabla 2 se resumen las fertilizaciones realizadas con sus respectivas cantidades y días de aplicación.

**Tabla 2.** Resumen de fertilizaciones realizadas a lo largo del ciclo productivo de chile dulce.

Fertilización n	Tiempo de aplicación	Cantidades usadas	
		Químico	Orgánico
1	Al realizar el trasplante	• 20 g de fórmula 10-30-10	• 120 g de lombricomposta
2	15 días después del trasplante	• 20 g fórmula 10-30-10 • 5 g de fórmula 18-5-15-6-2	• 125 g de lombricomposta
3	30 días después de la	• 2,5 g de nitrato de amonio	• 130 g de lombricomposta

	última fertilización	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2,5 g de la fórmula 18-5-15-6-2</li> </ul>	
4	45 días después de la última fertilización	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 5,0 g de nitrato de amonio</li> <li>• 2,5 de la fórmula 18-5-15-6</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 140 g de lombricomposta</li> </ul>

### Productos nematicidas

Las bacterias se inocularon mediante una suspensión de 15.0 ml de la concentración comercial ( $2\text{-}5\text{ L}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) de las bacterias promotoras del crecimiento vegetal obtenidas de laboratorios comerciales dedicados a la venta de bioinsumos. Para la inoculación se realizó un hoyo a unos centímetros de la raíz, donde fue aplicada la suspensión bacteriana en cada maceta, posteriormente el hoyo fue cubierto con suelo. El oxamyl se preparó a la dosis recomendada por el fabricante ( $2\text{-}5\text{ L}\cdot\text{ha}^{-1}$ ). Tanto las bacterias como el nematicida químico se aplicaron cinco días después de la inoculación de *Meloidogyne* sp. de acuerdo con lo recomendado por Oka, *et al.* (2012) (Figura 12).



**Figura 12.** Dilución del oxamyl para realizar la aplicación a las plantas.

**Fuente:** Valverde, 2021.

## Riego

Para proporcionar el riego necesario a las plantas se implementó un sistema de riego por goteo tipo araña, con un temporizador digital para riego (Timer) marca Melnor. Para determinar la frecuencia e intensidad del sistema de riego se tomaron en cuenta factores como: cálculo de lámina neta, evapotranspiración del cultivo, frecuencia de riego, tiempo de riego, caudal disponible, etc. (Chavarría, 2020). Estudios previos indicaron que el riego aplicado por ocho minutos tres veces al día era suficiente para el cultivo de chile dulce (Chavarría, 2013).

### 4.9 Variables evaluadas

#### 4.9.1 Porcentaje de agallamiento

El porcentaje de agallamiento en las raíces de las plantas de chile se determinó 90 ddt, realizando un muestreo destructivo de cada unidad experimental. Cuidadosamente y con ayuda de un palín se extrajeron todas las plantas de cada uno de los tratamientos y se determinó el porcentaje de agallamiento en los sistemas radicales mediante la siguiente fórmula utilizada por Zhao, *et al.* (2021) y Calvo (2017):

$$PA = \left( \frac{NRA}{TR} \right) * 100$$

Dónde:

PA= Porcentaje de agallamiento

NRA= Número de raíces agalladas.

TR= Total de raíces en la planta.

#### 4.9.2 Índice de agallamiento

El índice de agallamiento se obtuvo utilizando la escala visual de cinco grados empleada por Zhao, *et al.* (2021). Esta escala posee valores de cero a cinco, donde el cero corresponde a un

sistema radical sin presencia de agallas (0%) y cinco el máximo agallamiento alcanzado (100%) quedando entre estos extremos los demás valores del índice con porcentajes de agallamiento intermedio (Tabla 3).

**Tabla 3.** Escala visual de agallamiento utilizada en la evaluación del índice de agallamiento en raíces de chile dulce en condiciones de invernadero.

Escala	Porcentaje de agallamiento
0	0 % de agallas (raíz sana)
1	1-15% de agallas
2	16-25% de agallas
3	26-50% de agallas
4	51-75% de agallas
5	76-100% de agallas

#### 4.9.3 Eficacia de los productos sobre *Meloidogyne* sp.

Usando los datos de porcentaje de agallamiento, se calculó la efectividad biológica de los tratamientos para el manejo de *Meloidogyne* sp. mediante la siguiente fórmula empleada por Zhao, *et al.* (2021); Calvo y Zapata (2020):

$$ET = \frac{ST - st}{ST} * 100$$

Dónde:

ET= Eficacia del tratamiento.

ST= Porcentaje de infección o agallamiento en el control.

st= Porcentaje de infección o agallamiento en los tratamientos nematicidas.

#### 4.9.4 Variables para determinar el desarrollo de la planta

Las variables que se mencionan a continuación fueron evaluadas a los 90 días ddt (tres meses) con excepción de producción y peso de frutos.

- **Producción y peso de frutos:** se tomaron los datos de cantidad y peso de frutos por tratamiento, desde el inicio de la fructificación (70 ddt).
- **Peso fresco de raíz y parte aérea:** Los sistemas radicales de las cuatro plantas por tratamiento se separaron manualmente. Las raíces fueron lavadas con agua corriente, escurridas y pesadas de manera individual con una balanza mecánica, al igual que las partes aéreas.
- **Peso seco de la raíz y parte aérea:** El sistema radical lavado y la parte aérea de las plantas se sometieron a un proceso de secado en una estufa a una temperatura de 60°C por un lapso de 72 horas. Posterior al secado, se pesaron nuevamente las raíces y partes aéreas de las plantas muestreadas.

#### 4.10 Diseño experimental

La unidad observacional correspondió a la misma que la unidad experimental, que estuvo conformada por una maceta de 8,0 L con 2.000 unidades de inóculo (huevos + J<sub>2</sub>) de *Meloidogyne* sp. y una planta de chile dulce del híbrido Nathalie.

En cuanto a la estructura del experimento fue bifactorial, el primer factor fue la fertilización con dos niveles: fertilización química y orgánica. El segundo factor fue el tipo de nematicida con cinco niveles: tres bacterias promotoras del crecimiento con efecto nematicida, un nematicida químico comercial y un testigo absoluto sin aplicación de sustancia nematicida (agua). En total se establecieron 9 tratamientos con cuatro repeticiones para un total de 36 unidades experimentales y en cuanto a la estructura de la parcela se estableció bajo un diseño completamente al azar (Figura 13; Tabla 1).

CB4 	OS4 	CS4 	CT1 	OB4 	CA3 	OS3 	OP4 	CP2 
OP3 	CA1 	CB2 	CP1 	CT3 	OT1 	CA4 	OT3 	CT2 
OB3 	CT4 	CP4 	CS3 	OT2 	CB2 	CP4 	OS1 	OB2 
CB1 	CS1 	OB1 	CA2 	OS2 	OP2 	CS2 	OT4 	OP1 

**Figura 13.** Croquis de la disposición de las macetas con plantas de chile dulce mediante un diseño completamente al azar. C= fertilización comercial; O= fertilización orgánica; P= *P. fluorecens*; B= *B. amyloliquefaciens*; S= *S. griseoviridis*; A= agua; T= oxamyl.

**Fuente:** Valverde, 2021.

#### 4.11 Análisis estadístico

Para determinar el efecto de los tratamientos sobre las variables de respuesta determinadas (porcentaje de agallamiento, índice de agallamiento, peso fresco y seco de la parte aérea de la planta, peso fresco y seco de la raíz, cantidad y peso de frutos), se realizó un análisis de varianza (ANOVA). El modelo lineal para el experimento bifactorial fue el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \gamma_j + \delta_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

$$\text{con: } i = 1 \dots 9, j = 1 \dots 5, k = 1 \dots 4$$

Donde:

$Y_{ijk}$ : variable de respuesta del i-ésimo factor de fertilización, j-ésimo factor de producto nematocida y la k-ésima repetición.

$\mu$ : media general

$\alpha_i$ : efecto de la i-ésimo factor de fertilización.

$\gamma_j$ : efecto de la j-ésimo factor de producto nematocida

$\delta_{ij}$  efecto adicional (interacción) para la combinación de los niveles  $i$  del factor de fertilización y  $j$  factor de producto.

$\varepsilon_{ijk}$ : término de error que se distribuye normal independiente con media cero y varianza constante.

Previo al análisis estadístico se comprobaron los supuestos del ANOVA con gráficos diagnósticos (cuantiles de los términos de error, gráficos de residuos y gráficos de residuos vs. predichos) y se escogió el mejor modelo en función de los criterios de Akaike (AIC) y de información Bayesiano (BIC). En las variables donde existieron diferencias estadísticas entre los tratamientos, se realizaron las comparaciones de medias por medio de la prueba de Prueba de Di Rienzo, Guzmán y Casanoves (DGC) ( $p \leq 0,05$ ) permitiendo la formación de grupos excluyentes y no transición entre tratamientos. Para realizar lo anterior se utilizó el software estadístico Infostat.

Para la variable eficacia de los productos nematocidas se realizaron promedios de los resultados para su respectivo análisis descriptivo.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1 Porcentaje de agallamiento

El porcentaje de agallamiento (PA) fue estadísticamente influenciado por los dos factores; tipo de fertilización ( $p = 0.01$ ) y tipo de nematocida ( $p = 0.001$ ), además se presentó una interacción significativa de estos factores ( $p = 0.001$ ). En el caso del tipo de fertilizante se registró un PA promedio de 34.15% para las plantas fertilizadas con abono orgánico contra un 22.90% para las plantas fertilizadas con abono químico. En contra parte, en otros estudios realizados se evidenció una reducción en la afectación a causa de *Meloidogyne* sp. mediante el uso de lombricomposta, teniendo esta un efecto positivo en la reducción de agallas y masa de huevos presentes en la raíz (hasta 82.50% menos). Adicionalmente, se constató que hubo una mejora de los atributos de crecimiento de plantas de chile dulce en términos de longitud de los brotes (18.50%) y peso fresco total de la planta (32.80 %) (Khairy, *et al.*, 2020).

En el caso del tipo de nematicida, las comparaciones entre pares de medias evidenciaron diferencias significativas en todos los casos, excepto al comparar el PA de testigo químico vs. *B. amyloliquefaciens* ( $p = 0.148$ ) y *P. fluorescens* vs. *S. griseoviridis* ( $p = 0.409$ ). Con base en el tipo de nematicida, el máximo PA promedio se registró en el testigo al cual se aplicó agua destilada (71,25%). El mínimo PA promedio se registró en el tratamiento fertilización química  $\times$  *B. amyloliquefaciens* con 11.50% seguido de las plantas del tratamiento fertilización orgánica  $\times$  *P. fluorescens*, la cuales tuvieron un porcentaje de PA de 15.75%, manteniendo valores muy por debajo en comparación con el porcentaje obtenido en el tratamiento testigo.

En cuanto a la interacción fertilizante  $\times$  tipo de nematicida, los análisis evidenciaron que el tipo de fertilizante solamente influyó en el tipo de nematicida cuando este era de naturaleza biológica; es decir, al aplicar *P. fluorescens* ( $p = 0.043$ ), *B. amyloliquefaciens* ( $p = 0.032$ ) o *S. griseoviridis* ( $p = 0.028$ ). Este comportamiento no fue observado en todos los tratamientos con fertilización química, donde no se presentaron diferencias significativas, con excepción del tratamiento fertilización química  $\times$  *B. amyloliquefaciens* el cual presentó un valor de  $p = 0.05$ . Los resultados del presente ensayo sugieren que la presencia de abono orgánico brinda condiciones favorables para que los nematicidas biológicos actúen de manera diferencial; lo que se tradujo en valores variables de PA. Este fenómeno ha sido previamente informado; por ejemplo, Khairy, *et al.* (2020) encontraron PA más bajos en los tratamientos fertilizados con abono orgánico, indistintamente del tipo de nematicida biológico utilizado. Considerando los dos factores evaluados, el PA promedio más bajo se observó en el tratamiento fertilización química  $\times$  *B. amyloliquefaciens* con un PA = 11.5, seguido del tratamiento fertilización orgánica  $\times$  *P. fluorescens* con 15.75%, y fertilización química  $\times$  nematicida químico con 20.7%. Entre estos tres tratamientos no se presentaron diferencias significativas. El PA más alto se reportó en el tratamiento fertilización química  $\times$  agua destilada (71.25%), en cual fue estadísticamente diferente al resto de tratamientos. Finalmente, el PA en el resto de los tratamientos tuvo un rango de 20.75 y 38.25%, sin existir diferencias significativas entre éstos (Tabla 4).

**Tabla 4.** Valores promedio ( $\pm$ Desviación estándar) del porcentaje de agallamiento (PA) ocasionado por *Meloidogyne* sp. en el cultivo de chile dulce, sometido a dos tipos de fertilización; química (C) y orgánica (O) y cuatro tipos de nematicida; oxamyl (T), *P. fluorescens* (P), *B. amyloliquefaciens* (B), *S. griseoviridis* (S) y testigo absoluto, agua (A).

Tratamiento	Código	PA	Desviación Estándar	Mínimos	Máximos
1	CT	20,75B	2,22	18	23
2	CP	38,25B	1,26	37	40
3	CB	11,5A	1,29	10	13
4	CS	21,25B	1,50	20	23
5	CA	71,25C	2,50	70	75
6	OT	23,0A	2,45	20	25
7	OP	15,75A	1,50	15	18
8	OB	29,5B	1,0	28	30
9	OS	31,25B	2,50	30	35

Letras distintas asociadas al PA indican diferencias estadísticamente significativas ( $p \leq 0,05$ )

Los datos obtenidos no coinciden con los datos de Morris, *et al.* (2016), quienes al aplicar este biocida en cultivos hortícolas no observaron reducción en el agallamiento causado por *Meloidogyne* sp. en el cultivo de pepino. Además, el oxamyl pertenece al grupo químico de los carbamatos, los cuales actúan como nematostáticos a concentraciones muy bajas y períodos de exposición demasiado cortos (Thomason, 1985). De acuerdo con lo anterior, solamente paralizan a los fitonematodos, afectando algunos aspectos de su comportamiento, tales como la orientación y eclosión, principalmente (Wright, *et al.*, 1980; McGarvey, *et al.*, 1984; Thomason, 1985; Cavelier, 1987; Opperman y Chang, 1990; d'Errico, *et al.*, 2017). Por lo que es probable que el efecto negativo del nematicida haya sido pasajero.

En contraste, el mecanismo de acción de los nematicidas bacterianos, el cual tiene una base genética asociada a la actividad nematicida mediante la expresión del gen *purL* (que regula la síntesis de metabolitos de la purina), produce la mortalidad de nematodos, así como la inhibición de la eclosión de huevos. Este mecanismo ha sido identificado en *P. fluorescens* y *B. subtilis* (Xia, *et al.*, 2011), lo que hace a los nematicidas biológicos más eficientes en comparación con el

nematicida químico a base de oxamyl. Esto es consistente con los hallazgos de este trabajo, ya que las plantas inoculadas al aplicar una fertilización química con *B. amyloliquefaciens* mostraron el PA más bajo, lo cual concuerda con lo reportado por Lobna y Zawam (2010), quienes observaron un 87.0% de la inhibición del PA producido por el nematodo.

En otros estudios los resultados obtenidos al utilizar *B. amyloliquefaciens* a distintas concentraciones, lograron un manejo eficiente de *Meloidogyne* spp., ya que los PA fueron menores con respecto al tratamiento con oxamyl, además de causar porcentajes más altos de mortalidad del nematodo. Por ejemplo, concentraciones de 10.0% a 40.0 % de *B. amyloliquefaciens* inhibieron la eclosión de huevos en un 25.0% y hasta un 60.6% después de cinco días de exposición. Se observó que entre más alta fue la concentración de *B. amyloliquefaciens*, mayor fue la mortalidad e inhibición de eclosión de huevos (Jamal, *et al.*, 2017).

Casos exitosos de manejo de *Meloidogyne* spp. con las bacterias evaluadas en este estudio están ampliamente registrados; por ejemplo, Liu, *et al.* (2020), indican que, en plantas de tomate, la aplicación de las bacterias *Pseudomonas* sp. y *Bacillus* sp., redujeron de manera importante el agallamiento en la raíz de las plantas a los 45 ddt. En otros estudios como los realizados por Orrico, *et al.* (2013), se logra evidenciar el uso y eficacia de *Pseudomonas* sp. para el control del nematodo en función de índices de agallamiento. En datos recolectados por Stirling (1984), se logra observar la mayor mortalidad de *Meloidogyne* sp. en función a la concentración (mg/kg) de *Bacillus* sp. utilizada en sus estudios.

## 5.2 Índice de agallamiento

El PA no mantuvo una relación directa con el índice de agallamiento (IA), los valores de PA se comportan con medias muy variadas, mientras que el IA engloba rangos de valores dentro de un mismo grupo. El IA en las plantas de Chile no presentó diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos evaluados y mostró un rango de valores de 1 a 4 (Tabla 5), encontrándose los índices más altos en el tratamiento fertilización química × agua (4), fertilización química × *P. fluorescens* (3), fertilización orgánica × *B. amyloliquefaciens* y fertilización orgánica × *S. griseoviridis* (valor de 3 en ambos).

**Tabla 5.** Valores promedio ( $\pm$  Desviación estándar) del índice de agallamiento (IA) ocasionado por *Meloidogyne* sp. en el cultivo de chile dulce, sometido a dos tipos de fertilización; química (C) y orgánica (O) y cuatro tipos de nematicida; oxamyl (T), *P. fluorecens* (P), *B. amyloliquefaciens* (B), *S. griseoviridis* (S) y testigo absoluto, agua (A).

Tratamiento	Código	IA	Desviación estándar	Mínimos	Máximos
1	CT	2A	0	2	2
2	CP	3A	0	3	3
3	CB	1A	0	1	1
4	CS	2A	0	2	2
5	CA	4A	0	4	4
6	OT	2A	0	2	2
7	OP	1,25A	0,50	1	2
8	OB	3A	0	3	3
9	OS	3A	0	3	3

Es importante mencionar que el agallamiento se encuentra influenciado por las características del suelo, es decir, esta variable en suelos andisoles es menor en comparación con otros ordenes de suelo. La misma situación se presenta con la necrosis en raíz, que es menor en los suelos andisoles (Nakasono, *et al.*, 1989). Estas diferencias observadas se dan porque los andisoles han demostrado proporcionar un medio en el cual *Meloidogyne* tiene una menor movilidad en comparación con suelos que son de origen arenoso, por lo tanto, en suelos andisoles la movilidad de los nematodos se da con mayor velocidad, esto propicia una mayor distribución de los nematodos sobre la rizosfera (Fujimoto, *et al.*, 2010). En este estudio, se utilizó suelo Andisol, el cual presentaba altos valores de materia orgánica, con condiciones favorables para el establecimiento de las rizobacterias. Adicionalmente, estos suelos son reservorio de nutrientes, lo que promueve una adecuada nutrición y salud vegetal, que se traduce en plantas menos susceptibles al ataque de nematodos. Según los análisis químicos, el suelo utilizado tenía un valor de materia orgánica de 10.93%, considerado como alto.

El pH del suelo utilizado fue de 5.9, manteniéndose en valores relativamente neutros, lo que pudo influir en la supresión de la infestación de *Meloidogyne* sp. en las raíces, ya que, suelos con pH neutro, tienen el mismo comportamiento que suelos con alto contenido de materia orgánica y N, P, K (Muñoz, 2011).

De acuerdo con Taye, *et al.* (2012), el IA permite evaluar el grado de infección de las especies de *Meloidogyne* sp. en las raíces de sus hospedantes y para medir el grado de daño o severidad causada al cultivo. Por otro lado, el IA está influenciado por la presencia de una alta proliferación de raíces secundarias.

De acuerdo con lo observado en este estudio, en algunos tratamientos se presentó un desarrollo abundante del sistema radical, que permitió el crecimiento normal de las plantas a pesar de la presencia de agallas en las raíces (Figura 14). Por ejemplo, en los tratamientos fertilización orgánica × *P. fluorescens* y (OP) fertilización orgánica × *S. griseoviridis* (OS), se observó un desarrollo abundante de raíces, y su rendimiento de producción de frutos, tal y como se logra apreciar más adelante, fue bueno a pesar de existir presencia de agallas. Por el contrario, en el caso del tratamiento fertilización química × agua (CA) se observó poco desarrollo de raíces y además bajo rendimiento en producción de frutos (Tabla 6).

Contrario a lo esperado, es probable que la presencia de *Meloidogyne* sp. pudiera estimular el crecimiento radical. Este fenómeno se ha evidenciado en otros estudios, en los cuales poblaciones de *Meloidogyne* spp. menores de 200 individuos por 100 g de suelo estimulan el desarrollo de la planta (raíz) e incrementan los rendimientos del cultivo (Salazar y Guzmán, 2013). Poblaciones mayores del nematodo tienen efectos negativos en la raíz, ocasionando un débil desarrollo de las plantas (Salazar y Gúzman, 2013; Prakash y Sharma, 2015).

Si bien en este trabajo la población de *Meloidogyne* sp. inicialmente inoculada fue de aproximadamente 2.000 individuos, estos se pudieron ver reducidos por el efecto de las bacterias aplicadas. Se ha logrado evidenciar que las bacterias con efecto nematocida han logrado controlar la infección por *Meloidogyne* spp. hasta en un 70,0% (Requena, 2013). Sin embargo, el autor enfatiza que, el control eficiente del nematodo por parte de las bacterias estará directamente influenciado por la densidad de población del parásito.



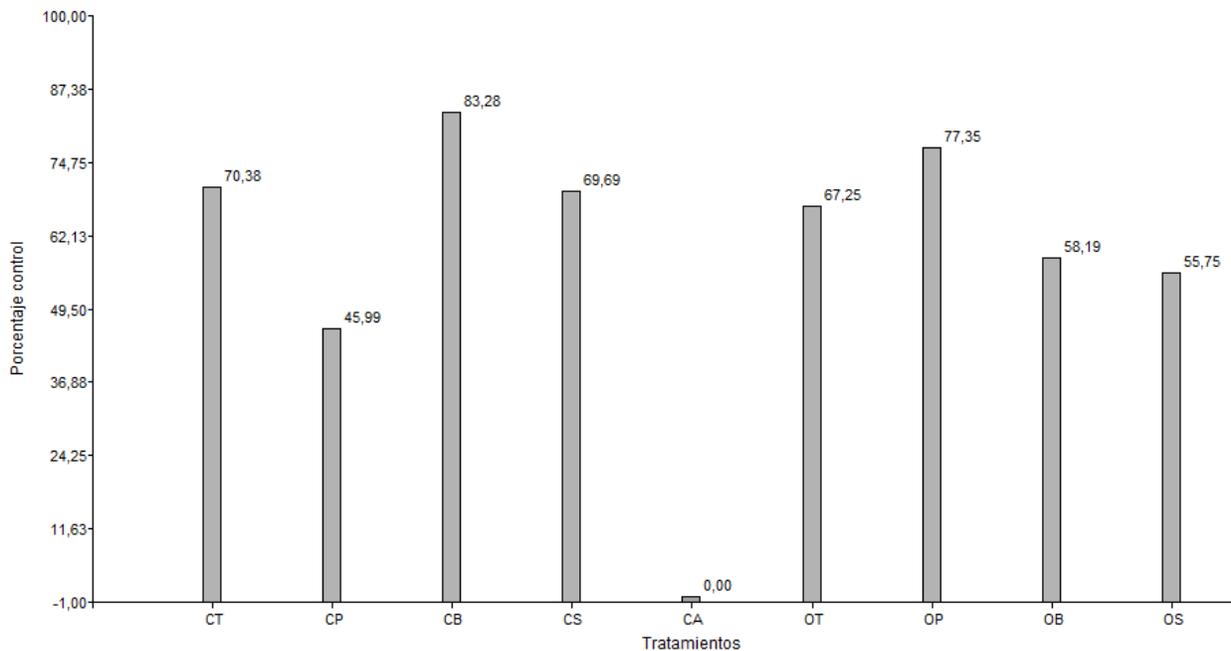
**Figura 14.** Sistemas radicales de plantas de chile dulce sometidas a los tratamientos experimentales. C= fertilización comercial; O= fertilización orgánica; P= *P. fluorescens*; B= *B. amyloliquefaciens*; S= *S. griseoviridis*; A= agua; T= oxamyl.

**Fuente:** Valverde, 2021.

### 5.3 Eficacia de los tratamientos sobre *Meloidogyne* sp.

En general, todas las bacterias ejercieron un control eficiente de los nematodos dentro del sistema radical, reduciendo el agallamiento en las raíces de las plantas de chile dulce (Figura 15). Las bacterias *B. amyloliquefaciens* y *P. fluorescens*, con la fertilización química y orgánica respectivamente, presentaron valores altos de eficacia en el control de *Meloidogyne* sp. Ambos resultados en comparación con el testigo, los valores obtenidos se encontraron entre 70% y 80 % de control. En estudios realizados se ha señalado que alrededor de un 70% se considera un control eficiente (Guevara, *et al.*, 2013).

En estudios realizados por Takahashi (1999) se demostró el efecto antagonista de la bacteria *Streptomyces* sp., la cual es capaz de afectar la fisiología de *Meloidogyne* sp. gracias a la producción de biometabolitos que dañan la membrana (Sharma, *et al.*, 2022). Sin embargo, a pesar de tener buenos resultados en disminuir la afectación a causa del nematodo es poco el uso que se le da a esta bacteria (Sellaperumal, *et al.*, 2016).



**Figura 15.** Efecto del tratamiento en el control contra *Meloidogyne* sp. en plantas de chile dulce bajo condiciones de invernadero. Sometido a dos tipos de fertilización; química (C) y orgánica (O) y cuatro tipos de nematicida; oxamyl (T), *P. fluorescens* (P), *B. amyloliquefaciens* (B), *S. griseoviridis* (S) y testigo absoluto, agua (A).

**Fuente:** Valverde, 2021.

El uso de bacterias como *P. fluorescens*, *B. amyloliquefaciens* y *S. griseoviridis* con distintos tipos de fertilización, tuvieron un efecto positivo previniendo el agallamiento en las raíces, siendo estos tratamientos los que presentaron valores más altos de eficiencia. Estos datos concuerdan con los obtenidos por Liu, *et al.* (2020), quienes encontraron que el uso de bacterias suprimió al nematodo *M. incognita* demostrándose una reducción en el porcentaje de agallamiento en la raíz. El uso de *B. amyloliquefaciens* no ha demostrado tener efectos positivos en la disminución de agallas provocadas por *Meloidogyne* spp., esto según estudios realizados por Jamal, *et al.* (2017), en los cuales se utilizó oxamyl y la bacteria *B. amyloliquefaciens*, teniendo como resultado efectos positivos de control en el agallamiento con el producto químico. Sin embargo, esto contrasta con lo obtenido con esta investigación, donde el tratamiento con solo esta bacteria presentó los mejores resultados en cuanto a disminución de agallamiento (control de aproximadamente el 80%)

Por otra parte, es importante destacar que la segunda bacteria con mejor porcentaje de control correspondió a la bacteria *P. fluorescens* con el uso de fertilizante orgánico, ya que con la utilización de fertilizante químico no se logró un resultado similar. De acuerdo con El-Aal, *et al.* (2021), la aplicación *Pseudomonas* proporciona una mejor protección y control de nematodos agalladores en comparación con los nematicidas tradicionalmente usados como el oxamyl en cultivos hortícolas, logrando reducir significativamente el agallamiento ocasionado por estos nematodos. Por otra parte, la penetración del nematodo a la raíz también se vio reducida en investigaciones donde se aplicó *Pseudomonas* sp., ya que además brindó beneficios secundarios como incremento en los pesos de la raíz y de la planta (Sanar, *et al.*, 2011). La afectación por *Meloidogyne* spp. tiende a disminuir parámetros bioquímicos en las plantas como el contenido de clorofila, carotenoides y nitratos, los cuales aumentan ante la presencia de *Pseudomonas* sp. lo que ayuda a contrarrestar la afectación (Noureldeen, *et al.*, 2021). También la producción de metabolitos producidos por la bacteria, los cuales inducen la mortalidad de los nematodos (Jiang, *et al.*, 2018).

#### 5.4 Producción y peso de frutos.

El peso promedio de frutos fluctuó entre 49.0 g y 89.0 g (Tabla 6); sin embargo, existió una tendencia a obtener frutos de menor peso en los tratamientos con fertilización química (49.0-76.0 g) en comparación con los tratamientos fertilizados orgánicamente (79.0-89.0 g). De igual manera, se logró observar mayores pesos en los frutos que fueron tratados con bacterias (peso promedio mayor a 80.0 g) en comparación con aquellos fertilizados químicamente y uso de oxamyl, los cuales presentaron un menor peso.

Es importante indicar, que para el caso del tratamiento fertilización química × agua no hubo registro de frutos ya que los días muestreados no se logró evidenciar frutos que fueran rescatables para el primer muestreo realizado a los 70 ddt (Anexo 14). El único fruto registrado se encontraba dañado por una larva además de que tenía un tamaño muy reducido.

**Tabla 6.** Efecto de los tratamientos sobre la producción de frutos en las plantas de chile dulce a los 70 ddt. NFP= Número frutos; PFU= Peso total de frutos por unidad experimental (g); PPF= Peso promedio de los frutos (g). sometido a dos tipos de fertilización; química (C) y orgánica (O) y cuatro tipos de nematicida; oxamyl (T), *P. fluorecens* (P), *B. amyloliquefaciens* (B), *S. griseoviridis* (S) y testigo absoluto, agua (A).

Tratamiento	Producto	NFP <sup>¶</sup>	PFU <sup>¶</sup>	PPF <sup>¶U</sup>
1	CT	4	205.0	49.0
2	CP	5	377.0	76.0
3	CB	4	320.0	63.3
4	CS	5	220.0	52.8
5	CA	0	0	0
6	OT	6	486.0	89.0
7	OP	5	385.0	88.8
8	OB	6	450.0	79.0
9	OS	5	395.0	82.8

El mayor peso promedio de frutos se presentó en las plantas donde se aplicó el tratamiento fertilización orgánica × nematicida químico con un valor promedio de 89.0 g, seguido por el

tratamiento fertilización orgánica × *P. fluorescens* con un peso promedio de frutos de 88.67 g. Por otro lado, el valor más bajo reportado correspondió al tratamiento de fertilización química × oxamyl, con un valor promedio de frutos de 49.0 g (Tabla 6).

El peso y producción de frutos en las plantas control y con uso de lombricomposta y bacterias, fueron relativamente más altos que en el resto de los tratamientos. Esta respuesta posiblemente se debió a una floración precoz en las plantas, y una consiguiente producción más temprana de frutos como consecuencia del estrés ocasionado por las poblaciones de *Meloidogyne* sp., ya que las plantas responden de manera reproductiva cuando las condiciones no son favorables para su crecimiento y desarrollo; de esta manera, garantizan la sobrevivencia de su especie (Babatola, 1988; Babatola y Omotade, 1991).

Adicionalmente, pudo existir un efecto positivo de las bacterias en el desarrollo y crecimiento de las plantas, ya que algunas de éstas producen hormonas que estimulan el crecimiento (Comezaña, *et al.*, 2021). Resultados similares han sido reportados por Abo-Elyousr, *et al.* (2010), quienes evaluaron diferentes productos a nivel de invernadero en plantas de tomate. En su investigación hallaron una mayor producción en plantas tratadas con *Pseudomonas*; esto demuestra la importancia de realizar una aplicación de bacterias promotoras de crecimiento al trasplante para obtener una mayor protección y producción en los cultivos hortícolas (Sharma, *et al.*, 2021).

Además del efecto nematocida, las bacterias promotoras del crecimiento estimulan la producción de botones y flores, lo cual se ve potencializado por el uso simultáneo de fertilizantes orgánicos como la lombricomposta. De acuerdo con Lara, *et al.* (2020), la combinación de estas bacterias resultó ser mejor que su aplicación individual. Una mayor cantidad de flores se traduce en una mayor cantidad de frutos. Por otra parte, estudios realizados por Espinosa, *et al.* (2020), demostraron que el uso de lombricomposta tiene efecto sobre el peso (g) del fruto de chile dulce, donde los tratamientos con lombricomposta presentaron un peso mayor en comparación con el testigo, lo cual concuerda con los resultados obtenidos en este estudio.

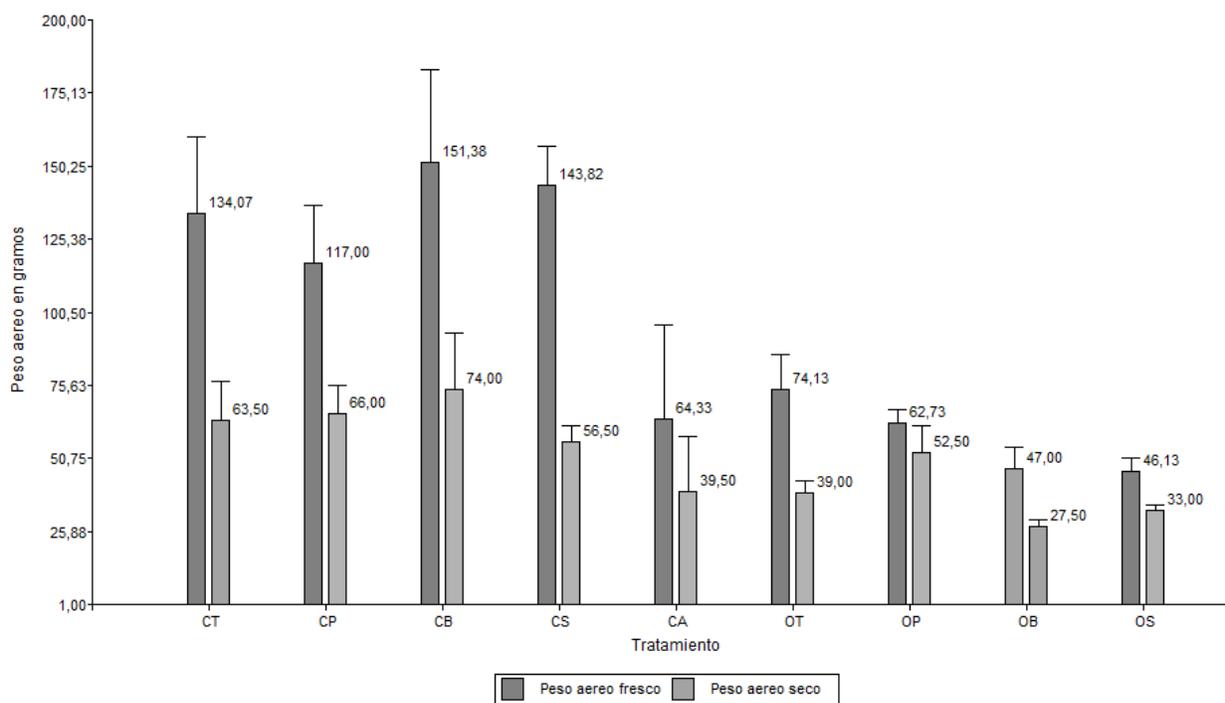
### **5.5 Peso fresco y seco de parte aérea y raíz**

En general, los mayores pesos promedio de la parte aérea seca se observaron en los tratamientos con fertilización química, en comparación con los tratamientos con fertilización

orgánica. El peso aéreo seco promedio más alto, correspondió a fertilización química  $\times$  *B. amyloliquefaciens* (74.0 g), mientras que el tratamiento con el menor peso promedio aéreo seco corresponde a fertilización orgánica  $\times$  *B. amyloliquefaciens* (27.5 g) (Figura 16). Es importante mencionar que el peso aéreo seco no tuvo diferencias significativas, en comparación con el peso aéreo fresco el cual obtuvo un valor de  $P= 0.001$ .

Los valores promedio de la parte área y raíz tuvieron diferencias significativas de acuerdo con los tratamientos evaluados, con excepción de la variable de peso seco de la parte aérea, la cual no presentó diferencias significativas ( $p = 0.073$ ). El peso seco de las partes aéreas de los tratamientos aplicados con bacterias mostró valores más bajos en comparación con el tratamiento fertilización química  $\times$  oxamyl (63.50 g), además, con el tratamiento fertilización química  $\times$  *B. amyloliquefaciens* obtuvo un valor de 74.0 g estando por encima del tratamiento testigo. Sin embargo, en algunos tratamientos con la utilización de bacterias se logró observar valores bajos de pesos promedios como en el caso de fertilización orgánica  $\times$  *B. amyloliquefaciens*, que presentó un valor promedio de peso seco de 27.5 g y el caso de fertilización orgánica  $\times$  *S. griseoviridis* con un peso promedio de 33.0 g.

Al igual que en el peso aéreo seco, los tratamientos con fertilización química e inoculados con bacterias, presentaron valores promedio más altos de peso fresco, en comparación con los fertilizados orgánicamente y con respecto al tratamiento control según lo observado en la gráfica anterior, en otros estudios se evidenció que las plantas que se encontraban inoculadas con *Meloidogyne* sp, presentaron diferencias significativas en el peso aéreo de las plantas (fresco y seco), siendo este peso menor, con respecto al encontrado en los tratamientos donde el suelo fue inoculado con bacterias benéficas (Kepenekci, *et al.*, 2016). En este caso se logra ver similitud de resultados en todos los tratamientos, con excepción del tratamiento fertilización orgánica  $\times$  *S. griseoviridis* (OS) y fertilización orgánica  $\times$  *B. amyloliquefaciens* (Figura 16).



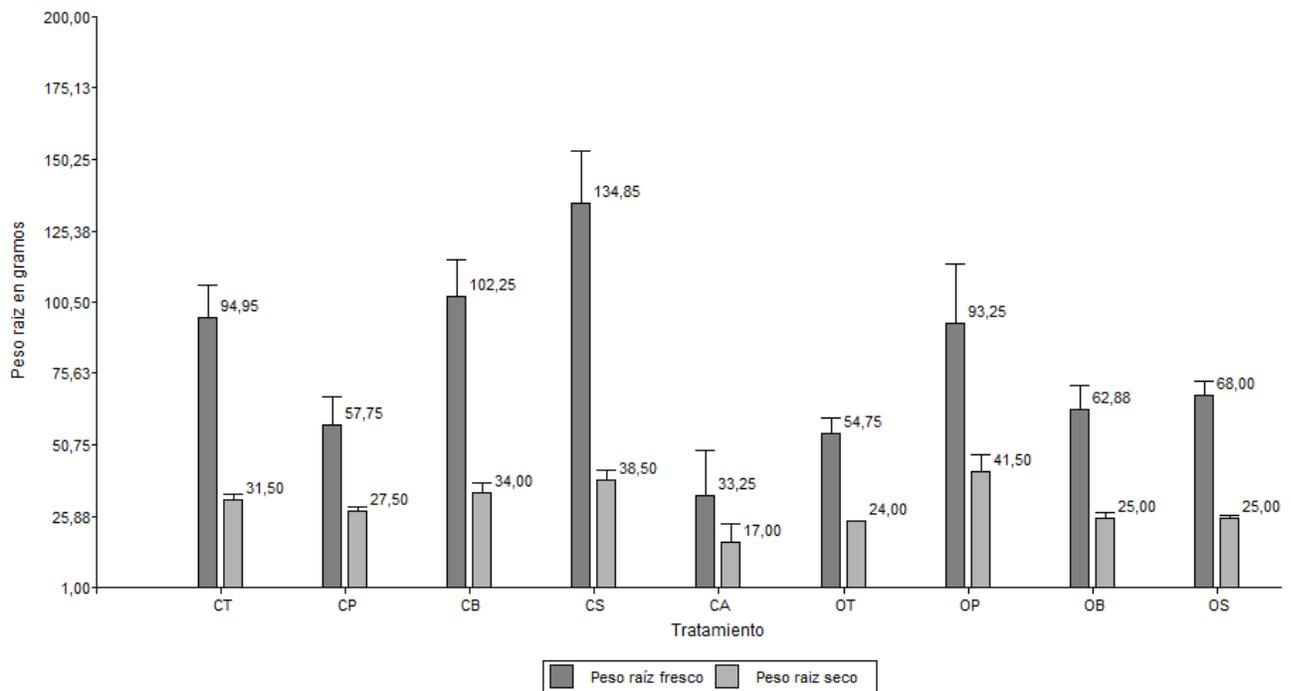
**Figura 16.** Peso promedio de la parte aérea seca y fresca ( $\pm$ Error estándar) de los tratamientos aplicados para el control de *Meloidogyne* sp. en plantas de chile dulce. Sometido a dos tipos de fertilización; química (C) y orgánica (O) y cuatro tipos de nematicida; oxamyl (T), *P. fluorecens* (P), *B. amyloliquefaciens* (B), *S. griseoviridis* (S) y testigo absoluto, agua (A).

**Fuente:** Valverde, 2021.

Con respecto al peso de las raíces, los valores P para peso fresco y seco correspondieron a  $P=0.0003$  y  $0.0005$  respectivamente (Anexo 8), además, los resultados promedio registrados en los tratamientos fertilización química  $\times$  *B. amyloliquefaciens* (CB) y fertilización orgánica  $\times$  *P. fluorecens* (OP) fueron positivos tanto en peso seco, como fresco. El tratamiento CB mostró valores promedio de peso fresco y seco de raíz de 102.2 g y 34.0 g respectivamente, mientras que en el tratamiento OP los valores fueron de 93.25 g y 41.50 g (Figuras 17). Este comportamiento se puede explicar debido a que, al evitar la infección por parte del nematodo, la raíz logra un mayor desarrollo. Bacterias como *Pseudomonas* sp. y *Bacillus* sp. son en algunos casos bacterias endófitas, es decir, que desarrollan parte de su ciclo de vida dentro de la planta (en tallo o raíz), lo cual ayuda a suprimir la infección por nematodos como *Meloidogyne* spp. (Mhardiana, 2017).

Los valores promedios más altos de peso fresco y seco de raíz correspondieron al tratamiento fertilización química  $\times$  *S. griseoviridis* (CS) con 134.85 g y 38.50 g, respectivamente. El valor más bajo se observó en el tratamiento fertilización química  $\times$  agua (CA) con un promedio de 33.25 g en peso fresco y 17.0 g de peso seco (Figuras 17). Resultados similares fueron obtenidos por Ruanpanun, *et al.*, (2011), quienes determinaron un control positivo de *Meloidogyne* spp., con el uso de la bacteria *Streptomyces* sp. reportando tener efecto biocida sobre los huevos y J<sub>2</sub> del nematodo en concentraciones de 100 a 200  $\mu$ g/ml (Kaur, *et al.*, 2016). El máximo valor de peso seco de raíz correspondió al tratamiento fertilización orgánica  $\times$  *P. fluorecens* (OP).

Los datos de peso de raíz fresco y seco, de los tratamientos con fertilización orgánica y bacterias con efecto nematicida fueron mayores en comparación con lo obtenido en el tratamiento testigo con este tipo de fertilizante y oxamyl. Según lo mencionado por EKhanha, *et al.* (2019), obtuvieron una disminución de 19.2% y 39.7% respectivamente en el peso fresco y seco de plantas tratadas con oxamyl en comparación con tratamientos a base de bacterias promotoras de crecimiento, los cuales se mantuvieron con porcentajes mayores de peso.



**Figura 17.** Peso fresco y seco promedio de raíz ( $\pm$ Error estándar) de los tratamientos aplicados para el control de *Meloidogyne* sp. en plantas de chile dulce. Sometido a dos tipos de fertilización;

química (C) y orgánica (O) y cuatro tipos de nematicida; oxamyl (T), *P. fluorescens* (P), *B. amyloliquefaciens* (B), *S. griseoviridis* (S) y testigo absoluto, agua (A).

**Fuente:** Valverde, 2021

El sistema radical de los tratamientos fertilización orgánica × *P. fluorescens* (OP) y fertilización orgánica × Oxamyl (OT) presentó un desarrollo más amplio de las raíces (Figura 20). Con esto, es posible confirmar de forma visual los resultados, ya que el peso fresco de las raíces en el tratamiento OP fue mayor al tratamiento OT, incluso se observa un mayor número de raíces adventicias que permiten mejor absorción de nutrientes. Resultados similares fueron reportados en el estudio de Khanna, *et al.* (2019), ya que el uso de *Pseudomonas* influyó positivamente en el crecimiento longitudinal de la raíz, y por consiguiente en el peso de esta.



**Figura 18.** Sistemas radicales de plantas aplicadas con abonos orgánicos y *P. fluorescens* (A) y oxamyl (B).

**Fuente:** Valverde, 2021.

## 6. CONCLUSIONES

- La utilización de bacterias promotoras del crecimiento vegetal en combinación con el fertilizante orgánico logró proporcionar mejores resultados en términos de pesos promedios del producto, los cuales entran en el rango de segunda calidad.
- El porcentaje de agallamiento (PA) fue estadísticamente influenciado por los dos factores; tipo de fertilización ( $p = 0,01$ ) y tipo de nematicida ( $p = 0,001$ ). En el caso del tipo de fertilizante se registró un PA promedio de 34,15% para las plantas fertilizadas con abono orgánico contra un 22,9% para las plantas fertilizadas con abono químico.
- Las tres bacterias evaluadas tuvieron efectos positivos sobre el control del nematodo *Meloidogyne* sp., esto según los porcentajes de agallamiento y porcentajes de control, exceptuando la combinación de fertilización química  $\times$  *P. fluorescens*.
- En términos de peso fresco de parte aérea los pesos promedios más altos se lograron con la combinación de bacterias con fertilización química.
- El abono orgánico tuvo un efecto positivo en la cantidad de flores y frutos obtenidos, en comparación con la fertilización química, la cual tuvo una floración más tardía según lo observado visualmente durante el ensayo.
- Las variables de peso foliar fresco, peso raíz fresco y seco se tuvo un valor de  $p < 0,05$  y los tratamientos que mostraron eficacia en estas variables correspondieron a: fertilización química  $\times$  *B. amyloliquefaciens*, fertilización química  $\times$  oxamyl, fertilización química  $\times$  *S. griseoviridis* y fertilización orgánica  $\times$  *P. fluorescens*.
- Se logró observar durante el progreso del ensayo, que las plantas con abono orgánico tuvieron un mayor desarrollo y un color verde más intenso.

## 7. RECOMENDACIONES

- Determinar en condiciones *in vitro* la actividad de las bacterias promotoras del crecimiento sobre *Meloidogyne* sp.
- Realizar conteo de nematodos para determinar las densidades poblacionales de los tratamientos.
- Para mejorar el desarrollo de las plantas y la absorción de nutrientes es recomendable la aplicación de bacterias promotoras de crecimiento, además de evitar la afectación por plagas como es el caso de *Meloidogyne* sp.
- Con el fin de mejorar los procesos de evaluación de plantas evaluadas, se sugiere el uso de más variedades de chile dulce que permitan evaluar el efecto de las bacterias promotoras del crecimiento sobre otras variedades.
- Realizar comparaciones entre sistemas de producción de ambientes controlados y a campo abierto.
- Es conveniente para próximos estudios realizar mediciones de largo de la planta, ancho de hojas y conteo específico de flores, para tener más variables a evaluar.
- Realizar evaluaciones en campo abierto para ver el comportamiento de estas bacterias benéficas en otras condiciones de producción agrícola.
- Evaluar parámetros fisiológicos de la planta.

## 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abawi GS & Widmer TL. (2000). Impact of soil health management practices on soilborne pathogens, nematodes and root diseases of vegetable crops. *Applied Soil Ecology*.15:37-47.
- Abo-Elyousr, K. A., Khan, Z., & Abedel-Moneim, M. F. (2010). Evaluation of plant extracts and *Pseudomonas* for control of root-knot nematode, *Meloidogyne incognita* on tomato. *Nematropica*, 289-299.
- Acosta, M., García, C., García, A., Soni, E., Vázquez, E., García, A., Franco, M y González, H. (2016). *Revista Científica Biológico-Agropecuaria Tuxpan*, 4(1). 54-64.
- Aguado-Santacruz, G. A., Moreno-Gómez, B., Jiménez-Francisco, B., García-Moya, E., & Preciado-Ortiz, R. E. (2012). Impacto de los sideróforos microbianos y fitosidéforos en la asimilación de hierro por las plantas: una síntesis. *Revista fitotecnia mexicana*, 35(1), 9-21.
- Ahmed, H., Hussein, H., Mohamed, M., El-Mohamedy, R & Samy Usama. (2018). Field control of *Meloidogyne incognita* and root rot disease infecting eggplant using nematicide, fertilizers, and microbial agents. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, 28(40). 28-40. Doi: 10.1186/s41938-018-0044-1.
- Álvarez, E. (2018). Cultivo de Chile Dulce (en línea). El Salvador, CENTA. Consultado 27 abr. 2021. Disponible en [http://centa.gob.sv/docs/guias/hortalizas/Guia%20Centa\\_Chile%20Dulce%202019.pdf](http://centa.gob.sv/docs/guias/hortalizas/Guia%20Centa_Chile%20Dulce%202019.pdf)
- Aviléz Alvear, A. A. (2021). *Bacteria benéfica Pseudomona fluorescens como agente de control biológico para mejorar la producción del cultivo de maíz*. Tesis para optar por el grado de Licenciatura. Babahoyo, Ecuador.
- Azofeifa, A y Moreira, M. (2008). Absorción y distribución de nutrimentos en plantas de chile jalapeño (*Capsicum annuum* L. CV.HOT) en Alajuela, Costa Rica. *Agronomía costarricense*, 32(1). 19-29. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/436/43632104.pdf>
- Babatola, J. O. (1988). Nematode control in the rehabilitation of plantain. *Musa* sp. Pak. *Journal of Nematology* 6: 25-30.
- Babatola, J.O; Omotade, M.A. (1991). Chemical control of the nematode pests of cowpea, *Vigna unguiculata* (L.) Walp. *Crop Protection*. 10: 121-124.
- Badilla, F. (2018). Identificación de Nematodos Fitoparásitos Asociados al Cultivo de Chile Dulce (*Capsicum annuum* L.) en las Principales Zonas Productoras de Costa Rica. Tesis Lic. Agrónomo. San José, Costa Rica. Universidad de Costa Rica. 106p.

- Balladares, J. (2002). Comparación técnica y económica de cuatro niveles de fertilización con cuatro tamaños de bolsa en chile dulce bajo condiciones de macrotúnel en Zamorano. Proyecto especial presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Agrónomo en el grado académico de Licenciatura. Zamorano, Honduras. 73p.
- Barrantes, L. (2010). Manual de recomendaciones en el Cultivo de chile, pimenton o aji (*Capsicum* sp.). INTA. Costa Rica. Disponible en <http://www.platicar.go.cr/images/busca3dor/documents/pdf/00/00380-manualchile.pdf>
- Bashan, L., Hernandez, J & Bashan, Y. (2012). The potential contribution of plant growth-promoting bacteria to reduce environmental degradation - A comprehensive evaluation. *Applied Soil Ecology* 61. 171-189. Doi: 10.1016/j.apsoil.2011.09.003
- Benjumeda, D. (2017). Bacterias promotoras del crecimiento vegetal: Mecanismos y aplicaciones. Trabajo de fin de grado en Farmacia. Universidad de Sevilla. Sevilla, España. 44p.
- Bermeo, N. (2015). Evaluación de la resistencia a *Fusarium oxysporum* y *Meloidogyne incognita* en segregantes de cruzamientos entre miembros de la sección Lasiocarpa. Tesis para optar por el grado de Ingeniería Agronómica. Universidad Central de Ecuador. Quito, Ecuador. 64 p.
- Berova, M., Pevicharova, G, Stoeva, N & Karanatsidis, G. (2013). Vermicompost affects growth, nitrogen content, leaf gas exchange and productivity of pepper plants. *Journal of Elementology* 18(4), 565-576. Doi: 10.5601/jelem.2013.18.4.393
- Berstsich, F. (2009). Absorción de nutrimentos por los cultivos. Asociación costarricense de la ciencia del suelo.
- Bones, U. (2021). Biotecnología: avaliação da atividade amilolítica de *Bacillus amyloliquefaciens*. Universidad Federal de Santa María. Santa María, Brasil. 45p.
- Cabanilla, M., Meza, C., Avellaneda, J., Meza, M., Vivas, A & Meza, G. (2021). Desempeño agronómico y valor nutricional en *Tithonia diversifolia* (Hemsl.) A Gray bajo un sistema de corte. *Ciencia Y Tecnología (Quevedo, Ecuador)*, 14(1), 71-78. Doi: [doi.org/10.18779/cyt.v14i1.450](https://doi.org/10.18779/cyt.v14i1.450)
- Cabi (Centre for Agricultural Bioscience International). (2021). Plantwise Knowledge Bank, root-knot nematode. Disponible en <https://www.plantwise.org/KnowledgeBank/datasheet/33245>

- Calvo, A. (2011). Aislamiento, identificación y evaluación *in vitro* de antagonistas de *Botrytis cinerea* pers. Ex nocca & balb., en el cultivo de la mora (*Rubus* spp.) en Costa Rica. Tesis Lic. Heredia, Costa Rica. Universidad Nacional. 57 p
- Calvo-Araya, J. A., & Zapata-Montes, N. (2020). Evaluation of Nematicidal Activity of Fluensulfone against *Meloidogyne incognita* in Bell Pepper Crop. *International Journal of Plant & Soil Science*, 32(10), 52-59.
- Calvo, A. (2017). A novel nematicide for the control of root-knot nematodes in tomato crop. *Int. J. Phytopathol.* 06 (02). 35-40
- Camelo, M., Vera, S y Bonilla, R. (2011). Mecanismos de acción de las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal. *Revista Corpoica* 12(2), 159-166. Recuperado de: <http://revistacta.agrosavia.co/index.php/revista/article/view/227/233>
- 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.
- Canizales, J., Mclean, D y Martines, J. (2005). Evaluación de la rentabilidad del cultivo de chile dulce (*Capsicum annun* L.) bajo el sistema de fertilización orgánica. Tesis para optar por el grado de Ingeniero en Agroecología Tropical. Universidad Autónoma de Nicaragua-León. León, Nicaragua. 55p.
- Cavelier, A. 1987. Le mode d' action des nematicidas non-fumigants. *Agronomie* 7(10):747-762.
- Chitwood, D.J. (2003) Research on plant-parasitic nematode biology conducted by the United States Department of Agriculture- Agricultural Research Service. *Pest Management Science*. 59:748-753.
- Chowdhury, S., Hartmann, A., Gao, X & Borriss, R. (2015). Biocontrol mechanism by root-associated *Bacillus amyloliquefaciens* FZB42 – a review. *Frontiers in Microbiology* 6, 1-11. Doi: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.00780>
- Comenzaña, C., Rodriguez, R., Ayastuy M., Muscolino, C., Rosseti, F., y Belladonna, D. (2021). Intercultivo de tomate con plantas antagónicas en el tratamiento del suelo infestado con *Meloidogyne* spp., en invernadero. *Horticultura Argentina* 40(101). 6-19. Recuperado de

[https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/138111/CONICET\\_Digital\\_Nro.4235c46a-d7d3-413b-a673-60d1925810b5\\_A.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/138111/CONICET_Digital_Nro.4235c46a-d7d3-413b-a673-60d1925810b5_A.pdf?sequence=2&isAllowed=y)

- Corrales, C., Caycedo, L., Gómez A., Ramos J., & Rodríguez, N. (2017). *Bacillus* spp: una alternativa para la promoción vegetal por dos caminos enzimáticos. *Nova*, 15(27), 46-65.
- Correa, J., Ramírez, R., Ruíz, O., & Leiva, E. (2021). Effect of soil characteristics on cadmium absorption and plant growth of *Theobroma cacao* L. seedlings. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 101(13), 5437-5445. Recuperado de: <https://doi.org/10.1002/jsfa.11192>
- Cuadra, R., Cruz, X., & Fajardo, J. L. (2000). Notas De Investigacion-Research Notes Cultivos De Ciclo Corto Como Plantas Trampas Para El Control Del Nematodo Agallador. *Nematropica*, 241-246.
- Cuadra, Y. (2017). Detección molecular mediante PCR convencional de tres especies del nematodo *Meloidogyne incognita*, *M. javanica* y *M. enterolobii* en el cultivo ornamental del género *Epipremnum*, en el laboratorio Visarmaga kilómetro 22, carretera Pacífico, Villa Nueva, Guatemala, C. A. Trabajo de graduación para optar por el grado licenciatura en Agronomía. Universidad de San Carlos, Guatemala. 180 p.
- Curtis, R; Robinson, A. F; Perry, R. (2009). Hatch and host location. In Pp. 139-162. In: Perry, R.N; Moens, M; Starr, J.L. (eds.). Root-knot Nematodes CABI International. London, UK.
- Das, S., Wadud, A., Khokon, A. (2021). Funtional evaluation of culture filtrates of *Bacillus subtilis* and *Pseudomonas fluorescens* on the mortality and hatching of *Meloidogyne javanica*. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(2). 1318-1323. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.11.055>
- Delgado, M. (2010). Eficiencia de nematocidas de naturaleza biológica, química y botánica en el control del nematodo del nudo de la raíz (*Meloidogyne incognita*) en rosas cultivadas bajo invernadero en el cantón Quito. Tesis para optar por el grado de ingeniero agropecuario. Universidad Técnica del Norte. Ibarra, Ecuador. 101 p.
- El-Aal, E., Shahan, M., Sayed, S., Kesba, H., Ansari, M., El-Ashry, R., Aioub, A., Salma, A & Eldeeb, A. (2021). In vivo and invitro management of *Meloidogyne incognita* (Tylenchida: Heteroidea) using rhizosphere bacteria, *Pseudomoas* spp. and *Serratia* spp. compared with

- oxmail. *Saudi journal of Biological Sciences*, 28 (9). 4876-4883. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.06.078>
- Elizondo, E y Monge, J. (2016). Caracterización morfológica de 12 genotipos de chile dulce (*Capsicum annuum* L.) cultivados en invernadero en Costa Rica. *Tecnología en Marcha*, 29(3), 60-72. Recuperado de [https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0379-39822016000300060](https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0379-39822016000300060)
- Espinosa Torres, L. E. (2010). *Cultivo en invernadero, postcosecha y mercado del chile manzano (Capsicum pubescens R y P)* (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma Chapingo).
- Espinosa, B., Cano, P., Salas, L., González, G., Reyes, A., Velia, A & Preciado, P. (2020). Vermicompost on the production and nutraceutical quality of jalapeño pepper fruits (*Capsicum annuum* L.). *Tierra Latinoamericana*, 38(4). 795-803. Doi: <https://doi.org/10.28940/terra.v38i4.605>
- FAO. Statistics Division of FAO (Online). Disponible: <http://faostat.fao.org>. (Accesado. 20 abril 2021)
- FAO. Statistics Division of FAO (Online). Disponible: <http://faostat.fao.org>. (Accesado. 15 junio 2021)
- Fujitomoto, T., Hasegawa, S., Otobe, K & Mizukobo, T. (2010). The effect of soil water flow and soil properties on the motility of second-stage juveniles of the root-knot nematode (*Meloidogyne incognita*). *Soil Biology & Biochemistry*, 42(7). 1065-1072. Doi: [doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.03.003](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.03.003)
- Fuke, P., Mohan, T., Kumar, M., Sawarkar, A., Pandey, A & Singh, L. (2021). Role of microbial diversity to influence the growth and environmental remediation capacity of bamboo: A review. *Industrial Crops and Products*, 167. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113567>
- Gamalero, E & Glick, B. (2011). Mechanisms Used by Plant Growth-Promoting Bacteria. *Bacteria in Agrobiolology: Plant Nutrient Management*. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/226097360\\_Mechanisms\\_Used\\_by\\_Plant\\_Growth-Promoting\\_Bacteria](https://www.researchgate.net/publication/226097360_Mechanisms_Used_by_Plant_Growth-Promoting_Bacteria)
- Glick, B. (2012). Plant Growth-Promoting Bacteria: Mechanisms and Applications. *Scientifica* 2012, 1-16. Doi: <https://doi.org/10.6064/2012/963401>

- Guevara, Y., Gómez, E., Pino, O., Rodríguez, Y., Miranda, I., Enrique, R., & Rodríguez, M. G. (2013). Efecto in vitro de concentraciones del NEMACID® sobre huevos y juveniles de *Meloidogyne incognita* (Kofoid y White) Chitwood. *Revista de Protección Vegetal*, 28(1), 74-76.
- INEC (Instituto Nacional de Estadística y Censos). (2015). Índices de precios al consumidor. INEC. 4 p.
- Jamal, Q., Cho, J., Moon, J., Munir, S., Anees, M., & Kim, K. (2017). Identification for the First Time of Cyclo(d-Pro-l-Leu) Produced by *Bacillus amyloliquefaciens* Y1 as a Nematicide for Control of *Meloidogyne incognita*. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 22(11), 1839.
- Jiang, C., Xie, P., Li, K., Xie, Y., Chen, L., Wang, J., Xu, Q & Guo, J. (2018). Evaluation of root-knot nematode disease control and plant growth promotion potential of biofertilizer Ning shield on *Trichosanthes kirilowii* in the field. *Brazilian Journal Microbiology*, 40(2). 232-239- Doi: <https://doi.org/10.1016/j.bjm.2017.08.009>
- Kaur, T., Jasrotia, S., Ohri, P & Kumari, R. (2016). Evaluation of *in vitro* and *in vivo* nematicidal potential of a multifunctional streptomycete, *Streptomyces hydrogenans* strain DH16 against *Meloidogyne incognita*. *Microbiological Research*, 192. 247-252. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.micres.2016.07.009>.
- Kearn J, Ludlow E, Dillon J, O'Connor V, Holden-Dye L. (2016). Fluensulfone is a nematicide with a mode of action distinct from anticholinesterases and macrocyclic lactones. *Pesticide Biochemistry and Physiology*. 109:44-57
- Kepenekci, I., Hazir, S., & Lewis, E. (2016). Evaluation of entomopathogenic nematodes and the supernatants of the in vitro culture medium of their mutualistic bacteria for the control of the root-knot nematodes *Meloidogyne incognita* and *M. arenaria*. *Pest Management Science*, 72(2), 327-334.
- Khairy, D., Refaei, A & Fatma, M. (2020). Management of *Meloidogyne incognita* Infecting Eggplant Using Moringa Extracts, Vermicompost, and Two Commercial Bio-products. *Egypt. J. Agronematol*, 20(1). 1-16. Doi: 10.21608/EJAJ.2021.134910
- Khanna, K., Jamwal, V., Kohli, S., Gandhi, S., Ohri, P., Bhardwaj, R., . . . Ahmad, P. (2019). Role of plant growth promoting Bacteria (PGPRs) as biocontrol agents of *Meloidogyne incognita* through improved plant defense of *Lycopersicon esculentum*. *Plant and Soil*, 436(1-2), 325-345. Do: 10.1007/s11104-019-03932-2

- Lara, L., Zulueta, R., Murillo, B., Romero, M., Rivas, T y Hernandez, L. (2020). Respuesta agronómica del chile dulce (*Capsicum annuum* L.) a la aplicación de *Bacillus subtilis* y lombricomposta en invernadero. *Tierra Latinoamericana*, 28(3). 693-704. Recuperado de: [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0187-57792020000400693](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792020000400693)
- Lezaun, J. (2016). Nematodos fitoparásitos: una plaga mundial. Croplife Latin America. Recuperado de <https://www.croplifela.org/es/plagas/listado-de-plagas/nematodos-fitoparasitos>
- Liu, G., Lin, X., Xu, S., Liu, G., Liu, F., & Mu, W. (2020). Screening, identification and application of soil bacteria with nematicidal activity against root-knot nematode (*Meloidogyne incognita*) on tomato. *Pest Management Science*, 76(6), 2217-2224.
- Lobna, M & Zawam, H. (2010). Efficacy of some Biocontrol Agents on Reproduction and Development of *Meloidogyne incognita* Infecting Tomato. *Journal of American Science*, 6(11). 495-509.
- Machaca, C. (2017). Identificación de *Meloidogyne* spp. por morfología é isoenzimas en pimiento páprika (*Capsicum annuum* L.) en tres irrigaciones de la región Arequipa. Tesis para optar por el grado de ingeniería agronómica. Universidad de San Agustín de Arequipa. Arequipa, Perú. 84 p.
- Madrigal, L. (8 agosto de 2017). Precios del tomate, chile dulce y cebolla disparan el costo de la canasta básica en julio. [elmundo.cr](http://elmundo.cr)
- MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería). (2007). Agrocadena Regional Cultivo CHILE DULCE. Costa Rica. Recuperado de: <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/E70-4281.pdf>
- McGarvey, B. D; Potter, J. W; Chiba, M. (1984). Nematostatic activity of oxamyl and N, N-dimethyl-1-cyanoformamide (DMCF) on *Meloidogyne incognita* juveniles. *Journal of nematology* 16(3):328-332
- Mhardiana., Pandu, A., Adiwena, M., Santoso, D & Wijaya, R. (2017). Use of endophytic bacteria from roots of *Cyperus rotundus* for biocontrol of *Meloidogyne incognita*. *Biodiversitas*, 18(4). 1308-1315. Doi: 10.13057/biodiv/d18040
- Márquez, M y Fernández, E. (2006). Selección de cepas de *Bacillus thuringiensis* con efecto nematicida. *Manejo Integrado de Plagas y Agroecología (Costa Rica)*, (58), 63-69. Recuperado de

<http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/6798/Seleccion%20de%20cepas%20de%20Bacillus%20thuringiensis%20con%20efecto%20nematicida.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Monge, P. y Loría, C. (2018). Producción de chile dulce (*Capsicum annum*) en invernadero: efecto de densidad de siembra y poda. *Revista Posgrado y Sociedad*. <https://revistas.uned.ac.cr/index.php/posgrado/article/view/2269/2752>
- Mora, J; Echandi, C; Barrantes, L; Bonilla, K. (2018). Manual técnico basado en experiencias con el híbrido “Dulcítico” (*Capsicum annum*). INTA. San José: CR.
- Moslehi, S., Pourmehr, S., Shirzad, A & Khakvar, R. (2021). Potential of some endophytic bacteria in biological control of root-knot nematode *Meloidogyne incognita*. *Egyptian Journal of Biological Pest Control* 31 (50), 1-11. doi: <https://doi.org/10.1186/s41938-021-00396-4>
- Muñoz, L. (2011). Efecto del tipo de suelo, la concentración de materia orgánica y la incorporación de un hidrogel en la infestación de *Meloidogyne hapla* Chitwood, 1949. Memoria presentada como parte de los requisitos para optar al título de Ingeniero Agrónomo. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 71 p.
- Nakasono, K., Sano, Z., Araki, M., & Itoh, Y. (1989). Effect of *Meloidogyne incognita* on growth of tomato plants under different soil type conditions (1). *Japanese Journal of Nematology*, 18, 45-53.
- Nimnoia, P & Ruanpanunb, P. (2020). Suppression of root-knot nematode and plant growth promotion of chili (*Capsicum flutescens* L.) using co-inoculation of *Streptomyces* spp. *Biological Control* 145. Doi: [doi.org/10.1016/j.biocontrol.2020.104244](https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2020.104244).
- Noureldeen, A., Asif, M., Ansari, T., Khan, F., Shariq, M., Ahmad, F., Bani, M., Khan, A., Tariq, M., Ahmad, M., Al-Barty, A & Darwish, H. (2021). Effect of Individual, Simultaneous and Sequential Inoculation of *Pseudomonas fluorescens* and *Meloidogyne incognita* on Growth, Biochemical, Enzymatic and Nonenzymatic Antioxidants of Tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Plants* 10(6). Doi: <https://doi.org/10.3390/plants10061145>
- Oka YS., Shuker N & Tkachi N. (2012). Systemic nematicidal activity of fluensulfone against the root-knot nematode *Meloidogyne incognita* on pepper. *Pest Management. Science*. 68:268-275.
- Opperman, C. H., and S. Chang. 1990. Plant parasitic nematode acetylcholinesterase inhibition by carbamate and organophosphate nematicidas. *Journal of nematology* 22(4):481-488.

- Orrico, G., Ulloa, S y Medina, M. (2013). Efecto de los hongos micorrícicos arbusculares y *Pseudomonas fluorescens* en el control de *Meloidogyne* Spp. En las plantas de tomate de árbol (*Solanum betaceum*). *Revista ciencia* 15(1), 1-10.
- Ozarslandan, A., Ata, A & 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.
- Parvatha, R P. (2014). Plant growth promoting rhizobacteria for horticultural crop protection. Springer, India.
- Pati, S., Maity, S., Dash, A., Jema, S., Mohapatra, S., Das, S & Santamaray, D. (2020). Biocompatible PHB Production from Bacillus Species Under Submerged and Solid-State Fermentation and Extraction Through Diferent Downstream Processing. *Curr Microbiol* 77, 1203–1209 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00284-020-01922-7>
- Peraza, W., Orozco, M y Esquivel, A. (2014). Evaluación in vitro de hongos nematófagos en zonas arroceras de costa rica contra el nematodo agallador *Meloidogyne javanica*. *Agronomía Costarricense*, 38(2). 19-32. Recuperado de <https://www.scielo.sa.cr/pdf/ac/v38n2/a02v38n2.pdf>
- Perry, R.N. 2002. Hatching. Pp.147-169. *In*: Lee, D.L. (ed.). The Biology of Nematodes. Taylor and Francis, London, UK.
- Pinheiro, J; Silva, G; Macedo, A; Biscaia, D; Ragassi, C; Ribeiro, C; Carvalho, S & Reifschneider, F. (2020). New resistance sources to root-knot nematode in Capsicum pepper. *Horticultura Brasileira*, 38 (1), 33-40.
- Prakash, I & Sharma, A. (2015). Effects of initial inoculums levels of *Meloidogyne incognita* J2 on development and growth of Tomato cv. PT-3 under control conditions. *African Journal of Microbiology Research*, 9(20). 1376-1380. Doi: 10.5897/AJMR2015.7553
- Ramiro Ramírez Pisco, Edna Ivonne Leiva Rojas, & Ronny Fernell Restrepo Yépez. (2021). Materia orgánica particulada y mineralogía de un Andisol bajo labranza y barbecho. *Acta Agronomica (Palmira)*, 70(4), Acta agronomica (Palmira), 2021, Vol.70 (4). Doi: 10.15446/acag.v70n4.80861.
- Requena, A. (2013). Control biológico de *Meloidogyne incognita* en pimiento (*Capsicum annuum*). Tesis para optar por el grado de Doctorado. Universidad Politecnica de Cartagena. Cartagena, Colombia. 151 p.

- Rojas, E. (2016). Prohibición y Restricción en el Uso y Comercialización de Plaguicidas Agrícolas en Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 40(1), 89-105. Recuperado de [http://www.mag.go.cr/rev\\_agr/v40n01\\_089.pdf](http://www.mag.go.cr/rev_agr/v40n01_089.pdf)
- Ros, C., Sánchez, F., Martínez, V., Lacasa, C. M., Hernández, A., Torres, J., ... & Lacasa, A. (2016). El cultivo de brásicas para biosolarización reduce las poblaciones de *Meloidogyne incognita* en los invernaderos de pimiento del Sudeste de España. *Revista de la Asociación Interprofesional para el Desarrollo Agrario (AIDA)*, 112(2), 109-126.
- Rostami, M., Karegar, A & Taghavi, M. (2021). Biocontrol potential of bacterial isolates from vermicompost and earthworm against the root-knot nematode *Meloidogyne javanica* infecting tomato plants. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, 31 (36), 1-11, doi: <https://doi.org/10.1186/s41938-021-00383-9>
- Ruanpanun, P., Laatsch, H., Tangchitsomkid, N., & Lumyong, S. (2011). Nematicidal activity of fervenulin isolated from a nematicidal actinomycete, *Streptomyces* sp. CMU-MH021, on *Meloidogyne incognita*. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 27, 1373-1380.
- Saborío, I., Mora, M y Durán, M. (2019). Intoxicación por organofosforados. *Revista Medicina Legal de Costa Rica*, 36(1), 110-117.
- Salazar W y Guzmán, T. (2013). Efecto de poblaciones de *Meloidogyne* sp. en el desarrollo y rendimiento del tomate. *Agronomía mesoamericana*, 24(2). 419-426.
- Sánchez López, D. B., Gómez-Vargas, R. M., Garrido Rubiano, M. F., & Bonilla Buitrago, R. R. (2012). Inoculación con bacterias promotoras de crecimiento vegetal en tomate bajo condiciones de invernadero. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 3(7), 1401-1415.
- Sánchez, A., De León, C., Aranda, S., Zavaleta, E., Nava, C., Goodwin, P y Leiva, S. (2017). Bacterias endófitas de la raíz en líneas de maíces tolerantes y susceptibles a sequía. *Revista Mexicana de Fitopatología* 36(1). 35-55. Doi: <https://doi.org/10.18781/R.MEX.FIT.1710-3>
- Seenivasan, N & Senthilnathan, S. (2018). Effect of humic acid on *Meloidogyne incognita* (Kofoid & White) Chitwood infecting banana (*Musa* spp.). *International Journal of Pest Management*, 64(2), 110-118. Doi: <https://doi.org/10.1080/09670874.2017.1344743>
- Sellaperumal, C., Sharma, D., Kamra, A. (2016). Biological services by *Streptomyces lavendulae* MTCC 706 to control invasion, development and reproduction of root-knot nematode (*Meloidogyne incognita*) infecting tomato cv Pusa Rub... *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 86(8). 00-00.

- Shankar, T., Pavaraj, M., Umamaheswari, K., Prabhu, D & Baskaran, S. (2011). *Academic Journal of Entomology*, 4 (3). 114-117.
- Sharma, N., Khanna, K., AhmadKhanna, R., Bhardwaj, R., Ohri, P., Alkahtani, P., Alkahtani, J., Alwahibi, M & Ahmad, P. (2020). Insights into the Role of *Streptomyces hydrogenans* as the Plant Growth Promoter, Photosynthetic Pigment Enhancer and Biocontrol Agent against *Meloidogyne incognita* in *Solanum lycopersicum* Seedlings. *Plants*, 9 (1109), 1-18. doi: 10.3390/plants9091109
- Sharma, M., Saini, I., Kaushik, P., Mohammed, M., Balawi, T & Alam, P. (2021). Mycorrhizal fungi and *Pseudomonas fluorescens* application reduces root-knot nematode (*Meloidogyne javanica*) infestation in eggplant. *Saudi journal of Biological Sciences*, 28(7). 3685-3691. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.05.054>
- Sharma, M., Kumari, R. & Ohri, P. (2022). *Streptomyces hydrogenans* strain DH-16 alleviates negative impact of *Meloidogyne incognita* stress by modifying physio-biochemical attributes in *Solanum lycopersicum* plants. *Scientific reports*, 12(15214). DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-19636-0>
- Stirling, G. R. (1984). Biological control of *Meloidogyne javanica* with *Bacillus penetrans*. *Phytopathology*, 74(1), 55-60.
- Shrestha, B., Pokhrel, A. R., Darsandhari, S., Parajuli, P., Sohng, J. K., & Pandey, R. P. (2019). Engineering *Streptomyces peucetius* for doxorubicin and daunorubicin biosynthesis. *Pharmaceuticals from Microbes*, 191-209.
- Sorribas, F. J., Ornat, C., Verdejo-Lucas, S., Talavera, M., Torres, J., Cortada, L., & Valero, J. (2006). Modelos de predicción para el manejo integrado de *Meloidogyne* en cultivo de tomate. *Boletín SEF num*, 56, 5.
- Soto, M. (2016). Control poblacional de *Meloidogyne* spp en el cultivo de Tomate (*Lycopersicum esculentum*) mediante extractos vegetales bajo ambiente protegido en San Carlos. Tesis presentada para optar al grado de Bachillerato en Ingeniería en Agronomía. San Carlos, Costa Rica. Instituto Tecnológico de Costa Rica. 90 p.
- Soto, F. y Monge, J. (2023). Comportamiento morfofisiológico y productivo de chile dulce hidropónico en invernadero con diferentes estrategias de manejo del fertirriego. *Agronomía costarricense*, 47 (1),37-57.

- Syngenta. (2022). Disponible <https://www.syngenta.com.co/nathalie#:~:text=DESCRIPC%C3%93N,hombros%20y%20de%20pared%20gruesa>
- Takashi, S. (1999). Control of Root-knot Nematodes by Streptomyces: Screening of Root-knot Nematode-controlling Actinomycetes and Evaluation of Their Usefulness in a Pot Test. *Nematological Research (Japanese Journal of Nematology)*, 29(2). 42-45. Doi: DOI: 10.3725/jjn1993.29.2\_42.
- Tapio, E., & Pohto-Lahdenperä, A. (1991). Scanning electron microscopy of hyphal interaction between *Streptomyces griseoviridis* and some plant pathogenic fungi. *Agricultural and Food Science*, 63(5), 435-441. Recuperado de <https://journal.fi/afs/article/view/72422>
- Taye, W; Sakhuja, P. K; Tadele Tefera, T. (2012). Evaluation of plant extracts on infestation of root-knot nematode on tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill). *E3 Journal of Agricultural Research and Development* 2 (3): 086-091.
- Thomason, I. J. (1985). Nematicides. Pp. 235-257. In: Marbán-Mendoza, N, and Thomason, I. J. (eds.). *Fitonematología avanzada I*. COLPOS, Montecillo, Estado de México. México.
- Tripodi P, Kumar S. The capsicum crop: An introduction. In: Ramchiary, N and Kole, C. (2019) (eds.), *the Capsicum Genome, Compendium of Plant Genomes*. Springer Nature, Switzerland.
- Vásquez, S. (2021). Alternativas bioecológicas para el control de nematodos fitopatógenos en el tomate rojo (*Solanum lycopersicum* L.) cultivado en invernadero. Tesis para obtener el grado de Doctorado en ciencias de conservación y aprovechamiento de recursos naturales. Instituto Politécnico Nacional. Oaxaca, México. 1-113 p.
- Xia, Y., Xie, S., Ma, X., Wu, H., Wang, H & Gao, X. (2011). The *purL* gene of *Bacillus subtilis* is associated with nematicidal activity. *FEMS Microbiology Letters*, 322(2). 99–107. Doi: <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.2011.02336.x>
- Xiang, N., Lawrence, K & Donald, P. (2018). Biological control potential of plant growth-promoting rhizobacteria suppression of *Meloidogyne incognita* on cotton and *Heterodera glycines* on soybean: A review. *Journal of Phytopathology*, 449-458. Doi: 10.1111/jph.12712

- Wright, D.J., A. R. K. Blyth, and P. E. Pearson. (1980). Behaviour of the systemic nematicide oxamy in plants in relation to control of invasion and development of *Meloidogyne incognita*. *Annals of Applied Biology* 96: 323-334
- Zhao, D., Zhao, H., Zhao, Di., Zhu,X., Wang, Y., Duan, Y., Xuan, Y & Chen, L. (2018). Isolation and identification of bacteria from rhizosphere soil and their effect on plant growth promotion and root-knot nematode disease. *Biological Control*, 119, 12-19. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2018.01.004>
- Zhao, J; Wang, S; Zhu, X; Wang, Y; Liu, X; Duan, Y; Fan, H; Chen, L. (2021). Isolation and characterization of nodules endophytic bacteria *Pseudomonas protegens* Sneb1997 and *Serratia plymuthica* Sneb2001 for the biological control of root-knot nematode. *Applied Soil Ecology* 164: 103924

## 9. ANEXOS

### Anexo 1. Establecimiento del sistema de riego



### Anexo 2. Almacigo de chile dulce trasplantado el 7 de octubre del 2021



**Anexo 3.** Desarrollo de plantas a los 28 ddt con fertilización química vs fertilización orgánica respectivamente.



**Anexo 4.** Inicios de primera aparición de botones en plantas con fertilización orgánica y retraso en plantas con fertilización química



**Anexo 5.** Malformación de fruto en plantas del tratamiento testigo



**Anexo 6.** Medidas de resumen de los 9 tratamientos para la variable de peso fresco y seco de la parte foliar.

Tratamiento	Variable	Numero de muestras	Media	Desviación estándar	Coefficiente de variación	Mínimos	Máximos	Mediana
CA	PPF	4	64,33	63,34	98,47	0	149	54,15
	PSF	4	39,5	37	93,76	0	88	35
CB	PPF	4	151,38	63,2	41,79	79,5	207	159,5
	PSF	4	74	38,8	52,5	40	130	63
CP	PPF	4	117	39,4	33,7	68	163	118,5
	PSF	4	66	18,9	28,7	38	80	73
CS	PPF	4	143,8	26,6	18,1	125	182	134,1
	PSF	4	56,5	10,25	18,1	46	68	56
CT	PPF	4	134,08	52,4	39,1	63	189,3	142
	PSF	4	63,5	26,6	41,8	38	96	60

OB	PFF	4	47	14,6	31	30,5	64,5	46,5
	PSF	4	27,5	4,73	17,1	24	34	26
OP	PFF	4	62,7	9,67	15,4	53	75,4	61,2
	PSF	4	52,50	18,5	35,2	40	80	45
OS	PFF	4	46,1	9,6	20,8	40,5	60,5	41,7
	PSF	4	33	3,4	10,5	30	38	32
OT	PFF	4	74,1	23,5	31,7	49	103,5	72
	PSF	4	39	8,4	21,55	40	50	38

Nota: PFF= peso foliar fresco, PFS= peso foliar seco

**Anexo 7.** Medidas de resumen de los 9 tratamientos para la variable de peso fresco y seco de la raíz.

Tratamiento	Variable	Numero de muestras	Media	Desviación estándar	Coefficiente de variación	Mínimos	Máximos	Mediana
CA	PRF	4	33,25	31,53	94,83	0	75	
	PRS	4	17	12,06	70,91	0	28	
CB	PRF	4	102,2	25,80	25,23	68	130	
	PRS	4	34	7,12	20,94	24	40	
CP	PRF	4	57,75	19,74	34,18	38	82	
	PRS	4	27,5	3,42	12,42	24	32	
CS	PRF	4	134,8 38,5	36,29	26,91	94,50	182,40	
	PRS	4	38,50	6,61	17,16	32	46	
CT	PRF	4	94,95	23,06	24,29	71	124,5	
	PRS	4	31,50	4,12	13,09	26	36	
OB	PRF	4	62,88	17,57	27,94	46	84,5	

	PRS	4	25	4,16	16,65	20	30
OP	PRF	4	93,25	41,00	43,97	45	142
	PRS	4	41,50	11,12	26,8	28	54
OS	PRF	4	68	10,23	15,05	58	81
	PRS	4	25	2,58	10,33	22	28
OT	PRF	4	54,75	10,87	19,86	39	64
	PRS	4	24	0	0	24	24

Nota: PRF= peso raíz fresco, PRS= peso raíz seco

**Anexo 8.** Valores P obtenidos para cada variable de peso fresco y seco de parte foliar y área.

Variable	Valor P
Peso aéreo fresco	0,0010
Peso aéreo seco	0,073
Peso raíz fresco	0,0003
Peso raíz seco	0,0005

**Anexo 9.** Comparaciones realizadas con la prueba de LSD de Fisher para la variable de peso foliar fresco

Tratamiento	Media	Error estándar	Valor
CB	151,38	19,69	A
CS	143,83	19,69	A
CP	117	19,69	AB
CA	64,33	19,69	BC
CT	134,08	19,69	A
OB	47	19,69	C
OS	46,13	19,69	C
OP	62,73	19,69	BC
OT	74,13	19,69	BC

**Anexo 10.** Comparaciones realizadas con la prueba de LSD de Fisher para la variable de peso raíz fresco

Tratamiento	Media	Error estándar	Valor
CB	102,25	13,03	AB
CS	134,85	13,03	A
CP	57,75	13,03	CD
CA	33,25	13,03	D
CT	94,95	13,03	BC
OB	62,88	13,03	CD
OS	68	13,03	BCD
OP	93,25	13,03	BC
OT	74,13	19,69	BC

**Anexo 11.** Comparaciones realizadas con la prueba de LSD de Fisher para la variable de peso raíz seco.

Tratamiento	Media	Error estándar	Valor
CB	34		ABC
CS	38,5		AB
CP	27,5		CD
CA	17		AB
CT	31,5		BCD
OB	25		CDE
OS	25		CDE
OP	41,5		A
OT	24		DE

**Anexo 12.** Valores de P obtenidos para las interacciones de tipo de fertilizante.

Groups	t	P (perm)	Unique perms
T, P	5,0483	0,032	9
T, B	4,9135	0,023	8
T, S	4,7143	0,023	6
T, A	27,571	0,029	9
P, B	15,254	0,033	7
P, S	10,633	0,027	7
P, A	38,073	0,036	7
B, S	1,2999	0,585	2
B, A	31,011	0,029	7
S, A	22,627	0,033	6

**Anexo 13.** Producto de lombricomposta utilizado



**Anexo 14.** Frutos primer cosecha realizada a los 70 ddt

