

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE CIENCIAS



**“CONTROL DE LA CAPACIDAD INFECTIVA
DE *Meloidoyne incognita* UTILIZANDO UN REACTOR
FOTOCATALÍTICO SOLAR CON DIÓXIDO DE TITANIO”**

Presentada por:

JESARELLA EMMA INGA LÓPEZ

Tesis para Optar el Título Profesional de:

BIÓLOGA

Lima – Perú

2021

**La UNALM es la titular de los derechos patrimoniales de la presente investigación
(Art. 24. Reglamento de Propiedad Intelectual)**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE CIENCIAS

**“CONTROL DE LA CAPACIDAD INFECTIVA
DE *Meloidoyne incognita* UTILIZANDO UN REACTOR
FOTOCATALÍTICO SOLAR CON DIÓXIDO DE TITANIO”**

Presentada por:

JESARELLA EMMA INGA LÓPEZ

Tesis para Optar el Título Profesional de:

BIÓLOGA

Sustentada y aprobada por el siguiente jurado:

Mg.Sc. Abelardo Calderón Rodríguez
PRESIDENTE

Dr. Sady Javier García Bendezú
MIEMBRO

Blgo. Roberto Ramos Chaupin
MIEMBRO

Dr. Víctor Meza Contreras
ASESOR

Dr. Alfredo Rodríguez Delfín
Co ASESOR

DEDICATORIA

A mis amados padres Wellington Inga y Emma López
por su amor incondicional, paciencia y apoyo a lo largo de
mi formación profesional.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, a Dios porque sin él la presente investigación no hubiera sido posible.

Al amor de mi vida Luis Gutiérrez, por su colaboración y motivación durante este proceso.

A mis amados hermanos Hainer e Israel, por su amor.

A mi asesor Dr. Víctor Meza, por la idea inicial de la tesis y por el apoyo durante la realización de la misma.

A mi Co- Asesor Dr. Alfredo Rodríguez, por las instalaciones del Centro de Hidroponía y Nutrición Mineral, donde se desarrolló la parte experimental de esta investigación.

Al Dr. Erich Saettone, por su invaluable colaboración en la realización experimental de este trabajo.

A Luis Saire, por todas sus enseñanzas en el laboratorio de Nematología.

A mis amigos, Hadler Huamán y Luis Ingar, quienes contribuyeron en los ensayos preliminares de la investigación.

Al Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica y a la Universidad de Lima, por la contribución tecnológica y económica para la realización de esta tesis.

A la Universidad Nacional Agraria La Molina, mi alma mater.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	vi
ABSTRAC.....	vii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1 NEMÁTODO DEL NUDO <i>Meloidogyne</i> sp.....	4
2.1.1 Ciclo de vida	4
2.1.2 Reproducción	6
2.1.3 Morfología externa	6
2.1.4 Factores externos que afectan su supervivencia	8
2.2 DESINFECCIÓN DE AGUA	9
2.2.1 Mejoras tecnológicas en la desinfección solar convencional	9
2.2.2 Fotocatálisis con óxido de titanio	11
2.3 CULTIVO DE <i>Lactuca sativa</i> EN SISTEMAS HIDROPÓNICOS.....	14
2.3.1 Sistemas hidropónicos	14
2.3.2 Cultivo de lechuga hidropónica	15
III. MATERIALES Y MÉTODOS	17
3.1 LUGAR Y PERIODO DE EJECUCIÓN	17
3.2 MATERIALES	17
3.3 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	18
3.3.1 Evaluación de la sobrevivencia de juveniles de <i>m. Incognita</i> en tres soluciones	19
3.3.2 Evaluación del efecto del reactor sobre la motilidad de juveniles y la eclosión de huevos de <i>M. incognita</i>	20
3.3.3 Evaluación de la capacidad infectiva de <i>m. Incognita</i> en lechuga hidropónica.....	24

3.4 DISEÑO EXPERIMENTAL Y ANALISIS ESTADÍSTICO	27
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	28
4.1 EVALUACIÓN DE LA MOTILIDAD DE JUVENILES DE <i>M. incognita</i> EN TRES SOLUCIONES	28
4.1.1 Conductividad y ph de las soluciones.....	28
4.1.2. Ensayo de motilidad	28
4.2 EVALUACIÓN DE LA MOTILIDAD DE JUVENILES Y LA ECLOSIÓN DE HUEVOS DE <i>M. incognita</i> EN AGUA TRATADA EN EL REACTOR	30
4.2.1 Ensayo con juveniles.....	30
4.2.2 Ensayo con huevos.....	33
4.3 EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD INFECTIVA DE <i>M. incognita</i> EN LECHUGAS HIDROPÓNICAS.	36
4.3.1 Sistema NFT	36
4.3.2 Sistema raíz flotante.....	37
V. CONCLUSIONES	39
VI. RECOMENDACIONES	40
VII. BIBLIOGRAFÍA.....	41
VIII. ANEXO	45

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Tratamientos y evaluaciones de la prueba de motilidad en tres soluciones	19
Tabla 2: Tratamientos y evaluaciones del ensayo de motilidad en el Reactor	21
Tabla 3: Tratamientos y evaluaciones del ensayo de eclosión utilizando el Reactor.....	23
Tabla 4: Parámetros de pH y conductividad de tres soluciones: AP, AR y SN.	28

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo de vida de <i>Meloidogyne</i> sp. Fotografía de <i>M. javanica</i> en diferentes estadios.....	5
Figura 2. Estructura externa de un juvenil 2 de <i>Meloidogyne</i>	7
Figura 3. Modelos de reactores fotocatalíticos.....	10
Figura 4. Representación esquemática del proceso fotocatalítico en una partícula de dióxido de titanio.....	13
Figura 5. Micrografía electrónica de <i>E. coli</i> K-12 tratadas fotocatalíticamente bajo radiación solar.	14
Figura 6. Flujograma de actividades	18
Figura 7. Reactor fotocatalítico.	20
Figura 8. Cámara de desinfección.	21
Figura 9. Sistemas hidropónicos.....	24
Figura 10. Ensayos en sistema NFT y de raíz flotante.....	25
Figura 11. Escala de evaluación propuesta por Zeck para raíces infestadas por <i>Meloidogyne</i> sp.....	26
Figura 12. Gráfica del resultado del ensayo de motilidad de <i>M. incognita</i> en pocillos.....	29
Figura 13. Gráficas del resultado de los ensayos de motilidad con el reactor.....	31
Figura 14. Gráfica de <i>M. incognita</i> móviles (N/L) vs la cantidad de energía solar acumulada (kJ/L).....	32
Figura 15. Gráficas del resultado de los ensayos de eclosión con el reactor.....	34
Figura 16. Gráfica de huevos eclosionados (N/L) vs cantidad de energía solar acumulada (kJ/L).	36
Figura 17. Gráficas de los resultados del ensayo con lechugas hidropónicas en sistema de módulos NFT.....	37
Figura 18. Gráficas de los resultados del ensayo lechugas hidropónicas en sistema de recipiente de raíz flotante.	38

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Estación Meteorológica DAVIS Vantage PRO 2. (A) Pantalla de visualización de parámetros meteorológicos.	46
Anexo 2. Resultados del ensayo de sobrevivencia de <i>M. incognita</i> en tres soluciones.....	47
Anexo 3. Resultados del ensayo del efecto del reactor sobre la movilidad de <i>M. incognita</i>	48
Anexo 4. Resultados del ensayo del efecto del reactor sobre la eclosión de huevos de <i>M. incognita</i>	49
Anexo 5. Resultados del ensayo de la capacidad infectiva de <i>M. incognita</i> en lechugas hidropónicas en Sistema NFT	50
Anexo 6. Resultados del ensayo de la capacidad infectiva de <i>M. incognita</i> en lechugas hidropónicas en Sistema raíz flotante.....	51

RESUMEN

El agua de riego es uno de los vectores de contaminación patogénica más importantes en diversos cultivos, entre estos patógenos se encuentra *Meloidogyne*, un nemátodo que afecta la raíz de la planta disminuyendo significativamente la productividad del cultivo. El objetivo de la presente investigación fue evaluar el efecto de un reactor fotocatalítico solar con dióxido de titanio sobre la capacidad infectiva del nematodo *Meloidogyne incognita* contenido en agua. Para ello, en primer lugar, se evaluó la capacidad de supervivencia de los juveniles en tres soluciones: agua de riego, agua de pozo y solución nutritiva. Luego se evaluó la motilidad de las larvas y la eclosión de huevos en agua durante diferentes tiempos de tratamiento con el reactor. Finalmente, se evaluó la capacidad infectiva del nematodo luego de ser tratado con el reactor, para lo cual se utilizó lechugas hidropónicas, las variables respuesta fueron peso seco foliar y de raíz, así como número de hojas y grado de agallamiento. El análisis de los resultados fue mediante comparación de medias empleando la prueba de Tukey, t de Student y Mann-Whitney. En el primer ensayo se obtuvo el mayor porcentaje de supervivencia en el agua de pozo y la menor en solución nutritiva. En el segundo ensayo se logró una total inhibición de la motilidad de las larvas luego de 40 minutos de tratamiento con el reactor, la inhibición de la eclosión luego de 2 horas de tratamiento. Finalmente, en el ensayo de la capacidad infectiva se evidenció que luego de que el agua con nematodos fuera tratada con el reactor se logró un menor grado de agallamiento, un mayor peso seco del área foliar y de la raíz.

Palabras claves Nematodo, fotocatalisis, agallamiento.

ABSTRAC

Irrigation water is one of the most important pathogenic contamination vectors in various crops, one of these pathogens is Meloidogyne, it is a nematode that affects the plant roots, reducing significantly the crop productivity. This investigation aim to evaluate the solar reactor with titanium dioxide photocatalytic effect on the infective capacity of the nematode *Meloidogyne incognita* contained in water. To test this, the first step was evaluated the juvenile survival capacity in three different solutions: irrigation water, well water and nutritive solution. After that, the motility of the larvae and the hatching of eggs in water were evaluated during different treatment times with the reactor. Finally, the infective capacity nematode on hydroponic lettuces was evaluated after it was treated with the reactor. The response variables were leaf and root dry weight, number of leaves and degree of galling. All data were analysis using means comparison of the Tukey test, Student's t test and Mann-Whitney. In the first test, the highest survival percentage was obtained with well water and the lowest percentage with nutrient solution. In the second test, the total larvae motility inhibition was achieved 40 treatment minutes with the reactor and the hatching inhibition after 2 treatment hours. Finally, in the infective capacity test, it evidenced that after the water with nematodes was treated with the reactor, a lower degree of galling was achieved, as well as a higher dry weight of the leaf and root area.

Keywords: Nematode, photocatalysis, galling.

I. INTRODUCCIÓN

El nemátodo del nudo de la raíz (*Meloidogyne* spp.) pertenece al grupo de fitopatógenos que causan más daño en la productividad agrícola mundial (Jones *et al.*, 2013). Singh *et al.* (2015) señalan que *Meloidogyne*, a nivel mundial, ha generado aproximadamente USD 157 mil millones de pérdidas anuales. Mientras que, Talavera *et al.* (2012) afirman que este fitopatógeno causa una disminución en la productividad agrícola del 30.8 por ciento en el mundo.

Los efectos causados por *Meloidogyne* tienen mayor incidencia en regiones tropicales que en templadas, puesto que existen condiciones ambientales favorables para la colonización, el desarrollo y la reproducción del nemátodo. En el Perú, una de las zonas más afectada por *Meloidogyne* es la costa norte, debido a que presentan suelos arenosos con poca o nula presencia de materia orgánica y temperaturas mayores a 25 °C. En estas zonas, el nemátodo afecta cultivos de gran importancia para la agroexportación como la uva, ajíes, granado, entre otros (Saire, 2017).

La especie con mayor distribución geográfica en el Perú es *Meloidogyne incognita*, en una investigación realizada a poblaciones del género *Meloidogyne*, en varios departamentos, se encontró que el 84 por ciento pertenecían a dicha especie (Vera (2014). Este nemátodo parasita el sistema radicular formando agallas o nudos, ello obstruye la absorción de agua y nutrientes de manera eficiente de los tejidos vasculares. En consecuencia, la planta presenta un crecimiento reducido, clorosis y marchitez de la hoja y por ende un bajo rendimiento en el cultivo (Escobar *et al.*, 2015).

Las plantas parasitadas con *M. incognita*, en etapas iniciales, generalmente no muestran síntomas que evidencien su presencia, sino cuando el cultivo presenta daños severos. (Moens *et al.*, 2009). En este contexto es de suma importancia realizar prácticas agrícolas para prevenir la contaminación de los cultivos con este patógeno. El agua de riego es uno de los vectores de contaminación con fitopatógenos, por lo que es necesario asegurar su calidad.

En diversas partes del mundo como USA, Australia y Sudáfrica se ha encontrado poblaciones patógenas de *Meloidogyne* en agua de canal, presas y aguas municipales (Hugo y Malan, 2010). En el Perú, hasta la fecha, no hay reportes que confirmen la presencia de dichos parásitos en el agua de riego. Sin embargo, los reportes de campos agrícolas que al inicio de la campaña no estaban infestados con *M. incognita* y que posteriormente lo presentaron, plantean la posibilidad que estos fitopatógenos son transportados de un campo a otro por medio del agua de riego.

Existe un gran número de métodos de desinfección tradicionales para el agua de riego; entre ellos, la ozonización, la cloración, filtración, sedimentación y el calor. Cada uno de estos métodos presenta desventajas de aplicación en un entorno rural. Por ejemplo, el ozono requiere de un alto consumo de energía eléctrica; el cloro requiere una dosificación muy controlada ya que genera subproductos no deseables como los halometanos, los cuales son potentes agentes cancerígenos (Hugo y Malan, 2010).

Entre las alternativas de desinfección con mayores ventajas se encuentran los Procesos de Oxidación Avanzada (POA), los cuales tienen un alto potencial para eliminar compuestos químicos peligrosos y organismos patógenos en agua (Malato *et al.*, 2009). La fotocatalisis solar con dióxido de titanio (TiO_2), es un POA que utiliza radiación UV para generar especies reactivas de oxígeno como radicales hidroxilos, peróxido de hidrógeno y oxígeno singlete, los cuales en altas concentraciones dañan componentes celulares de diversos microorganismos. La principal ventaja de esta tecnología es que utiliza un recurso renovable como la radiación solar y evita así el uso de productos químicos.

Se ha llevado a cabo investigaciones para demostrar la efectividad de la fotocatalisis con TiO_2 en la desinfección de agua infestadas con bacterias como *Escherichia coli*, *E. faecalis*, *Legionella* y algunos hongos como *Fusarium* sp (Aguas *et al.*, 2017). Sin embargo, no se ha encontrado reportes de la efectividad de este método en nematodos fitopatógenos. Por lo que, en la presente investigación se busca evaluar el efecto de esta tecnología en la disminución de la capacidad infectiva de *Meloidogyne incognita* transportado por el agua de riego, para ello se establecieron los siguientes objetivos:

Objetivo principal

- Evaluar el efecto de un reactor fotocatalítico solar con dióxido de titanio inmovilizado sobre la capacidad infectiva de *Meloidogyne incognita*.

Objetivos específicos

- Evaluar la sobrevivencia de juveniles de *Meloidogyne incognita* en tres soluciones.
- Evaluar el efecto del reactor durante diferentes tiempos de exposición solar sobre la motilidad de juveniles y la eclosión de huevos de *Meloidogyne incognita*.
- Evaluar la capacidad infectiva de *Meloidogyne incognita* sobre *Lactuca sativa* en un sistema hidropónico que utilizó agua tratada con el reactor.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 NEMÁTODO DEL NUDO *Meloidogyne* sp.

2.1.1 Ciclo de vida

El ciclo de vida de los individuos que pertenecen al género *Meloidogyne* inicia cuando las hembras ponen huevos dentro de una masa gelatinosa (Figura 1.E). Esta masa compuesta de glicoproteínas tiene la función de proteger a los huevos contra los efectos ambientales, la depredación y agentes microbianos. Inicialmente es suave, pegajosa e hialina, pero se vuelve más firme y marrón oscuro con el pasar del tiempo. Generalmente se encuentra en la superficie de las raíces agalladas; aunque también pueden estar inmerso en el tejido (Moens *et al.*, 2009).

En el interior del huevo, se desarrolla el juvenil de primer estadio, que luego muda al estadio infectivo juvenil 2 (J2) (Figura 1.A). El J2 eclosiona y una vez en el suelo es vulnerable y necesita encontrar una raíz lo más rápido posible. Sin embargo, muchas veces transcurren días para que el nemátodo encuentre el hospedero, por lo que ha desarrollado adaptaciones fisiológicas y bioquímicas, como la quiescencia, la diapausa, y el almacenamiento de reservas lipídicas que prolongan su viabilidad (Figura 1.B, C) (Moens *et al.*, 2009; Escobar *et al.*, 2015).

Una vez que el J2 encuentra la raíz es atraído por los exudados radiculares e ingresan en algún punto de la zona subapical donde la endodermis presenta escaso desarrollo y no constituye una barrera física para su ingreso. El nemátodo avanza hasta el tejido cortical y una vez allí la migración continua intercelularmente (Figura 1.J). Este avance ocurre a través de la separación de la laminilla media mediante golpes del J2 con su estilete, aún no se ha precisado si también ocurren mecanismos enzimáticos en este proceso. Una vez alcanzado el cilindro vascular, el juvenil desarrolla un sitio permanente de alimentación e induce a estas células a diferenciarse en células especializadas, llamadas células gigantes. Este proceso de infección se ha esquematizado en la Figura 1.D (Escobar *et al.*, 2015).

El nombre de células gigantes se debe a que llegan a tener un volumen muchas veces mayores que de las células típicas de la raíz. Según Huang and Maggenti (citado por Moens *et al.*, 2009) éstas llegan a ser 100 veces mayores; mientras que para Hussey y Mims (citado por Saire, 2017) llegan a ser 400 veces el tamaño de las células vasculares. Además, cada célula presenta un gran número de núcleos (hasta 80), altamente lobulados, con un alto número de orgánulos, citoplasma denso y paredes engrosadas e invaginadas. El conjunto de células gigantes son las responsables de los típicos nudos o agallas causado por *Meloidogyne* observado en diversos cultivos. (Figura 1.G, H).

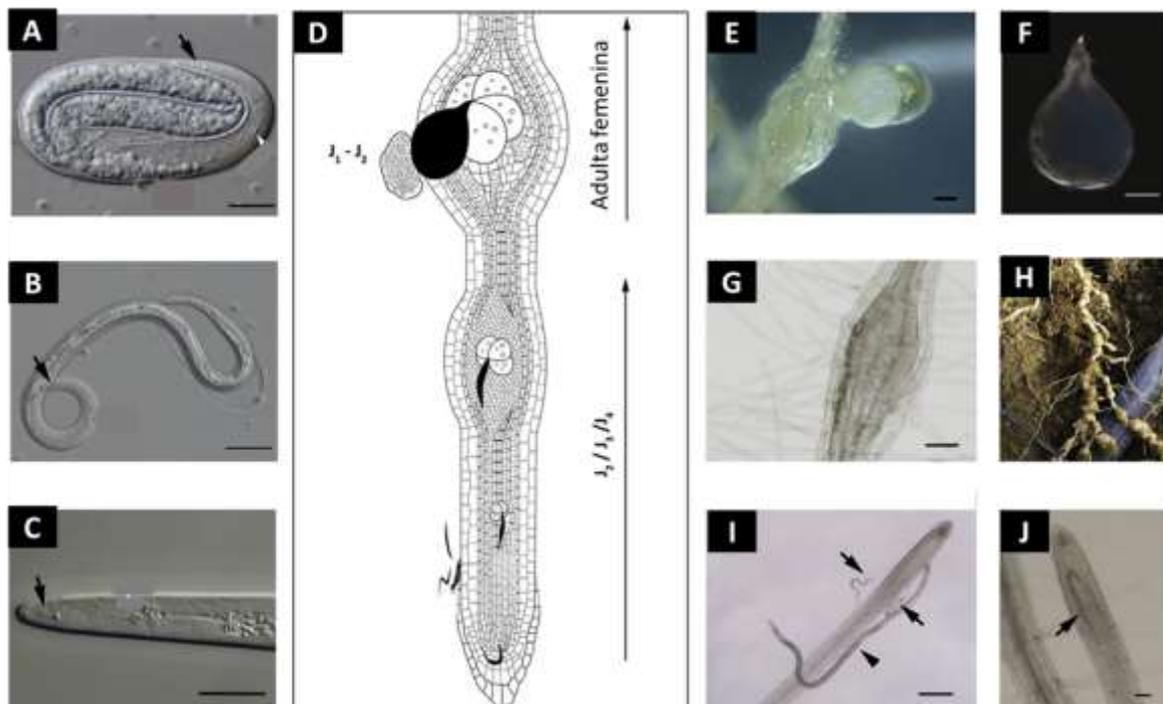


Figura 1: Ciclo de vida de *Meloidogyne sp.* Fotografía de *M. javanica* en diferentes estadios (A, B, C, F e I). (D) Esquema del ciclo de vida del nemátodo del nudo de la raíz. Fotografía de *Arabidopsis thaliana* con (G) agalla incipiente, (E) agalla madura, (I) dos juveniles infecciosos y un macho adulto y (J) migración del juvenil al cilindro vascular. (H) Fotografía de raíces de tomate infectadas con *M. javanica* (Escobar *et al.*, 2015).

Una vez que se forma una célula gigante, el nemátodo se vuelve sedentario y se agranda enormemente. Bajo condiciones favorables, el J2 muda al juvenil de la tercera etapa (J3) después de 14 días, luego a la etapa juvenil de la cuarta etapa (J4) y finalmente a la fase adulta. El tiempo conjunto que transcurre entre las etapas J3 y J4 es mucho más corto que la etapa J2 o la del adulto, generalmente es de cuatro a seis días. Vale decir que, el J3 y J4 carecen de un estilete funcional, por lo que no se alimentan (Moens *et al.*, 2009).

En el caso de la hembra de la cuarta etapa, aumenta de grosor y longitud, sufre una última muda y se desarrolla como hembra adulta adoptando una estructura piriforme (Figura 1.F).

Las hembras adultas tienen una longitud de 0,5-0,8 mm, pueden producir huevos por dos a tres meses y solo viven poco tiempo luego de que cesa la producción de huevos. Por otro lado, el macho de la cuarta etapa es vermiforme, sufre una última muda y emerge de la raíz ya como adulto. La longitud del adulto macho es de 1,1-2 mm, esto es aproximadamente cuatro veces la longitud del juvenil 2 como se observa en la Figura 1.I (Moens *et al.*, 2009).

2.1.2 Reproducción

Según Chitwood y Perry (2009) existen tres tipos de reproducción dentro del género *Meloidogyne*: anfigimixis, partenogénesis meiótica facultativa y partenogénesis mitótica obligada (Figura 2). En la anfigimixis, el esperma de los machos fertiliza los ovocitos de las hembras y posteriormente se produce una meiosis. En la partenogénesis meiótica facultativa, hay dos opciones, en presencia del macho se produce una anfigimixis; pero en ausencia, se lleva a cabo una meiosis en los ovocitos, donde dos de sus núcleos (el pronúcleo y el segundo cuerpo polar) se fusionan (automixis). Finalmente, en la partenogénesis mitótica obligada, los machos no están involucrados y uno de los dos núcleos producidos durante la división mitótica inicial dentro del ovocito se deteriora y el otro se convierte en el precursor del embrión (apomixis).

Solo siete de las 37 especies de *Meloidogyne* descritas por Taylor y Sasser (citado por Chitwood y Perry, 2009), tienen una reproducción anfigimíctica. Mientras que, la reproducción apomíctica se encuentra en las especies más importantes. Además, mencionaron que poblaciones de una misma especie de *Meloidogyne* pueden tener diferentes modos de reproducción. Por ejemplo, de 32 poblaciones de *M. hapla* estudiadas 29 se reprodujeron por partenogénesis meiótica facultativa y tres por partenogénesis mitótica.

2.1.3 Morfología externa

El nemátodo del nudo muestran una estructura corporal básica conservada a lo largo de su vida. En la Figura 2.C se muestra un esquema de la morfología externa de un J2 de *Meloidogyne*. La estructura externa consta de tres capas: la cutícula, la hipodermis (también llamada epidermis) y los músculos somáticos (Escobar *et al.*, 2015).

La cutícula es un exoesqueleto flexible y semipermeable con una estructura multicapa no celular que se sintetiza y secreta nuevamente por la hipodermis en cada muda. Está compuesta por una matriz de colágeno cubierta por una capa exterior (epicutícula) compuesta principalmente por glicoproteínas y otras proteínas asociadas a la superficie (Figura 2.A,B). Esta matriz tiene aproximadamente 0.3-0.4 μm de espesor en los juveniles

de la segunda etapa, 1,5 μm en los adultos machos y 4-6 μm en las hembras (Decraemer y Hunt, 2013).

La cutícula permite la difusión de solutos y el intercambio de agua y gases con el medio para compensar la falta de sistema respiratorio o circulatorio. En las hembras, las características morfológicas cuticulares del perineo, es decir la región que rodea la vulva y el ano, se utilizan para el análisis del patrón perineal cuyas crestas y anulaciones establecen diferencias entre las especies (Escobar *et al.*, 2015).

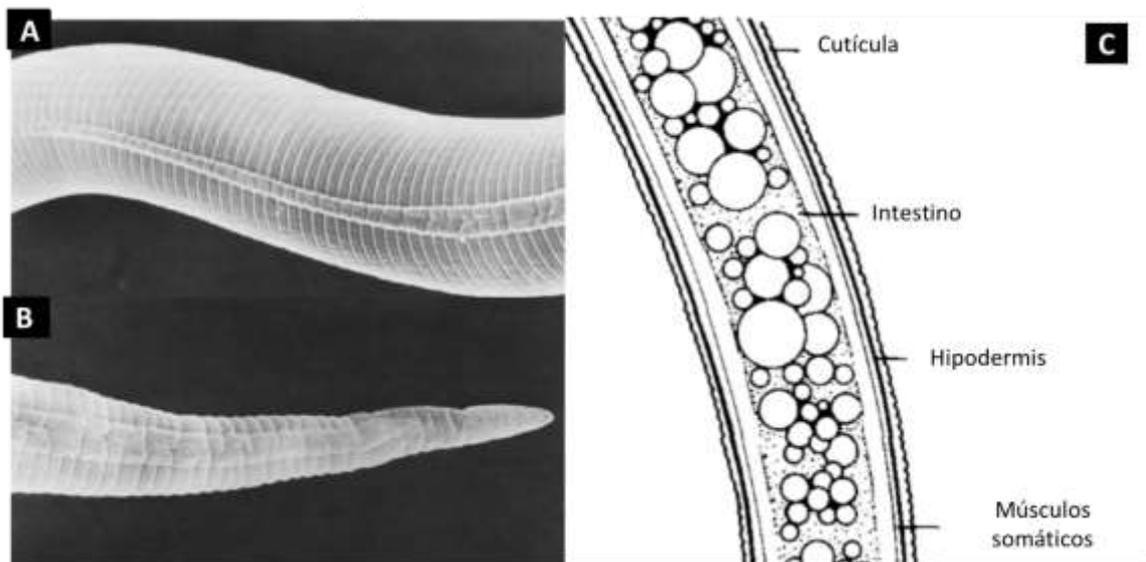


Figura 2: Estructura externa de un juvenil 2 de *Meloidogyne*. Micrografía electrónica de barrido de la sección anterior (A) y posterior (B) del nemátodo. (C) Esquema de la pared corporal conformada por tres capas (Eisenback, 1985).

La hipodermis unida a la membrana plasmática es un sincitio vivo que se encuentra debajo de la cutícula. En la parte anterior, la hipodermis somática se extiende entre los elementos de los músculos transportadores del estilete y es continua con la hipodermis que rodea la cavidad estomálica, la estructura cefálica, las estructuras sensoriales y el eje del estilete. Además, la hipodermis produce enzimas antioxidantes (las secreta a través de la cutícula) y protege al nematodo de las respuestas oxidativas del hospedero frente a la infección (Abad *et al.*, 2009).

Los músculos somáticos son necesarios para que los juveniles de segunda etapa puedan eclosionar, moverse a través del suelo, penetrar y migrar hacia de la planta huésped. Además, permiten a los machos abandonar el tejido de la raíz, progresar libremente a través del suelo y moverse hacia una compañera adecuada (en las especies anfimícticas). Las hembras

permanecen sedentarias, y los músculos somáticos le permiten girar la cabeza para alimentarse de varias células gigantes diferentes (Escobar *et al.*, 2015).

2.1.4 Factores externos que afectan su supervivencia

a. Temperatura

Algunos nemátodos del género *Meloidogyne* tiene la capacidad de sobrevivir a temperatura bajas. Por ejemplo, Evans y Perry (2009) señalaron que *M. chitwoodi*, *M. hapla* y *M. naasi* son capaces de sobrevivir en el suelo a temperaturas menores a 10 °C. Mientras que, *M. javanica*, *M. arenaria* y *M. exigua* solo viven en el suelo a temperaturas mayores a 10 °C.

Wang y McSorley (2008) estudiaron la capacidad *M. incognita* de sobrevivir a altas temperaturas. En la investigación se determinó que 38 °C es la temperatura mínima para matar tanto a los huevos como a los juveniles, para ello, emplearon 389.9 y 48 horas de tratamiento, respectivamente. Además, conforme la temperatura de ensayo era incrementada el número de horas necesarias para lograr la muerte de los dos estadios de *M. incognita* era menor.

En otra investigación, Bird y Wallace (citados por Hugo y Malan, 2010) realizaron un experimento en el que observaron la influencia de la temperatura en la eclosión, movilidad e infección de *M. hapla* y *M. javanica*. En el caso de *M. javanica* se encontró que requería una temperatura de 30 °C para la eclosión; mientras que *M. hapla* de 25 °C. Sin embargo, los requerimientos de temperatura óptima para cada etapa fueron diferentes dentro de cada especie y entre las especies.

b. Sales

En cuanto a la respuesta de juveniles del nemátodo del nudo a medios salinos, Prot (citado por Saire, 2017) señala que *M. javanica* en el suelo migra en dirección contraria de áreas con alta concentración de sales. Por otro lado, en una investigación realizada por Reversat (citado por Saire, 2017) se indujo a la quiescencia a J2 de *M. javanica* cuando fueron colocados en una solución de 17,5 g/L de NaCl. Mientras que, en un estudio acerca del efecto de la salinidad de los suelos y la infección de *M. javanica* en el crecimiento de los tomates, se encontró que la altura de la planta y el número de nódulos por sistema radicular eran reducidos a medida que la salinidad del suelo se incrementaba.

c. Radiación UV

La radiación ultravioleta (UV), cuya longitud de onda comprende de 200 a 400 nm se puede clasificar como UVA (320-400 nm), UVB (280-320 nm) y UVC (200 a 280 nm). La UVC es absorbida por la capa de ozono junto con una proporción de UVB; por lo tanto, UVA representa el fragmento principal de radiación solar ultravioleta que llega a la superficie de la Tierra (Steinbrecht *et al.*, 2009). Además, es importante mencionar que solo alrededor del 4-6 por ciento del espectro solar que llega a la superficie de la Tierra se encuentra en el dominio UV.

No hay reportes del efecto de la radiación UVA y UVB sobre *Meloidogyne* en condiciones de laboratorio ni en campo. Sin embargo, si se ha reportado los efectos de la radiación UVC sobre *Meloidogyne* en condiciones de laboratorio. Por ejemplo, en un artículo Hugo y Malan (2006) encontraron que una dosis de 14 mJ/cm² logró inhibir completamente la capacidad infectiva de los juveniles en raíces de tomate. Mientras que, con una dosis de 142 mJ/cm² se llegó a inmovilizar el 50 por ciento de los juveniles. Finalmente, se requirió de una dosis \geq 200 mJ/cm² para lograr una inmovilización total de los J2.

2.2 DESINFECCIÓN DE AGUA

2.2.1 Mejoras tecnológicas en la desinfección solar convencional

Una de las tecnologías más sencillas y de bajo costo para la desinfección de agua, para el consumo humano, que utiliza la radiación solar es la desinfección solar (SODIS). Esta técnica utiliza botellas transparentes preferiblemente PET de 2-3 litros llenas con agua contaminada y la exponen a la luz solar directa durante un mínimo de 6 horas. Es así que, esta técnica aprovecha la luz y la energía térmica para inactivar a los patógenos a través de un mecanismo sinérgico. Luego de la exposición, el agua es segura para beber ya que la carga viable de patógenos se reduce significativamente (SODIS, 2010).

Sin embargo, hay varios inconvenientes de la tecnología SODIS convencional cuando se quiere desinfectar volúmenes mayores, ya que, el uso de botellas PET permite que solo se traten volúmenes pequeños (de 2 a 3 L). Además, la eficiencia del proceso depende de una gama de parámetros ambientales como la irradiancia solar, la calidad inicial del agua y del usuario (Byrne *et al.*, 2011).

En ese contexto, existen variantes del proceso SODIS convencional, por ejemplo, el diseño de reactores tubulares donde se aumenta la dosis solar por volumen, el uso de sensores

dosimétricos UVA que indican al usuario cuándo la dosis deseada ha sido recibida por el agua. Así mismo, el diseño de sistemas de tratamiento SODIS personalizados que maximizan la dosis solar utilizando concentradores parabólicos compuestos (CPC) y el uso de fotocatalizadores para mejorar la eficacia del tratamiento (Byrne *et al.*, 2011).

a. Reactor fotocatalítico solar

Un reactor fotocatalítico solar es un dispositivo que pone en contacto el agua contaminada con el catalizador utilizando la radiación solar (Figura 3). En ese sentido, la geometría del reactor debe garantizar que la radiación solar se recolecte de manera eficiente a lo largo de todo el sistema. Además, se debe controlar parámetros como la distribución de flujo, mezclado e interacción entre reactivos y catalizador, y transferencia de masa para que el proceso sea eficiente.

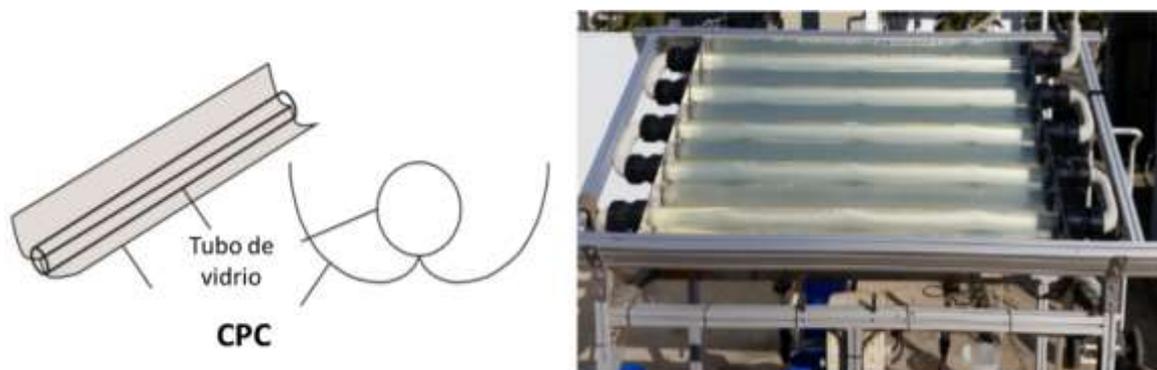


Figura 3: Modelos de reactores fotocatalíticos. Esquema de un reactor fotocatalítico con CPC (izquierda), fotografía de un reactor fotocatalítico solar en serie con CPC (derecha) (Byrne *et al.*, 2011; Aguas *et al.*, 2017).

Según Spasiano *et al.* (2015), el material con el que se construye el reactor debe poder transmitir la radiación solar y resistir el envejecimiento. Los materiales comunes que cumplen estos requisitos son los polímeros fluorados, acrílicos y varios tipos de vidrio. Por ejemplo, la empresa alemana Schott – Rohrglas GmbH, ha desarrollado un vidrio de borosilicato con un contenido de hierro de poco más de 50 mg.kg^{-1} , con lo que se ha logrado una notable transmisividad dentro del rango UV de más del 50 por ciento a 300 nm.

b. Fotocatalizador

Los fotocatalizadores son compuestos que por su cualidad semiconductor son capaces de transportar electrones cuando han sido excitados por alguna fuente de energía como la luz ultravioleta o solar.

El fotocatalizador puede utilizarse en suspensión acuosa o puede inmovilizarse sobre un sustrato sólido de soporte. La mayoría de los estudios han informado que los reactores de suspensión son más eficientes debido a la gran superficie disponible para las reacciones redox. Sin embargo, el principal inconveniente de utilizar nano o micropartículas en suspensión es el requisito de separación y reciclado posterior del catalizador, lo que puede hacer que el tratamiento sea más complejo y costoso. En consecuencia, los reactores de tratamiento que utilizan fotocatalizadores inmovilizados han ganado mayor atención (Rodríguez-Chueca *et al.*, 2014).

Existe una amplia gama de metodologías disponibles para la preparación de películas de fotocatalizador inmovilizado en una gama de sustratos soporte, y se requiere un diseño de reactor cuidadoso para evitar la pérdida de eficiencia debido a una reducción en el área superficial del catalizador y una transferencia deficiente de reactivos a la superficie del fotocatalizador (Polo-López *et al.*, 2014).

c. Concentrador parabólico compuestos

Los concentradores parabólicos compuestos (CPC) son colectores de baja concentración; es decir, la radiación no se concentra en un punto geométrico, sino que se distribuye más o menos de forma similar en una región (Figura 3). Este tipo de concentradores se utilizan principalmente en calentamiento de agua porque tienen la capacidad de concentrar la radiación solar directa y difusa, a pesar de mantenerse estáticos, alcanzándose una eficiencia térmica de hasta un 60 por ciento (Zheng *et al.*, 2016). Según Foster *et al.* (2010), el material idóneo para estos concentradores es el aluminio anodizado, el cual es altamente reflectivo para la radiación ultravioleta. El autor reporta, para el aluminio, una reflectancia del 92,3 por ciento a 280 nm y 92,5 por ciento a 385 nm; mientras que, para la plata es de 25,2 por ciento y 92,8 por ciento, respectivamente.

2.2.2 Fotocatálisis con óxido de titanio

Entre los fotocatalizadores semiconductores, el dióxido de titanio es uno de los candidatos más prometedores para aplicaciones solares comerciales, debido a su estabilidad fotoquímica y alto poder de oxidación (3,2 eV vs. NHE, que corresponde a fotones con una longitud de onda de 388 nm), alta resistencia a la fotocorrosión en ambientes acuosos, seguridad y menor costo que otros materiales fotocatalíticos (Polo-López *et al.*, 2014).

a. Mecanismo de acción

Cuando un semiconductor se irradia con luz de longitud de onda igual o mayor que su banda prohibida, un electrón (e^-) de la banda de valencia se excita a la banda de conducción, dejando un agujero positivo (h^+). Estos electrones fotogenerados y agujeros positivos impulsan la reducción y oxidación, respectivamente, de diferentes compuestos (Figura 4). El fuerte poder oxidante del agujero positivo puede permitir la oxidación electrónica del agua, presente en el sistema, produciendo radicales hidroxilos (HO), los cuales son especies altamente reactivas capaces de oxidar moléculas orgánicas en fase líquida o gaseosa. Además, el oxígeno puede actuar como un aceptor de electrones y ser reducido por los fotoelectrones en la banda de conducción para formar un ion superóxido, que también es un poderoso oxidante (Spasiano *et al.*, 2015).

En la mayoría de los estudios de desinfección fotocatalítica, se plantea que el radical hidroxilo es la principal especie responsable de la inactivación de microorganismos; sin embargo, en algunos documentos informan la participación de otras especies reactivas del oxígeno (ERO), como peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y superóxido (O_2^-). Estas especies reactivas pueden causar daño fatal a los microorganismos por disrupción de la membrana celular o por ataque de ADN y ARN. Además, se han propuesto otros modos de acción de la fotocatálisis con TiO_2 , incluido el daño al sistema respiratorio dentro de las células y la pérdida de la fluidez y el aumento de la permeabilidad de los iones en la membrana celular (Byrne *et al.*, 2010).

En ese sentido, Rincon y Pulgarin (2004) señalan que los estudios espectroscópicos atribuyeron la muerte celular a la peroxidación lipídica de la membrana celular bacteriana. Dicha peroxidación de los fosfolípidos insaturados contenidos en la membrana celular bacteriana da como resultado la pérdida de la actividad respiratoria y/o conduce a una pérdida de la fluidez y una mayor permeabilidad a los iones. Además, sugieren que el daño de la membrana celular puede abrir el camino para un mayor ataque oxidativo de los componentes celulares internos, lo que finalmente resulta en la muerte celular.

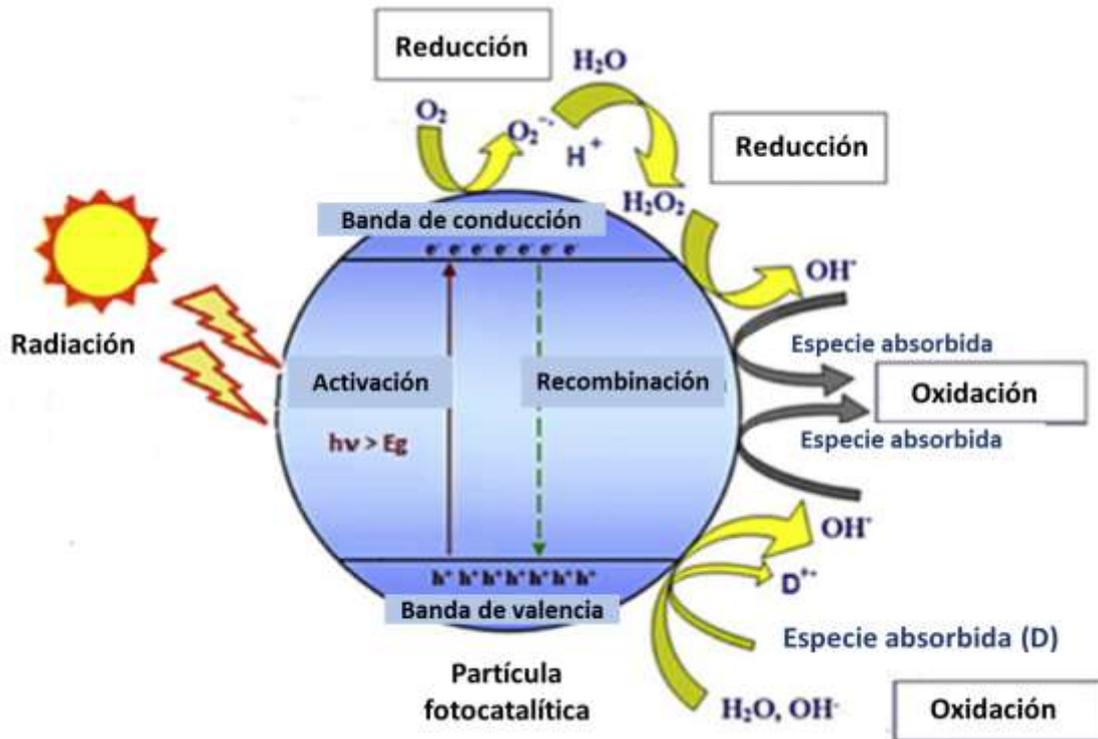


Figura 4: Representación esquemática del proceso fotocatalítico en una partícula de dióxido de titanio (Spasiano *et al.*, 2015)

b. Investigaciones anteriores

Matsunaga *et al.* informó la primera aplicación de fotocatalisis de TiO_2 para la inactivación de *Lactobacillus acidophilus*, *Saccharomyces cerevisiae* y *Escherichia coli* en 1985. Desde entonces, ha habido una gran cantidad de publicaciones de investigación relacionadas con la inactivación de microorganismos que incluyen bacterias, virus, protozoos, hongos y algas. Por ejemplo, *Candida albicans*, *Enterococcus faecium*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus*, *Streptococcus faecalis*, *Streptococcus muticans*, *Vibrio parahaemolyticus*, *Listeria monocytogenes* y *Cryptosporidium*, muchos de ellos resistentes a desinfectantes químicos, incluido el cloro (Wang *et al.*, 2013).

En el 2007, McCullagh *et al.* revisó la aplicación de la fotocatalisis para la desinfección de agua contaminada con microorganismos patógenos. En el 2009, Malato *et al.* publicó una extensa revisión sobre la descontaminación y desinfección del agua mediante fotocatalisis solar y, en el 2010, Dalrymple *et al.* revisó los mecanismos propuestos y los modelos cinéticos ampliamente utilizados en los estudios de desinfección fotocatalítica (Byrne *et al.* 2011). En el 2011, Chen *et al.* lograron inactivar 7 log de *E. coli* utilizando esfalerita (ZnS) expuesto a luz visible durante seis horas. En la figura 5 se muestra el proceso de destrucción

bacteriana a través del proceso fotocatalítico, el cual comienza desde la membrana celular y la pared celular hasta los componentes intracelulares.

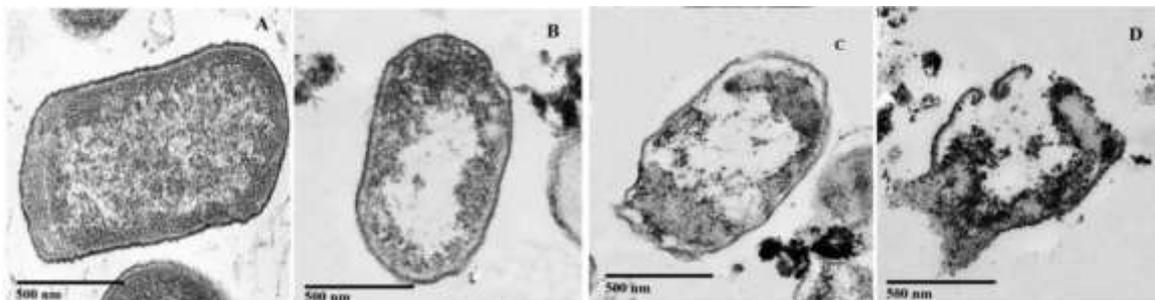


Figura 5: Micrografía electrónica de *E. coli* K-12 tratadas fotocatalíticamente bajo radiación solar. (A) 0, (B) 6, (C) 12, y (D) 30 horas (Chen *et al.*, 2011).

2.3 CULTIVO DE *Lactuca sativa* EN SISTEMAS HIDROPÓNICOS

2.3.1 Sistemas hidropónicos

La palabra hidroponía deriva del griego hidro (agua) y ponos (labor o trabajo) lo cual significa literalmente trabajo en agua. Beltrano (2015) define la hidroponía como un conjunto de técnicas que permite el cultivo y manejo de plantas en un medio que no necesita de suelo.

Entre los sistemas hidropónico que desarrolla el Centro de Investigación de Hidroponía y Nutrición Mineral (CIHNM) de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM) se encuentran el sistema de recirculación de solución nutritiva (NFT) y el sistema de raíz flotante.

El NFT consiste en la circulación constante de una lámina fina de solución nutritiva que pasa a través de las raíces del cultivo y no existe pérdida o salida al exterior de la solución nutritiva, por lo que se constituye en un sistema de tipo cerrado (Carrasco e Izquierdo, 1996). En el CIHNM este sistema presenta características particulares, por ejemplo, mantiene una altura de 2 cm de solución nutritiva en los canales de cultivo durante los períodos en que la solución nutritiva no circula. Además, la recirculación de la solución nutritiva se realiza por períodos de 15 minutos cada media hora y el encendido y apagado de la electrobomba se contrala con un programador o timer (Rodríguez y Chang, 2017)

En el sistema hidropónico de raíz flotante, se usan contenedores de 1 m x 1 m x 0.1 m forrados con una manga de polietileno de seis micras y las plantas están soportadas en una plancha de poliestireno (tecnopor) expandido. En el CIHNM, al igual que el sistema NFT,

este sistema presenta algunas variantes como por ejemplo se ha modificado la plancha de tecnopor para que no flote, y así evitar que la plancha se llene de algas cuando está en contacto con la solución nutritiva. Además, se ha reemplazado la plancha de tecnopor por una plancha de PVC ondulada, el cual es más resistente, dura más tiempo y es más fácil de lavar y desinfectar (Rodríguez y Chang, 2017).

En el cultivo hidropónico, los elementos minerales nutritivos esenciales son aportados exclusivamente por la solución nutritiva, a través de las sales fertilizantes que se disuelven en agua (Carrasco, 1997). Por esta razón la formulación y control de la solución junto a una adecuada elección de fuentes de sales solubles, se constituye en una de las bases para el éxito del cultivo.

En el CIHNM se ha desarrollado y se comercializa una solución concentrada de macronutrientes (solución A) y una solución de micronutrientes (solución B). La solución A contiene: nitrato de calcio, nitrato de potasio, nitrato de amonio, fosfato monopotásico, sulfato de magnesio; mientras que la solución B contiene: quelato de hierro, sulfato de manganeso, ácido bórico, sulfato de zinc, sulfato de cobre, molibdato de amonio. Para su uso se debe mezclar 5ml de solución A y 2 ml de solución B por cada litro de agua a preparar. Posteriormente, se debe ajustar los parámetros de conductividad y pH adecuados para cada cultivo.

2.3.2 Cultivo de lechuga hidropónica

La lechuga *Lactuca sativa* es una hortaliza que tiene una raíz que no sobrepasa los 25 cm de profundidad, es pivotante y con ramificaciones, las hojas están colocadas en roseta. El borde de los limbos puede ser liso, ondulado o aserrado, el tallo es cilíndrico y ramificado (Tarigo *et al.*, 2004). Se desarrolla adecuadamente en climas templados frescos, con temperaturas promedios comprendidos entre 13-18 °C; sin embargo, puede crecer en un rango de 7 y 24 °C, esta variación permite su cultivo durante todo el año (Goites, 2008)

La conductividad y pH son dos de los parámetros más importantes a la hora establecer un cultivo hidropónico. En ese sentido, Morgan al realizar una investigación con lechuga romana y lechuga mantecosa con una CE que oscilaba entre 1,5 y 5 mS/cm, concluyó que, si bien las plantas de lechuga pueden cultivarse a varios niveles de CE, los niveles que mejores resultados ofrecieron fueron los que oscilan de 2-3 mS/cm. Al respecto Howard nos recomienda que la CE se debe mantener entre los 1.5 y 2 mS/cm (Ramírez, 2017). Mientras que para Rodríguez y Chang (2017) la conductividad debe estar en un rango de 1,8-2,2

mS/cm. En cuanto al pH, Rodríguez y Chang (2017) nos recomiendan un rango de 6.0-6.5. Es importante señalar que, la composición de la solución nutritiva cambia con el transcurso de los días, ya que ciertos iones se absorben más rápidos que otros. Esta captación selectiva no solo agota ciertos iones, sino que también provoca cambios indeseables en el pH, por lo que se debe realizar mediciones regulares de conductividad y pH y, sí es necesario, realizar ajustes.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 LUGAR Y PERIODO DE EJECUCIÓN

La investigación se realizó en las instalaciones del Centro de Investigación de Hidroponía y Nutrición Mineral (CIHNM) y el Laboratorio de Fisiología de Biología de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), entre los meses de octubre del 2017 y julio del 2018.

3.2 MATERIALES

a. Material biológico

- Plantas de tomate con raíces agalladas por *M. incognita* proporcionadas por el invernadero de nematología de la UNALM
- Plántulas de lechuga var. Tropicana desarrolladas en el CIHNM
- Plántulas de lechuga hidropónica var. Tropicana donadas por el CIHNM

b. Material de trabajo

- Macetas de 1 kg de capacidad, arena de río y suelo de chacra
- Licuadora
- Tamices de 200 μm , 38 μm y 25 μm
- Placas Petri de plástico de 3 cm de diámetro y 0.5 cm de altura, tubo de PVC, malla tul y papel filtro
- Estilete
- Micropipeta de 100 μl
- Matraces Erlenmeyer de 1L, vaso de precipitados de 100 ml
- Mangueras de silicona
- Tubos de ensayo
- Pipetas de 5 y 10 ml
- Solución nutritiva La Molina
- Agua de riego de la UNALM
- Hipoclorito de sodio (lejía)

c. Equipos

- Cámara de desinfección y Concentrador Parabólico Compuesto, proporcionados por la Universidad de Lima (desarrollados en una investigación anterior)
- Multiparamétrico portátil (pH/CE) HANNA-HI991301
- Estereoscopio
- Termómetro de mercurio 0- 150 °C
- Agitador magnético CAT M5
- Bomba peristáltica Lead Fluid YZ15
- Módulos de sistema NFT y de raíz flotante con capacidad de 25 y 5 plantas c/u
- Estación meteorológica DAVIS Vantage PRO 2

3.3 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación se desarrolló en 3 etapas consecutivas como se muestra en el siguiente flujograma (Figura 6):

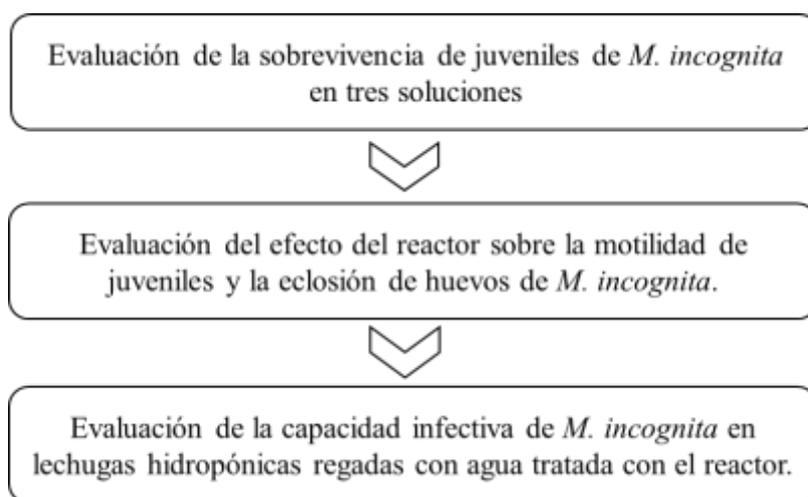


Figura 6: Flujograma de actividades

Un paso previo a la realización de los ensayos fue proliferar poblaciones de *M. incognita*, para ello, se prepararon 60 macetas de polietileno con suelo (esterilizado por vapor) y arena (lavada con agua de pozo) en una proporción de 2:1. Se trasplantó una plántula de lechuga, de 2 semanas de edad, en cada maceta, transcurrido 7 días se infestó cada plántula con aproximadamente 10 000 huevos de *M. incognita*, previamente extraídos de plantas de tomate con raíces agalladas. Finalizada esta etapa, 60 días después del trasplante, se obtuvo una fuente de inóculo suficiente para todos los ensayos posteriores.

3.3.1 Evaluación de la sobrevivencia de juveniles de *m. Incognita* en tres soluciones

a. Obtención de juveniles

Se colectaron cuidadosamente masas de huevos del sistema radical de las plantas de lechugas agalladas con la ayuda de un estilete. Estas masas fueron colocadas en cestos de PVC con una malla en la base y se colocaron en placas Petri con agua de pozo. Donde los juveniles emergieron de las masas de huevos y cayeron al fondo de la placa. Luego de 48 horas de instalado el ensayo, se colectaron todos los juveniles en un vaso de precipitados de 50 ml, para ello, se utilizando un tamiz de 38 μm y se completó con agua de pozo el volumen de vaso.

b. Ensayo de motilidad y evaluación

Se depositó aproximadamente 100 juveniles de *M. incognita*, con la ayuda de una micropipeta. en placas Petri con 5 ml de la solución para cada tratamiento. Dichos tratamientos fueron: agua de pozo, agua de riego y solución nutritiva. Mientras que, las evaluaciones fueron en cuatro tiempos: 0, 3, 6, 9 y 13 días como se muestra en la Tabla 1. Los tres tratamientos constaron de tres repeticiones, obteniéndose 9 unidades experimentales.

Tabla 1: Tratamientos y evaluaciones de la prueba de motilidad en tres soluciones

Tratamientos	Evaluaciones (días)				
	0	3	6	9	13
Agua de pozo (AP)	AP0	AP3	AP6	AP9	AP13
Agua de riego (AR)	AR0	AR3	AR6	AR9	AR13
Solución nutritiva (SN)	SN0	SN3	SN6	SN9	SN13

Las evaluaciones se realizaron con un estereoscopio, donde se registró el número de juveniles móviles, encontrados en cada placa Petri. Luego los resultados fueron expresados en porcentaje de juveniles móviles por días transcurridos en cada tratamiento.

3.3.2 Evaluación del efecto del reactor sobre la motilidad de juveniles y la eclosión de huevos de *M. incognita*

a. Instalación del reactor

Se instaló un reactor fotocatalítico en el CIHNM, como se muestra en la Figura 7, el cual consta de 8 componentes: una cámara de desinfección, un concentrador parabólico compuesto, un matraz Erlenmeyer de 1 litro, una bomba peristáltica; mangueras de silicona para conectar todo el sistema, un agitador magnético y un termómetro.

Además, la cámara de desinfección está conformado de un tubo de borosilicato (107 cm de largo y 2,6 cm de diámetro externo) y un mezclador estático de acero inoxidable 316L con un recubrimiento de TiO_2 , a partir de un sol-gel inmovilizado por “dip-coating” y calcinado a $450\text{ }^\circ\text{C}$ (Figura 8). La cámara de desinfección fue elaborada en una investigación anterior, dentro del proyecto “DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE REACTOR FOTOCATALÍTICO SOLAR DE ALTA TURBULENCIA CON NANOPARTÍCULAS DE TiO_2 INMOVILIZADAS EN ACERO PARA DESINFECCIÓN DE AGUA DE USO AGRÍCOLA”.

Así mismo, se instaló una estación meteorológica DAVIS Vantage PRO 2 al costado del Reactor, la cual registró datos como temperatura ambiental, radiación UV_{AB} (295–385 nm) y radiación solar total (ANEXO 1).

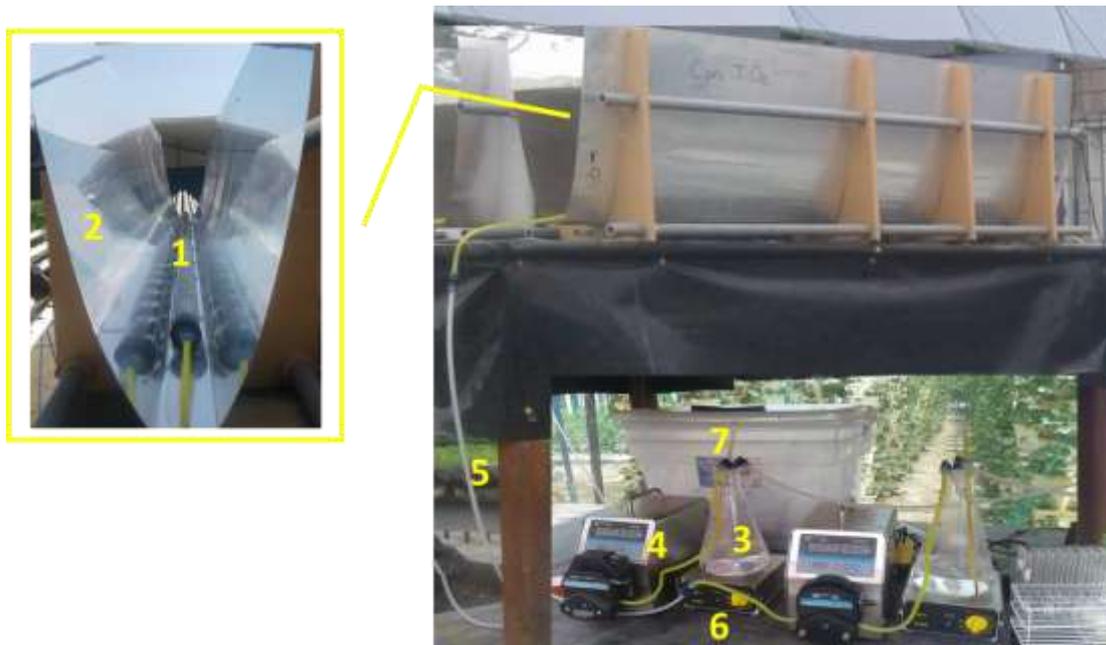


Figura 7: Reactor fotocatalítico. (1) tubo de borosilicato con mezclador estático, (2) CPC, (3) Erlenmeyer, (4) Bomba peristáltica, (5) Mangueras de conexión, (6) Agitador magnético, (7) Termómetro.



Figura 8: Cámara de desinfección. (1) Tubo de borosilicato, (2) Mezclador estático de acero con TiO₂, (3) tapón y manguera.

b. Evaluación del efecto del reactor sobre la motilidad de juveniles de *M. incognita*.

- **Instalación del ensayo**

Los ensayos se realizaron en tres días, el primer día se instaló dos reactores que funcionaron simultáneamente (A) bajo sombra. El segundo día dos reactores (B) bajo radiación solar sin TiO₂; y el tercer día dos reactores (C) bajo radiación solar con TiO₂. Las evaluaciones fueron cada 10 minutos, durante 70 minutos como se muestra en la Tabla 2.

(A) Bajo sombra: Reactor con TiO₂ inmovilizado en el mezclador de acero, bajo sombra

(B) Bajo radiación solar sin TiO₂: Reactor sin TiO₂, expuesto a la radiación solar

(C) Bajo radiación solar con TiO₂: Reactor con TiO₂ inmovilizado en el mezclador de acero, expuesto a la radiación solar

Se preparó 1 litro de agua de pozo con aproximadamente 10 000 J₂ de *M. incognita* (obtenidos en el punto 3.3.1-a) en el Erlenmeyer del Reactor obteniéndose 10 000 N/L (nematodos por litro) (Figura 7). Además, se ajustó los caudales a 8,3 ml/s (máxima capacidad de la bomba peristáltica) y se controló la temperatura entre 25-30 °C. Luego se hizo circular el agua durante 70 minutos, entre las 11:00 am y las 12:30 pm.

Tabla 2: Tratamientos y evaluaciones del ensayo de motilidad en el Reactor

Tratamientos	Evaluaciones (minutos)							
	0	10	20	30	40	50	60	70
Bajo sombra (A)	A0	A10	A20	A30	A40	A50	A60	A70
Bajo radiación solar sin TiO ₂ (B)	B0	B10	B20	B30	B40	B50	B60	B70
Bajo radiación solar con TiO ₂ (C)	C0	C10	C20	C30	C40	C50	C60	C70

- **Evaluación**

Se colectó una muestra de 10 ml de solución del Erlenmeyer, utilizando una pipeta. Se depositó en un tubo de ensayo asegurándose de enjuagar la pipeta a fin de recolectar todos los juveniles. Se llevó al laboratorio, donde se dejó reposar en un lugar oxigenado y oscuro durante 48 horas. Transcurrido dicho tiempo utilizando un estereoscopio se procedió a contar el número de juveniles que eran mótils y no mótils. Los resultados fueron expresados en nemátodos por litro (N/L) de juveniles mótils por tiempo de tratamiento y por cantidad de energía acumulada.

El cálculo de energía acumulada por unidad de volumen se realizó mediante la Eq1, propuesta por Polo-López *et al.* (2014):

$$\text{Eq1}$$

Donde y es la energía UV acumulada por litro (kJ L^{-1}) en los momentos n y $n-1$; I es la radiación incidente promedio en el área irradiada (W m^{-2}), t es el tiempo experimental (s), A es el área iluminada del colector (m^2) y V es el volumen total de agua tratada (L).

c. Evaluación del efecto del reactor sobre la eclosión de juveniles de *M. incognita*.

- **Instalación del ensayo**

Los ensayos se realizaron en tres días, el primer día se instaló dos reactores que funcionaron simultáneamente (A) bajo sombra. El segundo día dos reactores (B) bajo radiación solar sin TiO_2 ; y el tercer día dos reactores (C) bajo radiación solar con TiO_2 . Las evaluaciones fueron cada 20 minutos, durante 160 minutos como se muestra en la Tabla 3.

Se preparó 1 litro de agua de pozo con aproximadamente 10 000 huevos de *M. incognita* (obtenidos como se describe en el siguiente punto) en el Erlenmeyer del Reactor por lo que se obtuvo una concentración de 10 000 N/L (nemátodos por litro) (Figura 7). Además, se ajustó los caudales a 8,3 ml/s (máxima capacidad de la bomba peristáltica) y se controló la temperatura entre 25-30 °C. Luego se hizo circular el agua durante 160 minutos, entre las 11:00 am y las 2:40 pm.

Tabla 3: Tratamientos y evaluaciones del ensayo de eclosión utilizando el Reactor

Tratamientos	Evaluaciones (minutos)								
	0	20	40	60	80	100	120	140	160
Bajo sombra (D)	D0	D10	D20	D30	D40	D50	D60	D70	D80
Bajo radiación solar sin TiO₂ (E)	E0	E10	E20	E30	E40	E50	E60	E70	E80
Bajo radiación solar con TiO₂ (F)	F0	F10	F20	F30	F40	F50	F60	F70	F80

- **Obtención de huevos de *M. incognita***

Una vez obtenidas las raíces de plantas de lechuga agalladas por *M. incognita*, se procedió a lavarlas cuidadosamente para evitar que se desprendan las masas de huevos y se cortó en trozos de 1 cm de largo aproximadamente. Luego se licuó 150 g de raíces con 150 ml de una solución de hipoclorito de sodio al 0,5 por ciento durante 20 segundos. La solución obtenida fue filtrada por dos tamices de 200 μm y de 25 μm colocados uno encima del otro (en el orden mencionado), en el primer tamiz se separó los restos vegetales y en el segundo tamiz se colectó los huevos del nemátodo. Este proceso se realizó utilizando agua de caño a fin de enjuagar los huevos del hipoclorito de sodio utilizado en su extracción. Una vez enjuagado, se recolecto los huevos en un vaso de precipitados y se llevó a un volumen final de 100 ml con agua de pozo.

- **Evaluación**

Se colectó una muestra de 10 ml de solución del Erlenmeyer, utilizando una pipeta. Se depositó en un tubo de ensayo asegurándose de enjuagar la pipeta a fin de recolectar todos los huevos. Se llevó al laboratorio, donde se dejó reposar en un lugar oxigenado y oscuro durante 15 días. Transcurrido dicho tiempo utilizando un estereoscopio se procedió a contar el número de huevos que habían eclosionado y los que no (huevo). Los resultados fueron expresados en concentración de huevos eclosionados por tiempo de tratamiento y por cantidad de energía.

3.3.3 Evaluación de la capacidad infectiva de *m. Incognita* en lechuga hidropónica.

a. Instalación del ensayo

Una vez determinada la cantidad de energía necesaria para lograr una total inhibición de la eclosión de huevos de *M. incognita* en un litro de agua, se procedió a tratar 15 L de agua infestada con aproximadamente 150 000 huevos. Para ello, se utilizó dos reactores con TiO_2 expuestos a radiación solar y circuló el agua infestada durante 15 horas (entre 10 am y 3 pm).

Luego se instalaron los sistemas hidropónicos de módulo NFT y de recipiente de raíz flotante, como se muestra en la Figura 9. En estos sistemas se trasplantaron 25 y 5 lechugas hidropónicas en el NFT y Raíz flotante, respectivamente.

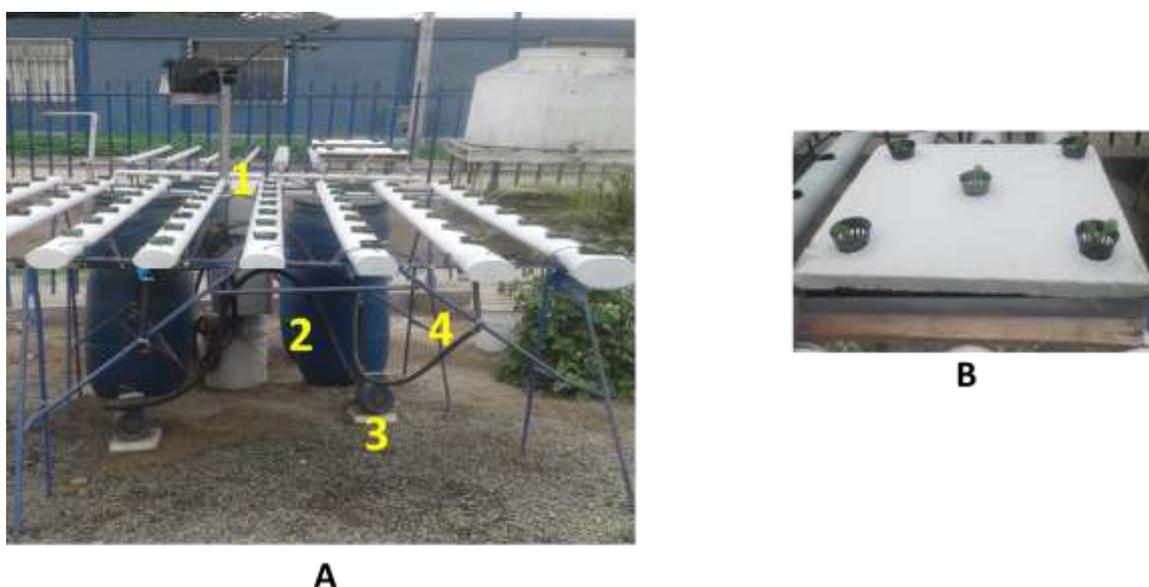


Figura 9: Sistemas hidropónicos. (A) de módulos NFT y (B) de recipientes de raíz flotante. (1) Macetas de lechuga, (2) tanque de almacenamiento de agua, (3) bomba de ½ HP, (4) mangueras de recirculación.

Luego, se utilizó 12.5 L y 2.5 L (lo que contenía aproximadamente 125 000 y 25 000 huevos) del agua tratada, en el sistema NFT y Raíz flotante, respectivamente. Se completó el volumen de solución requerido en cada sistema con agua de pozo y se hizo circular durante 3 días. Después de dicho tiempo se agregó la solución nutritiva “La Molina” para que las lechugas dispongan de los nutrientes necesarios para su crecimiento. Además, se monitoreó el crecimiento durante varias semanas hasta su evaluación.

b. Evaluación

Luego de transcurrido 45 días de instalado el ensayo se cosechó y realizó la evaluación de 4 parámetros: número de hojas, peso seco foliar y de raíz y grado de agallamiento de las raíces.

- Número de hojas: una vez cosechadas las lechugas se contabilizó el número de hojas mayores a 1 cm
- Grado de agallamiento: se asignó un grado dependiendo del porcentaje de agallamiento de la raíz, para ello se utilizó la escala Zeck (1971) que se detalla en la figura 11.
- Peso aéreo seco (gramos): se colocó las hojas y tallo dentro de una bolsa de papel y se dejó secar en una estufa a 60 °C durante 72 horas e inmediatamente después se procedió a pesar.
- Peso radicular seco (gramos): se colocó las raíces dentro de una bolsa de papel y se dejó secar en una estufa a 60 °C durante 72 horas e inmediatamente después se procedió a pesar.



Figura 10: Ensayos en sistema NFT y de raíz flotante. Luego de 45 días de ser instalados (izquierda) y su posterior cosecha (derecha).

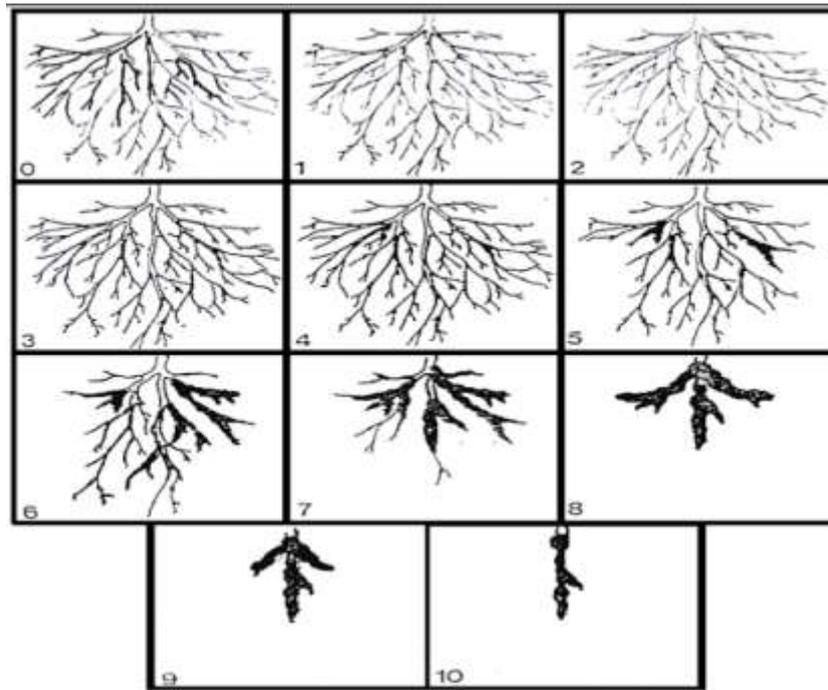


Figura 11: Escala de evaluación propuesta por Zeck para raíces infestadas por *Meloidogyne sp.* (Zeck, 1971).

Donde:

0= Sistema radicular completamente, no infestado

1=Muy pocos nódulos pequeños pueden detectarse.

2= Nódulos pequeños como en 1, en mayor número y fáciles de detectar.

3= Numerosos nódulos pequeños, algunos crecimientos juntos, no afectan seriamente la función de las raíces.

4= Numerosos nódulos pequeños y algunos grandes, la gran mayoría de las raíces funcionales.

5= 25% del sistema radicular seriamente nodulado y no funcional.

6= 50% del sistema radicular seriamente nodulado y no funcional.

7= 75% del sistema radicular seriamente nodulado y no funcional.

8= No hay raíces sanas alimentación de la planta interrumpida, planta aun verde.

9= Sistema radicular completamente nodulado y podrido, planta moribunda.

10= Planta y raíces muertas.

3.4 DISEÑO EXPERIMENTAL Y ANALISIS ESTADÍSTICO

El diseño experimental utilizado en el primer ensayo fue el diseño completamente al azar, cuyos resultados fueron evaluados mediante un análisis de varianza y una prueba de medias de comparación de Tukey con un nivel de significancia del 0.05 por ciento. En cuanto a los resultados obtenidos del ensayo de movilidad y eclosión en el reactor fueron evaluados mediante un análisis de varianza y pruebas t de Student para la comparación de las medias. Finalmente, en el ensayo hidropónico, se comparó las medias de los parámetros pesos secos y número de hojas mediante una prueba t de Student; mientras que, en el ensayo de la nodulación, dado que la escala de medida es muy diferente de la escala normal, se usó el equivalente no paramétrico, esto es, la prueba de Mann-Whitney.

El análisis estadístico se realizó utilizando el paquete estadístico InfoStat.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 EVALUACIÓN DE LA MOTILIDAD DE JUVENILES DE *M. incognita* EN TRES SOLUCIONES

4.1.1 Conductividad y pH de las soluciones

Los valores de pH y conductividad de las tres soluciones utilizadas: agua de pozo (AP), agua de riego (AR) y solución nutritiva (SN); se muestran en la Tabla 4. Donde se observa valores de pH cercanos al neutro; entre 6.2 y 7.6. La conductividad en AP y AR fueron muy cercanas y menores de 1 mS/cm; mientras que en la SN fue 2.2 mS/cm.

Tabla 4: Parámetros de pH y conductividad de tres soluciones: AP, AR y SN.

Parámetros	AP	AR	SN
pH	7.2	7.6	6.2
Conductividad (mS/cm)	0.7	0.7	2.2

4.1.2. Ensayo de motilidad

Se realizó una gráfica de puntos (Figura 12) de la media del porcentaje de juveniles de *M. incognita* que se mantuvieron mótiles, en los tres tratamientos vs. el tiempo transcurrido (en días). En la gráfica, se observa que no existen diferencias significativas entre las curvas de los tratamientos AP y AR, a excepción del día 13. Mientras que la curva de SN, decrece con una mayor pendiente, lo que indica que los juveniles pierden la movilidad en un menor número de días. Al finalizar el ensayo, el 100 por ciento de juveniles perdieron la motilidad en SN; mientras que, en AR y AP más del 50 por ciento mantuvieron la motilidad.

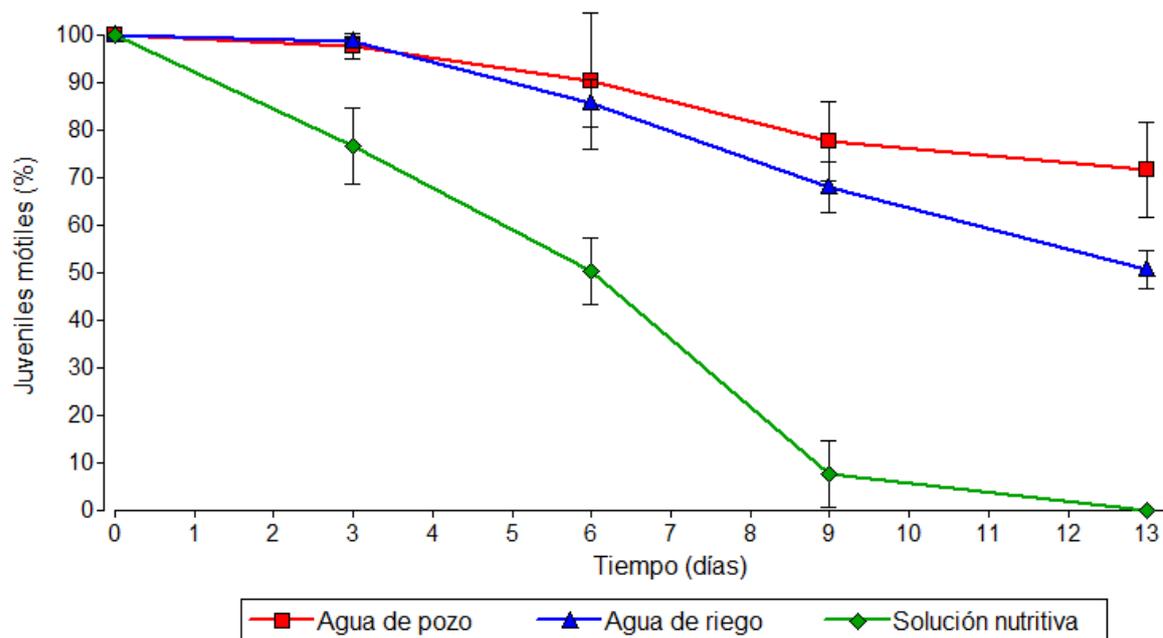


Figura 12: Gráfica del resultado del ensayo de motilidad de *M. incognita* en pocillos. Tres tratamientos: agua de pozo, agua de riego y solución nutritiva.

En una investigación, Wallace concluyó que los nematodos fitoparásitos no eran capaces de sobrevivir largos períodos de inmersión en agua, en ausencia de alimentos. Sin embargo, Moens y Hendrickx mostraron que *M. incognita* podía sobrevivir hasta 14 días en agua (ensayo en condiciones de laboratorio) y que además poseía capacidad infectiva (citados por Hugo y Malan, 2010). Esta última investigación es coherente con los resultados obtenidos en el presente ensayo; ya que, más del 50% de los J₂ mantuvieron su motilidad en AP y AR, luego de 13 días de iniciado el ensayo.

El porcentaje de J₂ móviles, en SN, disminuyó en un menor número de días, que en AP y AR. Esto se atribuye a una mayor concentración de sales, ya que en condiciones de estrés osmótico los J₂ son inducidos a la quiescencia. En dicho estado, las reservas de alimentos de los J₂ continúan siendo utilizadas, pero a velocidades mucho menores. Reversat (citado por Saire, 2017), indujo a la quiescencia a J₂ de *M. javanica* cuando los colocó en una solución con 17.5 g/L de NaCl. A pesar de que la concentración de sales utilizada por Reversat fue 12 veces mayor que la registrada en la SN, aproximadamente 1.4 g/L, se evidenció el efecto de dicha concentración en el transcurso de los días.

La no motilidad de los J₂, no necesariamente evidencia que el nematodo haya muerto. Sin embargo, al perder esta capacidad, el juvenil no podría moverse a través del suelo, migrar hacia la raíz de la planta huésped y finalmente penetrarla (Hugo y Malan, 2010).

4.2 EVALUACIÓN DE LA MOTILIDAD DE JUVENILES Y LA ECLOSIÓN DE HUEVOS DE *M. incognita* EN AGUA TRATADA EN EL REACTOR

4.2.1 Ensayo con juveniles

a. Motilidad vs tiempo

Se realizaron dos gráficas, la primera del ensayo sin TiO₂ y la segunda del ensayo con TiO₂. En las gráficas de puntos se observa los valores medios del número de nemátodos móviles por litro con sus respectivas desviaciones estándar versus el tiempo de tratamiento en el reactor. Además, en el eje Y secundario, se graficó la radiación UV_{AB} (295–385 nm) registrada en cada toma de muestra (Figura 13).

En el ensayo sin TiO₂, se inició con un valor aproximado de 9300 nemátodos por litro (N/L), luego de 10 minutos de iniciado el ensayo se registró aproximadamente 7600 N/L móviles, a los 20 minutos 3350 N/L, a los 30 minutos 850 N/L y finalmente a los 40 minutos el 100 por ciento de los juveniles perdió la motilidad. Por otro lado, en el ensayo con TiO₂, la curva inició con aproximadamente 9000 N/L móviles, a los 10 minutos aproximadamente el 7600 N/L mantuvo la motilidad, a los 20 minutos 4600 N/L, a los 30 minutos 1000 N/L y a los 40 minutos el 100 por ciento de los juveniles perdieron la motilidad. Además, en los primeros 40 minutos de tratamiento, la radiación UV_{AB} fluctuó entre 6.45 mW/cm² y 7.69 mW/cm² para el ensayo sin óxido de titanio. Mientras que, para el ensayo con óxido de titanio varió entre 7.98 mW/cm² y 7.55 mW/cm².

Los resultados obtenidos en los dos ensayos muestran un comportamiento similar de ambas curvas, con valores similares al inicio, a los 10 minutos, 30 minutos y 40 minutos de tratamiento, donde se logró una inhibición de la motilidad de aproximadamente el 100 por ciento de juveniles. Sin embargo, no es posible comparar con exactitud dichas curvas pues estos ensayos fueron realizados en diferentes días, lo que implica una radiación UV diferente para cada ensayo, a pesar de que la variación de radiación UV para ambos días fue similar.

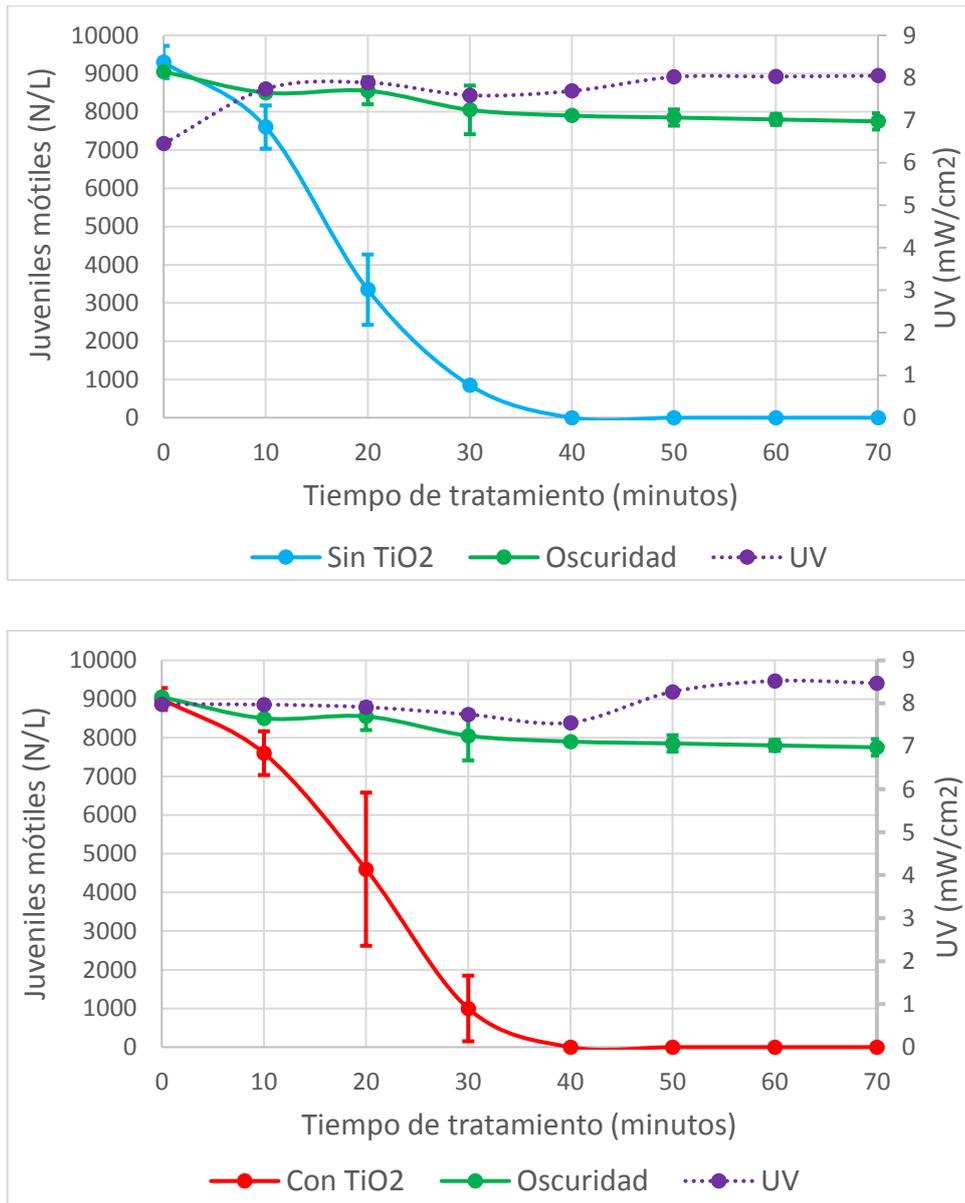


Figura 13: Gráficas del resultado de los ensayos de motilidad de *M. incognita* en el reactor. Reactor sin TiO₂ (superior) y con TiO₂ (inferior).

b. Motilidad vs energía acumulada

Como se mencionó en el párrafo anterior los experimentos con y sin TiO₂ fueron realizados en días diferentes, por lo que, se evaluó la motilidad en función de la energía acumulada por unidad de volumen (Q_{uv} , kJ L^{-1}) recibida en el Reactor (Figura 14). El Q_{uv} se usa comúnmente para comparar resultados en diferentes condiciones y se calcula como se detalla en la Eq. (1) descrita en la metodología.

En la Figura 14, se observa que la curva del ensayo sin TiO₂ está por debajo de la curva del ensayo con TiO₂; sin embargo, estas diferencias no son estadísticamente significativas (ver

barras de desviación estándar). Lo que indica que bajo las condiciones experimentales realizadas no se evidenció que el dióxido de titanio disminuya la cantidad de energía ni el tiempo de tratamiento empleados en comparación con el reactor sin TiO₂. Además, ambos tratamientos llegaron a inhibir la motilidad del 100 por ciento de los juveniles de *Meloidogyne* con energías acumuladas muy cercanas, 54 kJ/L para el reactor sin óxido y 56 kJ/L para el reactor con óxido.

Las posibles razones por las que el efecto del dióxido de titanio no se evidenció radican principalmente en el diseño del reactor, en la cantidad de TiO₂ utilizado en la inmovilización o en el escalamiento de laboratorio a campo.

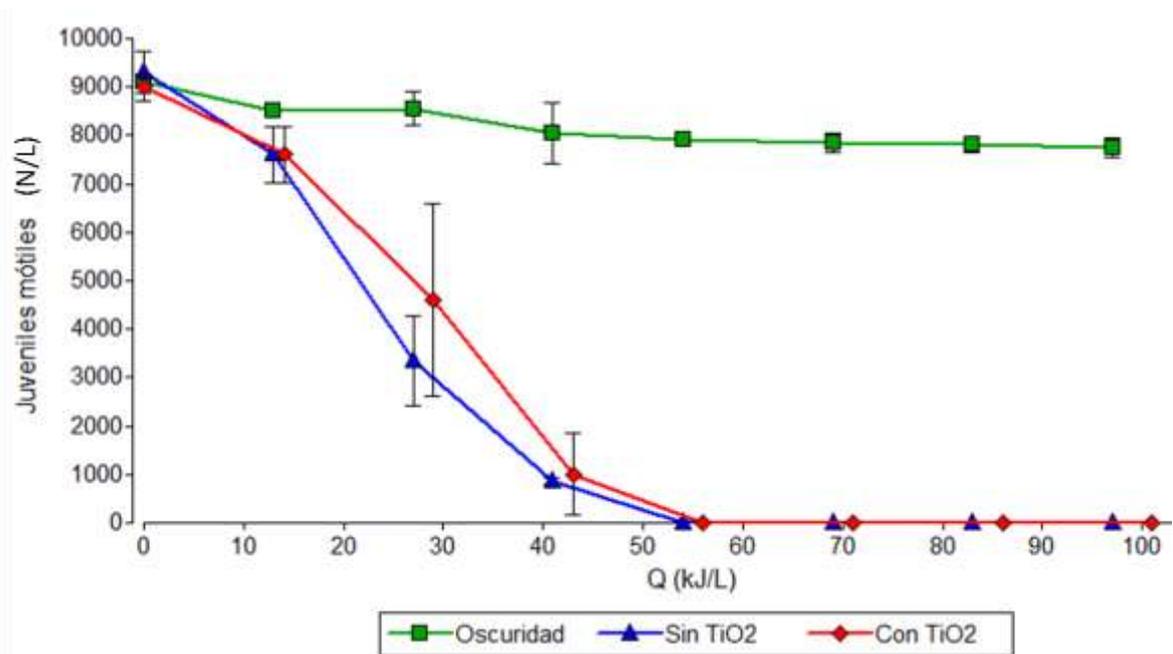


Figura 14: Gráfica de *M. incognita* móviles (N/L) vs la cantidad de energía solar acumulada (kJ/L). Reactor sin TiO₂, con TiO₂ y en oscuridad.

Al no evidenciarse la acción fotocatalítica del TiO₂, pero sí la acción producida por la radiación UV, a continuación, se describirá este mecanismo.

La radiación solar UV_B es absorbida en parte por la capa de ozono, mientras que la UV_A representa el fragmento principal de radiación solar que llega a la superficie de la Tierra. La radiación UV_A tiene la capacidad de atravesar el vidrio y penetra hasta las capas más profundas de la dermis, donde genera especies reactivas del oxígeno (ROS); por ejemplo, radical superóxido, peróxido de hidrógeno o radical hidroxilo. Los daños oxidativos se generan a partir de modificaciones específicas de aminoácidos y escisión de péptidos hasta

la pérdida de función enzimática. Además, causan peroxidación de lípidos lo cual interrumpe la fluidez de la membrana, y los productos de degradación pueden iniciar la apoptosis en las mitocondrias (Lopez-Martinez *et al.*, 2008).

La capa más externa de *Meloidogyne* está compuesta por una matriz de colágeno cubierta por una capa exterior (epicutícula) compuesta principalmente por glicoproteínas y otras proteínas asociadas a la superficie (Decraemer y Hunt, 2013). Por lo que fundamentalmente esta estructura es dañada por la radiación UV_A.

Por otro lado, las células de la dermis de organismos que viven expuestos a la radiación solar tienen antioxidantes enzimáticos endógenos (por ejemplo: superóxido dismutasa o catalasa) y antioxidantes no enzimáticos (por ejemplo, coenzima Q₁₀, glutatión o vitamina E), que brindan protección contra las ROS. Pero en el caso de *Meloidogyne* que, viven en oscuridad (raíces) no posee antioxidante que respondan a estos agentes oxidantes (Stiefel y Schwack 2015).

En cuanto a los rayos UV_B de onda corta, ricos en energía, actúan principalmente en la epidermis, causando un fuerte daño sobre las células superficiales y al material genético. Provoca daños directos en el ADN y el ARN y conduce a la generación de dímeros de ciclobutano pirimidina timino-timino (TT-DPC) y aductos de (6-4) pirimidina-pirimidina. Los fotoproductos del ADN se pueden escindir y reemplazar por diferentes enzimas de reparación endógenas (endonucleasas específicas), que restauran la estructura original. Sin embargo, si los mecanismos de reparación fallan o el daño es demasiado extenso, se inicia la apoptosis (Stiefel y Schwack, 2015).

4.2.2 Ensayo con huevos

a. Eclosión vs tiempo

Se realizó dos gráficas, una del ensayo sin TiO₂ (Figura 15 superior) y el otro del ensayo con TiO₂ (figura 15 inferior), cada uno con el reactor control (en oscuridad) versus el tiempo transcurrido de tratamiento. En la gráfica de puntos se observa los valores de las medias de las dos repeticiones con su respectiva desviación estándar. Además, en el eje Y secundario, se graficó la radiación UV_{AB} (295–385 nm) registrada en cada toma de muestra.

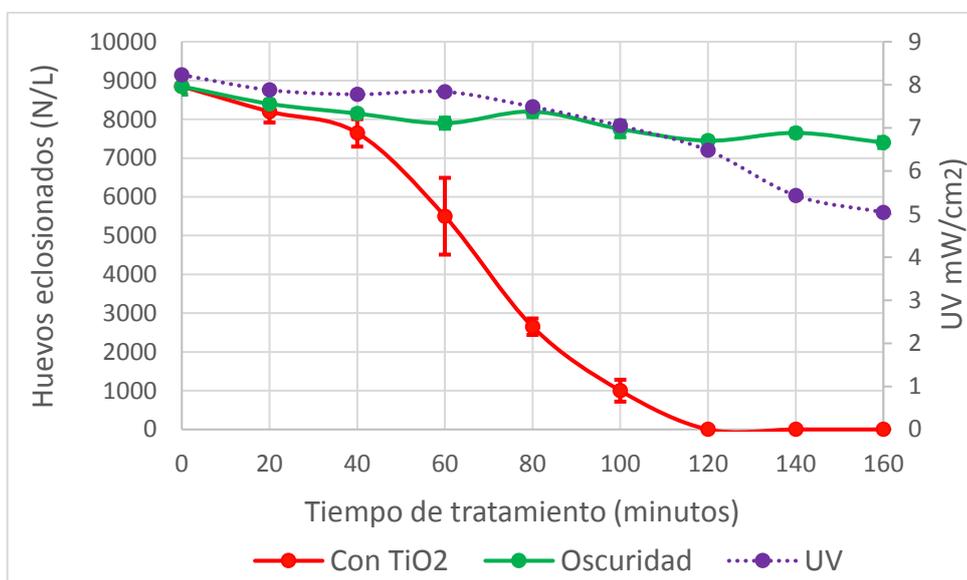
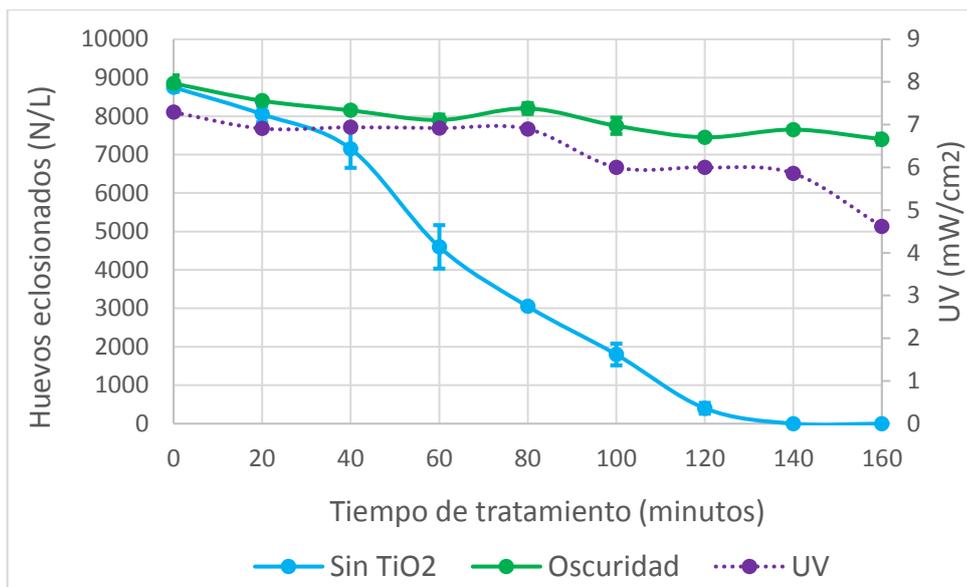


Figura 15: Gráficas del resultado de los ensayos de eclosión de *M. incognita* con el reactor. Reactor sin TiO₂ (superior) y con TiO₂ (inferior).

La Figura 15 (superior), muestra que en el tiempo 0 eclosionaron 8750 N/L de huevos. Luego de 20 minutos de tratamiento eclosionaron 8050 N/L, a los 40 minutos 7150 N/L, a los 60 minutos 4600 N/L, a los 80 minutos 3050 N/L, a los 100 minutos 1800 N/L, a los 120 minutos 400 N/L y a los 140 minutos se inhibió el 100 por ciento de la eclosión. Mientras que, la radiación UV_{AB}, fluctuó entre 7.29 mW/cm² y 5.86 mW/cm² en los primeros 140 minutos del ensayo.

En la Figura 15 (inferior), se observa que en el tiempo 0 eclosionaron 8850 N/L de huevos, a los 20 minutos 8200 N/L, a los 40 minutos 7650 N/L, a los 60 minutos 5500 N/L, a los 80

minutos 2650 N/L, a los 100 minutos 1000 U/L y a los 120 minutos se inhibió el 100 por ciento de la eclosión. Mientras que, en los 120 primeros minutos la radiación UV_{AB} registrada varió entre 8.23 mW/cm^2 y 6.48 mW/cm^2 . Un rango mayor al registrado en el ensayo anterior, es por ello que en este ensayo se logró la inhibición total en 20 minutos antes.

b. Eclosión vs energía acumulada

Al igual que en el ensayo de motilidad, los experimentos se realizaron en días diferentes. Por lo que, para comparar el efecto del TiO_2 , se evaluó la eclosión en función de la energía acumulada por unidad de volumen (Q_{UV} , kJ L^{-1}) recibida en el Reactor.

En la Figura 16, se observa que la curva del reactor sin TiO_2 está por debajo que la del reactor con TiO_2 ; sin embargo, no son significativamente diferentes (barras de desviación estándar). Ambas curvas llegan a 0 N/L de huevos eclosionados con energías acumuladas similares 166 kJ/L para el reactor sin óxido y 163 kJ/L para el reactor con óxido. En ese sentido, se concluye que en las condiciones experimentales que se llevó a cabo el experimento no se evidencian diferencias estadísticamente significativas en la inhibición de la eclosión de huevos de *Meloidogyne* por acción del óxido de titanio.

El daño causado por la radiación UV, fue descrita en el ensayo de motilidad. Por lo que, en este punto se describirá el posible efecto de protección que puede ejercer el TiO_2 sobre *Meloidogyne*.

En un estudio realizado por Moriyama *et al.* (2018) se evaluó el efecto de nanopartículas de TiO_2 sobre *Saccharomyces cerevisiae*. Los resultados mostraron que las células de levadura que estuvieron en contacto con el TiO_2 bajo radiación UV sufrieron menos estrés oxidativo, que las expuestas sin TiO_2 . Por lo tanto, se llegó a la conclusión de que el papel de las nanopartículas de TiO_2 en las levaduras bajo radiación UV es protegerlas frente a dicha radiación.

Los resultados del ensayo de motilidad y de eclosión muestran que las curvas con TiO_2 estuvieron por encima de las curvas sin TiO_2 (Figura 14 y 16). Ello evidencia que el TiO_2 ejerció un papel de protección sobre los juveniles y huevos de *Meloidogyne*, bajo radiación solar. Lo cual es coherente con la investigación realizada por Moriyama, donde el dióxido de titanio tiene la capacidad de absorber la radiación UV.

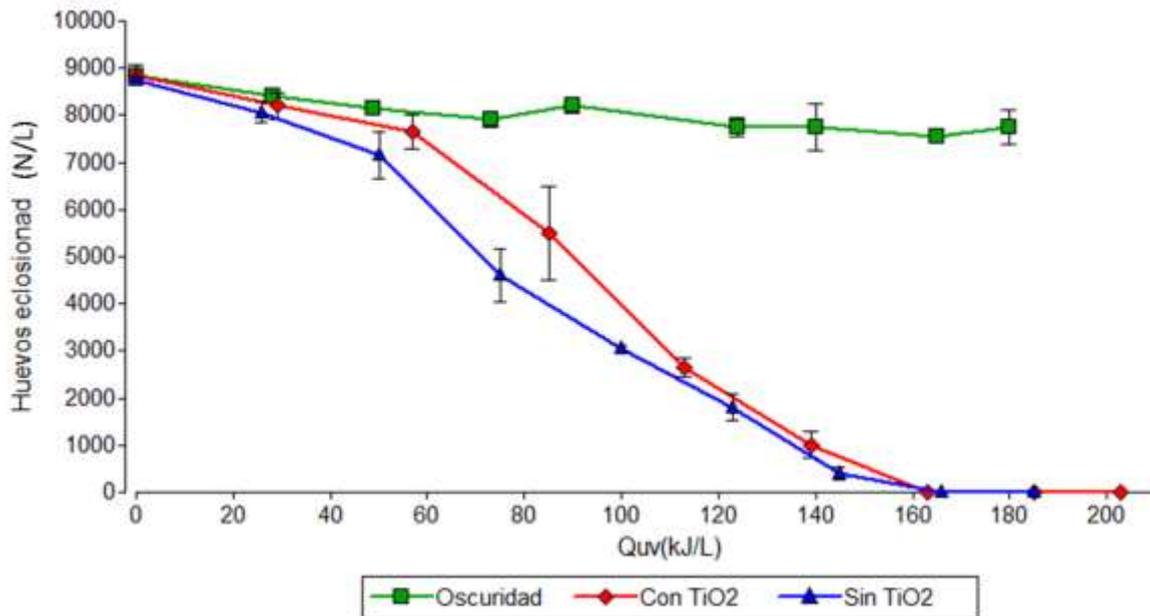


Figura 16: Gráfica de huevos eclosionados (N/L) vs cantidad de energía solar acumulada (kJ/L). Reactor sin TiO₂, con TiO₂ y en oscuridad.

4.3 EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD INFECTIVA DE *M. incognita* EN LECHUGAS HIDROPÓNICAS.

4.3.1 Sistema NFT

En el sistema NFT se evaluó los parámetros de peso aéreo seco, peso seco de raíz, número de hojas y grado de nodulación o agallamiento en 25 lechugas que utilizaron agua tratada con el reactor fotocatalítico y 25 lechugas que utilizaron agua sin tratamiento (control) (Figura 17).

En el parámetro peso aéreo seco se registró un valor promedio de 9 g para las lechugas que utilizaron el agua tratada y 7,16 g para el control. Mientras que, en el parámetro peso seco de la raíz, el ensayo de agua tratada registró un valor del 1,76 g y el control 1,44 g. A diferencia del parámetro número de hojas, donde los valores fueron muy cercanos, para el agua tratada un valor de 24,34 y para el control 24,2. Finalmente, en el parámetro grado de nodulación o agallamiento se registró 0,52 para el agua tratada y 3,68 para el control.

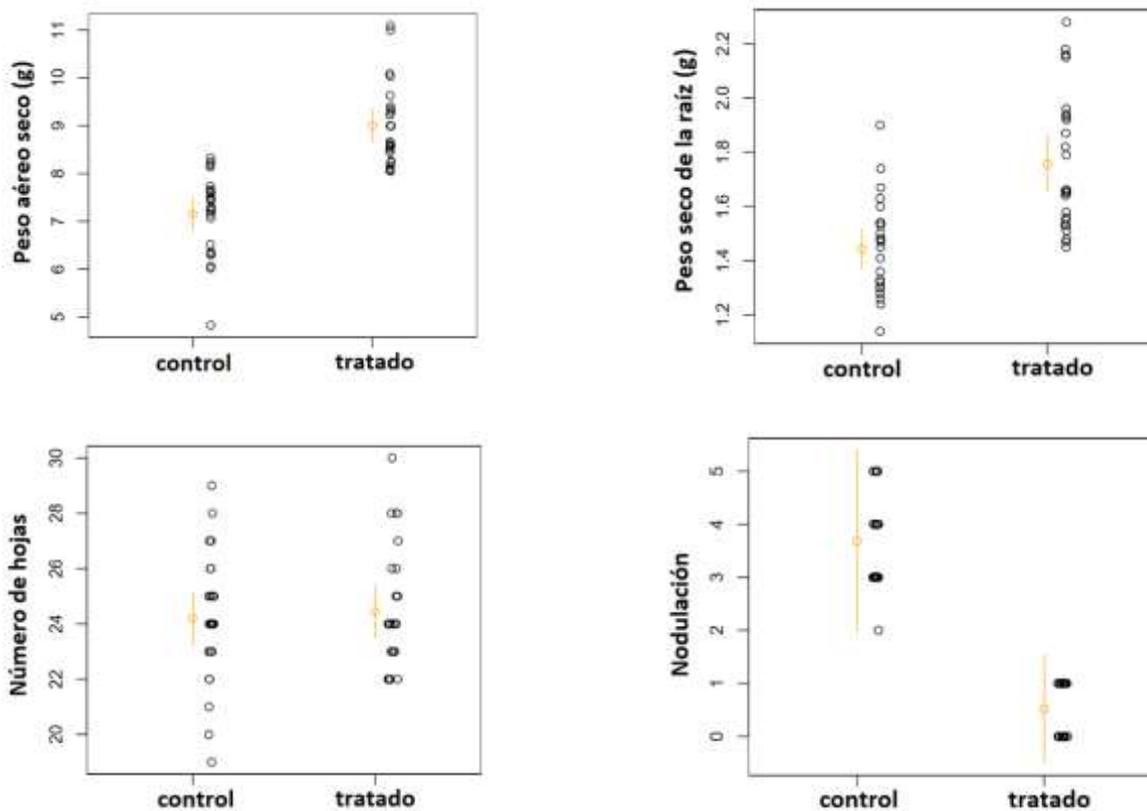


Figura 17: Gráficas de los resultados del ensayo con lechugas hidropónicas en sistema de módulos NFT. Cajas con medias y límites de confianza del 95%, del peso aéreo seco, peso seco de la raíz, número de hojas y nodulación.

La reducción de peso tanto del área foliar como de la raíz, en las lechugas que utilizaron agua no tratada, es consecuencia del ingreso de *Meloidogyne* a la planta, ya que ellos ingresan al sistema radicular y forman agallas o nudos, lo cual obstruye la absorción de agua y nutrientes de manera eficiente por los tejidos vasculares (Escobar *et al.*, 2015). Mientras que, las lechugas que utilizaron agua tratada con el reactor registraron un agallamiento cercano a 0, lo que se evidenció en un mayor peso de hojas y raíz.

4.3.2 Sistema raíz flotante

En el sistema raíz flotante, al igual que en el sistema NFT, se evaluó los parámetros de peso aéreo seco, peso seco de raíz, número de hojas y grado de nodulación en 5 lechugas que utilizaron agua tratada con el reactor fotocatalítico y 5 lechugas que utilizaron agua sin tratamiento (control) (Figura 18).

En el parámetro peso aéreo seco se registró un valor promedio de 8,06 g para las lechugas que utilizaron el agua tratada y 6,7 g para el control. Mientras que, en el parámetro peso seco de la raíz, el ensayo de agua tratada registró un valor del 1,64 g y el control 1,23 g. En el

caso del parámetro número de hojas, se registró un valor de 27 para el agua tratada y 25 para el control. Finalmente, en el parámetro grado de nodulación se registró 0,6 para el agua tratada y 4,2 para el control.

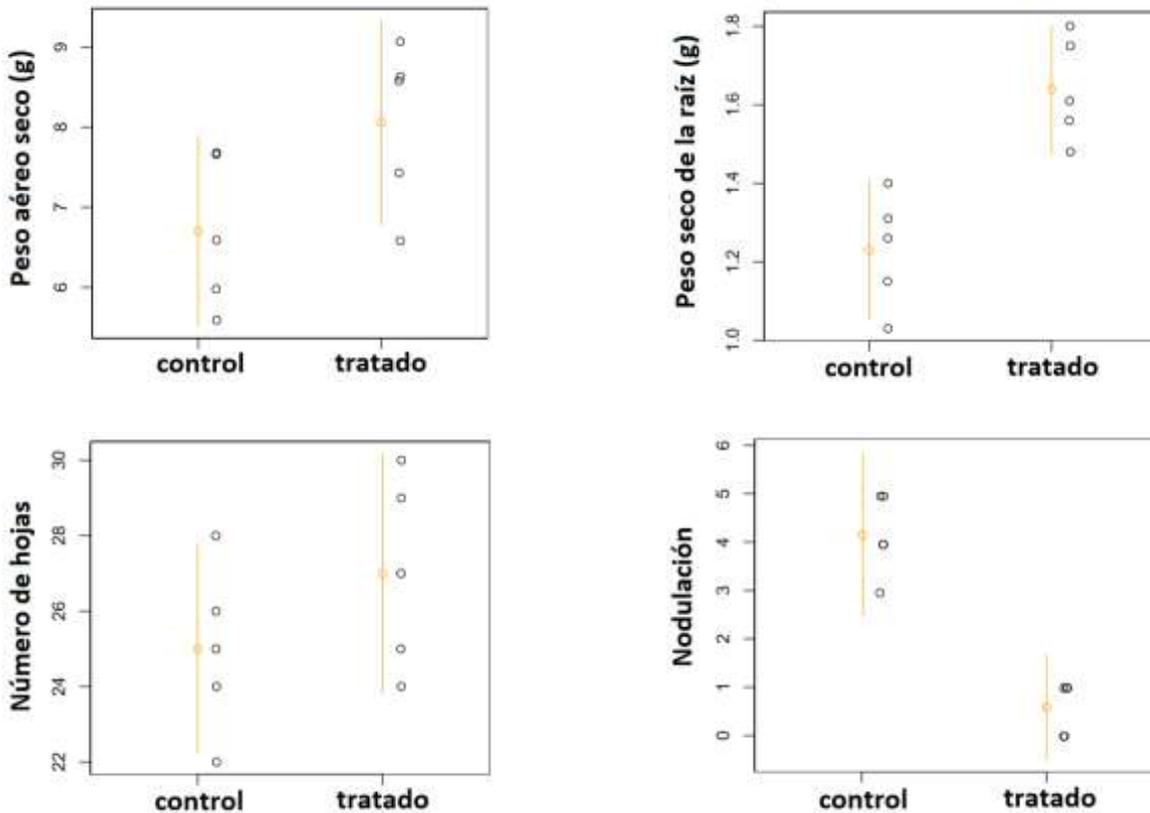


Figura 18: Gráficas de los resultados del ensayo lechugas hidropónicas en sistema de recipiente de raíz flotante. Cajas con medias y límites de confianza del 95%, del peso aéreo seco, peso seco de la raíz, número de hojas y nodulación.

Los resultados obtenidos bajo el sistema de recipiente de raíz flotante no coinciden del todo con los mismos obtenidos bajo el sistema de módulos NFT debido a que son sistemas diferentes y a que se evaluó un menor número de plantas. A pesar de ello, estadísticamente los resultados son similares para los parámetros peso seco de la raíz y agallamiento. Por lo que, a partir de ambos ensayos se puede afirmar lo siguiente:

- Hay evidencia de que el promedio del peso seco de la raíz de la planta regada con el agua tratada es mayor que el control en un 27,5 por ciento aproximadamente.
- No hay evidencia de que el número promedio de hojas de la planta regada con el agua tratada sea mayor que el control.
- Hay evidencia de que la nodulación es menor en la planta regada con el agua tratada que en el control, en por lo menos 3 grados aproximadamente.

V. CONCLUSIONES

- Los juveniles de *M. incognita* son capaces de sobrevivir largos períodos de inmersión en agua, en ausencia de alimentos.
- El reactor solar de fotocátalisis logró inhibir la motilidad de la totalidad de juveniles de *Meloidogyne incognita* luego de un tratamiento de 40 minutos o 56 kJ/L de energía solar acumulada.
- Se logró la inhibición de la eclosión de la totalidad de huevos de *M. incognita* luego de dos horas de tratamiento o 166 kJ/L de energía solar acumulada, utilizando el reactor fotocatalítico.
- El tratamiento del agua con el reactor disminuyó significativamente la capacidad infectiva de *M. incognita* sobre cultivos hidropónicos de lechuga, incrementando alrededor del 20 por ciento de su peso seco de raíz.
- No se ha determinado diferencias significativas al tratar el agua infestada de nemátodos con el reactor con óxido de titanio o sin dicho fotocatalizador en la motilidad y eclosiones de huevos de *M. incognita*.

VI. RECOMENDACIONES

- Realizar ensayos con el prototipo de reactor variando algunos parámetros como: mayor concentración de nematodos iniciales y mayor caudal de trabajo.
- Evaluar la eficiencia costo-beneficio de la utilización de un reactor fotocatalítico solar versus un reactor sin catalizador.

VII. BIBLIOGRAFÍA

- Abad, P., Castagnone-Sereno, P., Rosso, M.N., De Almeida, J. & Favery, B. (2009). Invasion, feeding and development. In Perry, RN; Moens, M; Starr, JL. eds. Root-knot Nematodes. London, UK. CAB International. p.163-176.
- Aguas, Y., Hincapie, M., Fernández-Ibañez, P. & Polo-López, M. (2017). Solar photocatalytic disinfection of agricultural pathogenic fungi (*Curvularia* sp.) in real urban wastewater. *Science of the Total Environment*. p. 607–608. 1213–1224
- Beltrano, J. (2015). Cultivo en hidroponía. Editorial de la Universidad De La Plata. Argentina.
- Byrne, A., Fernandez-Ibañez, P., Dunlop, P., Alrousan, D. & Hamilton, J. (2011). Photocatalytic Enhancement for Solar Disinfection of Water: A Review, *International Journal of Photoenergy*. 798051. p 12.
- Carrasco, G. & Izquierdo, J. (1996). La empresa hidropónica de mediana escala: La técnica de la solución nutritiva recirculante (NFT). Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. Editorial Universidad de Talca.
- Carrasco, G. (1997). La técnica de la solución nutritiva recirculante. Curso-taller Internacional de Hidroponía: Hidroponía una esperanza para Latinoamérica.1996. Lima- Perú. CIHNM-UNALM. p 77-82
- Chen, Y., Lu, A., Li, Y., Zhang, L., Yip, H., Zhao, H., An, T. & Wong, P. (2011). Naturally occurring sphalerite as a novel cost-effective photocatalyst for bacterial disinfection under visible light. *Environ. Sci. Technol.* 45. p 5689-5695.
- Chitwood, D. & Perry, R. (2009). Reproduction, Physiology and Biochemistry. In Perry, RN; Moens, M; Starr, JL. eds. Root-knot Nematodes. London, UK. CAB International. p. 182-194.
- Decraemer, W. & Hunt, D. (2013). Structure and classification. In R. Perry, N; Moens, M. Wallingford, UK. eds *Plant Nematology*. p 3-39.

- Eisenback, J.D. (1985). Detailed morphology and anatomy of second-stage juveniles, males and females of the genus *Meloidogyne* (root-knot nematodes). Department of Plant Pathology North Carolina State University Raleigh, North Carolina, USA. *Meloidogyne Morphology and Anatomy*. p. 47-77.
- Escobar, C., Barcala, M., Cabrera, J. & Fenoll, C. (2015). Overview of Root-Knot Nematodes and Giant Cells. Laboratory of Plant Physiology, Department of Environmental Sciences, Universidad de Castilla-La Mancha, Toledo, Spain. *Advances in Botanical Research*. 73:1. p. 1-32.
- Evans, A. & Perry, R. (2009). Survival mechanisms. In Perry, RN; Moens, M; Starr, JL. eds. *Root-knot Nematodes*. London, UK. CAB International. p.201-219.
- Foster, R., Ghassemi, M. & Cota, A. (2010). *Solar Energy – Renewable Energy and the Environment*, New Mexico State University, CRC Press Taylor & Francis Group.
- Goites, E. (2008). Manual de cultivos para la Huerta Orgánica Familiar. Buenos Aires: Inst. Nacional de Tecnología Agropecuaria – INTA. Huerta Orgánica. Ed. Lit. II. 634. 136 p.
- Hugo, H. & Malan, A. (2006). Literature Study on Control of Nematodes in Irrigation Water.
- Hugo, H. & Malan, A. (2010). Occurrence and Control of Plant-parasitic Nematodes in Irrigation Water – A Review. *S. Afr. J. Enol. Vitic.*, 31 :2. p. 169-180
- Jones, J., Haegeman, A., Danchin, E., Gaur, H., Helder, J., Jones, M., Kikuchi, T., Manzanilla-Lopez, R., Palomares-Rius, J., Wesemael, W. & Perry, R. (2013). Top 10 plant-parasitic nematodes in molecular plant pathology. *Mol. Plant Pathol.* 14. p. 946-961.
- Lopez-Martinez, G., Elnitsky, M., Benoit, J., Lee, R. & Denlinger, D. (2008). High resistance to oxidative damage in the Antarctic midge *Belgica antarctica*, and developmentally linked expression of genes encoding superoxide dismutase, catalase and heat shock proteins. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*. 38:8. p. 796-804.
- Malato, S., Fernández-Ibáñez, P., Maldonado, M.I., Blanco, J. & Gernjak, W. (2009). Decontamination and disinfection of water by solar photocatalysis: recent overview and trends. *Catalysis Today*. 147:1. p. 1–59.

- Moens, M., Perry, R.N. & Starr, J.L. (2009). Meloidogyne Species – a Diverse Group of Novel and Important Plant Parasites. IN Perry, RN; Moens, M; Starr, JL. eds. Root-knot Nematodes. London, UK. CAB International, p.1-13.
- Moriyama, A., Yamada, I., Takahashi, J. & Iwahashi, H. (2018). Oxidative stress caused by TiO₂ nanoparticles under UV irradiation is due to UV irradiation not through nanoparticles, *ChemicoBiological Interactions*.
- Polo-López, M., Castro-Alfárez, M., Oller, I. & Fernández-Ibáñez, P. (2014). Assessment of solar photo-Fenton, photocatalysis, and H₂O₂ for removal of phytopathogen fungi spores in synthetic and real effluents of urban wastewater. *Chem. Eng. J.* 257. p. 122–130.
- Rincón. A. & Pulgarin, C. (2004). “Field solar E. coli inactivation in the absence and presence of TiO₂: is UV solar dose an appropriate parameter for standardization of water solar disinfection. *Solar Energy.* 77:5. p. 635–648.
- Rodríguez, A.S. & Chang, M. (2017). Curso Internacional de Hidroponía.CIHNM.
- Rodríguez-Chueca, J., Polo-López, M., Mosteo, R., Ormad, M. & Fernández-Ibáñez, P. (2014). Disinfection of real and simulated urban wastewater effluents using a mild solar photo-Fenton. *Appl. Catal. B Environ.* p. 150–151, 619–629.
- Saire, L. (2017). PRODUCTOS QUÍMICOS ALTERNATIVOS E INGREDIENTES ACTIVOS COMERCIALMENTE NUEVOS PARA EL CONTROL DE Meloidogyne incognita EN TOMATE EN INVERNADERO. UNALM
- Singh, S., Singh, B. & Singh, A.P. (2015). Nematodes: a threat to sustainability of agriculture. *Procedia Environmental Sciences.* 29. p. 215–216.
- SODIS Newsletter. (2010). Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology. No. 1.
- Spasiano, D; Marotta, R., Malato, S., Fernandez-Ibáñez, P. & Di Somm, I. (2015). Solar photocatalysis: Materials, reactors, some commercial, and pre-industrialized applications. A comprehensive approach. *Applied Catalysis B: Environmental* 170-171. p. 90–123
- Steinbrecht, W., Claude, H., Schönenborn, F., McDermid, I.S., Leblanc, T. & Godin-Beekman, S. (2009). Ozone and temperature trends in the upper stratosphere at

- five stations of the Network for the Detection of Atmospheric Composition Change. *Int J Rem Sens.* 30. p. 15-16.
- Stiefel, C. & Schwack, W. (2015). Photoprotection in changing times – UV filter efficacy and safety, sensitization processes and regulatory aspects. *International Journal of Cosmetic Science.* 37. p 2–30.
- Talavera, M; Sayadi, S., Chiroso-Ríos, M., Salmerón, T., Flor-Peregrín, E. & Verdejo- Lucas, S. (2012). Perception of the impact of root-knot nematode-induced diseases in horticultural protected crops of southeastern Spain. *Nematology.*14. p. 517–527.
- Tarigo, A; Repetto, C. & Acosta, D. (2004). Evaluación Agronómica de Biofertilizantes en la Producción de Lechuga (*Lactuca sativa*) a Campo. Tesis Ing. Quim. Org. Santiago de Querétaro, MX, UAQ. 51 p.
- Vera, N. (2014). TÉCNICA MOLECULAR DE PCR PARA IDENTIFICAR LAS PRINCIPALES ESPECIES DE MELOIDOGYNE SPP. PROVENIENTE DE PERÚ. Tesis de Maestría en Fitopatología. Lima, Perú, UNALM. 92 p.
- Wang, K. & McSorley, R. (2008). Exposure Time to Lethal Temperatures for Meloidogyne incognita Suppression and Its Implication for Soil Solarization. *Journal of Nematology* 40:1. p. 7–12.
- Wang, W; Yu1, J. & Wong, P. (2013). Photocatalysts for Solar-Induced Water Disinfection: New Developments and Opportunities. *Materials Science Forum.* 734. p. 63-89
- Zeck, W. (1971). A rating scheme for field evaluation of root-knot nematode infestations. *Pflanzenschutz-Nachrichten Bayer.* 24:1, p. 141-144.
- Zheng, W., Zhang, H., Yang, L. & TU, S. (2016). Numerical and experimental investigation on a new type of compound parabolic concentrator solar collector. *Energy Convers Manage.* 129. p. 11-22.

VIII. ANEXOS

Anexo 1: Estación Meteorológica DAVIS Vantage PRO 2. (A) Pantalla de visualización de parámetros meteorológicos.



Anexo 2: Resultados del ensayo de sobrevivencia de *M. incognita* en tres soluciones.

Tratamiento	Inicio			Día 3			Día 6			Día 9			Día 13		
	M	NM	% S	M	NM	% S	M	NM	% S	M	NM	% S	M	NM	% S
AP1	103	0	100%	103	0	100%	103	0	100%	85	18	83%	85	18	83%
AP2	98	0	100%	93	5	95%	65	23	74%	60	28	68%	66	32	67%
AP3	97	0	100%	95	2	98%	94	3	97%	80	17	82%	63	34	65%
Promedio			100%			98%			90%			78%			72%
DS			0%			3%			14%			8%			10%
AR1	98	0	100%	98	0	100%	86	12	88%	61	37	62%	46	52	47%
AR2	102	0	100%	100	2	98%	91	11	89%	72	30	71%	51	51	50%
AR3	100	0	100%	98	2	98%	80	20	80%	71	29	71%	55	45	55%
Promedio			100%			99%			86%			68%			51%
DS			0%			1%			5%			5%			4%
SN1	101	0	100%	87	14	86%	43	58	43%	0	101	0%	0	101	0%
SN2	97	0	100%	72	29	71%	49	48	51%	14	83	14%	0	97	0%
SN3	96	0	100%	19	7	73%	55	41	57%	9	87	9%	0	96	0%
Promedio			100%			72%			54%			12%			0%
DS			0%			8%			7%			7%			0%

M: Juveniles móviles

NM: Juveniles no móviles

% S: Porcentaje de juveniles móviles en relación al total de juveniles

AP1: Agua de pozo repetición 1

AR1: Agua de riego repetición 1

SN1: Solución nutritiva repetición 1

DS: Desviación estándar

Anexo 3: Resultados del ensayo del efecto del reactor sobre la movilidad de *M. incognita*.

Tiempo (min)	O1	O2	Promedio	DS	ST 1	ST 2	Promedio	DS	CT 1	CT 2	Promedio	DS
0	9000	9100	9050	70.71	9000	9600	9300	424	8800	9200	9000	282.84
10	8500	8500	8500	0.00	7200	8000	7600	566	7200	8000	7600	565.69
20	8300	8800	8550	353.55	2700	4000	3350	919	3200	6000	4600	1979.9
30	7600	8500	8050	636.40	900	800	850	71	400	1600	1000	848.53
40	7900	7900	7900	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	7700	8000	7850	212.13	0	0	0	0	0	0	0	0
60	7900	7700	7800	141.42	0	0	0	0	0	0	0	0
70	7600	7900	7750	212.13	0	0	0	0	0	0	0	0

O1: Ensayo bajo oscuridad repetición 1

ST 1: Ensayo sin TiO₂ repetición 1

CT 1: Ensayo con TiO₂ repetición 1

DS: Desviación estándar

Anexo 4.: Resultados del ensayo del efecto del reactor sobre la eclosión de huevos de *M. incognita*.

Tiempo (min)	O1	O2	Promedio	DS	ST 1	ST 2	Promedio	DS	CT 1	CT 2	Promedio	DS
0	9000	8700	8850	212.132	8700	8800	8750	70.71068	9000	8700	8850	212.132
20	8400	8400	8400	0	7900	8200	8050	212.132	8000	8400	8200	282.843
40	8100	8200	8150	70.71068	6800	7500	7150	494.9747	7400	7900	7650	353.553
60	8000	7800	7900	141.4214	4200	5000	4600	565.6854	6200	4800	5500	989.949
80	8300	8100	8200	141.4214	3100	3000	3050	70.71068	2800	2500	2650	212.132
100	7900	7600	7750	212.132	1600	2000	1800	282.8427	800	1200	1000	282.843
120	7500	7400	7450	70.71068	300	500	400	141.4214	0	0	0	0
140	7700	7600	7650	70.71068	0	0	0	0	0	0	0	0
160	7300	7500	7400	141.4214	0	0	0	0	0	0	0	0

O1: Ensayo bajo oscuridad repetición 1

ST 1: Ensayo sin TiO₂ repetición 1

CT 1: Ensayo con TiO₂ repetición 1

DS: Desviación estándar

Anexo 5: Resultados del ensayo de la capacidad infectiva de *M. incognita* en lechugas hidropónicas en Sistema NFT

R	AGUA TRATADA				AGUA NO TRATADA			
	PFS	PRS	NH	GA	PFS	PRS	NH	GA
1	10.03	1.94	27	0	6.33	1.5	29	3
2	8.24	1.65	24	1	7.63	1.3	23	3
3	8.58	2.28	22	1	7.66	1.47	26	4
4	8.56	1.82	24	0	7.23	1.3	26	2
5	9.35	1.45	24	1	7.53	1.45	24	3
6	9	1.56	28	0	6.3	1.54	22	5
7	11	1.87	28	0	7.07	1.6	28	4
8	11.09	1.96	30	1	7.15	1.63	25	5
9	8.66	1.51	23	0	7.47	1.9	25	3
10	8.17	1.48	22	1	7.45	1.53	23	4
11	8.59	1.65	25	1	4.83	1.3	25	4
12	9	1.47	24	0	8.24	1.48	24	3
13	8.07	1.53	26	1	7.44	1.41	27	3
14	9.23	1.64	28	1	7.22	1.26	24	3
15	9.63	2.16	23	0	7.6	1.28	25	3
16	10.09	1.92	26	0	6.06	1.48	19	3
17	8.1	1.58	25	0	7.74	1.3	22	4
18	8.26	1.66	24	1	8.14	1.54	24	5
19	8.05	1.79	23	0	8.33	1.32	27	4
20	9.4	1.93	24	0	6.36	1.24	21	4
21	9.29	1.55	22	1	8.18	1.14	24	5
22	8.5	1.53	22	0	6.02	1.36	24	4
23	8.45	1.66	22	1	7.27	1.67	25	5
84	8.64	2.15	22	1	6.52	1.33	20	3
85	8.99	2.18	23	1	7.3	1.74	23	3
Promedio	9.00	1.76	24.44	0.52	7.16	1.44	24.2	3.68
DS	0.85	0.25	2.29	0.51	0.83	0.18	2.35	0.85

R: Repeticiones

PFR: Peso foliar seco

PRS: Peso de raíz seco

NH: Número de hojas

GA: Grado de agallamiento

DS: Desviación estándar

Anexo 6: Resultados del ensayo de la capacidad infectiva de *M. incognita* en lechugas hidropónicas en Sistema raíz flotante

R	AGUA TRATADA				AGUA NO TRATADA			
	PFS	PRS	NH	GA	PFS	PRS	NH	GA
1	5.59	1.4	24	5	8.58	1.75	25	0
2	5.98	1.15	26	4	7.43	1.56	29	1
3	7.68	1.31	25	5	6.58	1.61	24	1
4	6.59	1.03	28	3	8.63	1.8	30	0
5	7.66	1.26	22	4	9.07	1.48	27	1
Promedio	6.7	1.23	25	4.2	8.058	1.64	27	0.6
DS	0.95	0.14	2.24	0.84	1.03	0.13	2.55	0.55

R: Repeticiones

PFR: Peso foliar seco

PRS: Peso de raíz seco

NH: Número de hojas

N: Grado de agallamiento

DS: Desviación estándar