

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO DE BOTÁNICA



Influencia de Nanomateriales de Carbono en Plantas de Tomate (*Solanum lycopersicum* L.) infestadas con *Fusarium oxysporum*

Por:

GRECIA DANIELA ORTIZ HERNÁNDEZ

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN AGROBIOLOGÍA

Saltillo, Coahuila, México

Agosto, 2021

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE BOTÁNICA

Influencia de Nanomateriales de Carbono en Plantas de Tomate (*Solanum lycopersicum* L.) infestadas con *Fusarium oxysporum*

Por:

GRECIA DANIELA ORTIZ HERNÁNDEZ

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN AGROBIOLOGÍA

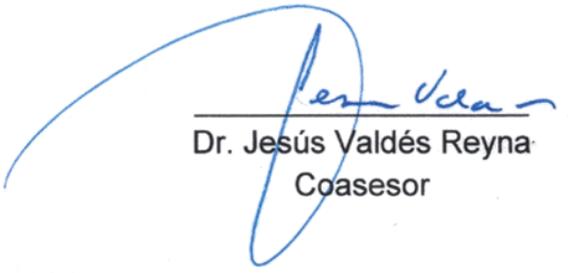
Aprobada por el Comité de Asesoría:



Dr. Antonio Juárez Maldonado
Asesor Principal Interno



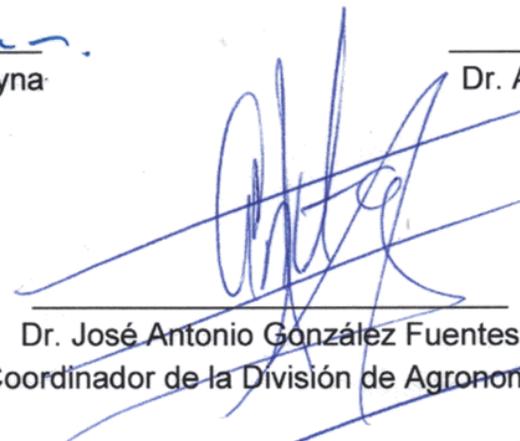
M.C. Yolanda González García
Asesor Principal Externo



Dr. Jesús Valdés Reyna
Coasesor



Dr. Alfonso Méndez López
Coasesor



Dr. José Antonio González Fuentes
Coordinador de la División de Agronomía



Saltillo, Coahuila, México

Agosto, 2021

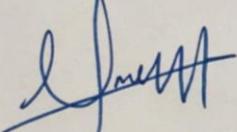
Derechos de Autor y Declaración de no plagio

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

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

Por lo anterior nos responsabilizamos de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaramos que este trabajo es original.

Pasante



Grecia D. Ortiz Hernández

Firma y Nombre

Asesor principal



Antonio López Maldonado

Firma y Nombre

DEDICATORIA

A mis padres, José Luis Ortiz Galindo y Araceli Hernández Cerda, por apoyar y respetar mis decisiones, por ser el gran ejemplo de la persona a la que aspiro llegar a ser y por compartir su sabiduría conmigo por medio de sus consejos.

A mis hermanas, Moncerrath Aracely Ortiz Hernández y María Fernanda Ortiz Hernández, por asistirme en cada una de las situaciones que he vivido y por abrir mi panorama alentándome siempre a ver lo mejor de cada experiencia.

A mi tía, María Esther Ortiz Galindo, por su apoyo incondicional a lo largo de mi vida y brindarme su ejemplo de responsabilidad y caridad.

A mi novio, Arley Eduardo Gómez Alfonzo, por ser mi compañero que apoya e incentiva mis metas, además de ayudarme a crecer personal, colectiva y profesionalmente.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por darme la oportunidad de culminar esta etapa de mi desarrollo educativo, por guiarme y enseñarme la misión que tengo en esta vida, descubrir la felicidad en algo que me apasiona.

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro por permitir mi formación académica, por mostrarme la bondad y el orgullo de ser agrobiólogo.

Al Dr. Antonio Juárez Maldonado, por ser un excelente docente e investigador, además de apoyarme a lo largo de mi estancia en la universidad.

A M. C. Yolanda González García, por ser una guía excepcional en el trabajo de investigación y brindarme su amistad.

Al Dr. Jesús Valdés Reyna por entusiasmarme en el mundo de la botánica sistemática y apoyarme en el transcurso de la licenciatura como mi tutor.

A mis compañeros de generación, Esmeralda Gaona, Aylin Olivera y Diego Escobar por trascender hasta convertirnos en buenos amigos y acompañarme dentro y fuera de la Universidad.

Al Equipo Internacional de Identificación de Plantas de Pastizales, por darme la oportunidad de representar a mi Alma Mater en otro país y dejarme experiencias maravillosas, incluida la amistad que poseo con algunos de sus exintegrantes.

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA	IV
AGRADECIMIENTOS.....	V
ÍNDICE DE CONTENIDO	VI
ÍNDICE DE CUADROS	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IX
RESUMEN.....	X
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Objetivo general.....	3
1.2. Objetivos específicos	3
1.3. Hipótesis	3
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
2.1. Origen y taxonomía del cultivo de tomate	4
2.2. Descripción botánica.....	5
2.3. Importancia en el mercado internacional y nacional.....	5
2.4. Composición nutricional	7
2.5. Antioxidantes	9
2.5.1. Antioxidantes enzimáticos	9
2.5.2. Antioxidantes no enzimáticos	11
2.6. Bioestimulación.....	12
2.7. Patógenos del cultivo de tomate	13
2.8. <i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>lycopersici</i>	13
2.9. Métodos de control de patógenos	15
2.10. Nanotecnología	16
2.10.1. Nanomateriales de Carbono.....	16

2.10.2.	Nanotecnología en la agricultura	19
3.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	21
3.1.	Establecimiento del experimento	21
3.2.	Material vegetal	21
3.3.	Características de los Nanomateriales de Carbono	21
3.4.	Desarrollo del cultivo.....	21
3.5.	Evaluación de incidencia y severidad de <i>F. oxysporum</i>	23
3.6.	Variables agronómicas.....	24
3.7.	Antioxidantes enzimáticos.....	24
3.8.	APX Ascorbato peroxidasa	25
3.9.	CAT Catalasa	26
3.10.	GPX Glutación peroxidasa	26
3.11.	SOD Superóxido dismutasa	27
3.12.	PAL Fenilalanina amonio liasa	28
3.13.	Clorofilas	28
3.14.	Análisis estadístico.....	29
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	30
4.1.	Incidencia y severidad de <i>F. oxysporum</i>	30
4.2.	Variables agronómicas.....	31
4.3.	Antioxidantes enzimáticos.....	35
4.4.	Clorofilas.....	38
5.	CONCLUSIONES	41
6.	REFERENCIAS	42

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Taxonomía de la planta de tomate.....	4
Cuadro 2. Producción mundial de tomate	6
Cuadro 3. Producción nacional de tomate.....	7
Cuadro 4. Composición porcentual en fruto de tomate.....	8
Cuadro 5. Contenido de antioxidantes en el fruto de tomate	8
Cuadro 6. Reacciones de antioxidantes enzimáticos	10
Cuadro 7. Taxonomía de FOL.....	14
Cuadro 8. Tratamientos y concentración de CNM.....	22

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Grafeno como base de otros nanomateriales	17
Figura 2. Estructura del grafeno	18
Figura 3. Nanotubos de carbono de pared simple y múltiple	19
Figura 4. Aplicación de CNMs en plantas de tomate	23
Figura 5. Plantas de tomate afectadas por FOL	24
Figura 6. Incidencia (A) y Severidad (B) de <i>F. oxysporum</i> en el cultivo de tomate	31
Figura 7. Variables agronómicas evaluadas en el cultivo de tomate	35
Figura 8. Antioxidantes enzimáticos evaluados en hojas de tomate	38
Figura 9. Contenido de clorofila en hojas de tomate.....	39

RESUMEN

La aplicación de la nanotecnología en la agricultura ha permitido resolver problemas a través de sus compositos al aumentar la retención de agua, disminuir la lixiviación y volatilización de nutrientes, y atenuar los daños causados por plagas y/o enfermedades. El propósito de este trabajo fue evaluar los efectos de los nanomateriales de carbono sobre el desarrollo y control de *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* (FOL) en el cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* L.), además de determinar su rendimiento y capacidad antioxidante en hoja. Se utilizaron cuatro tratamientos de nanomateriales aplicados vía suelo, nanotubos de carbono 50 mg L⁻¹ y 100 mg L⁻¹ así como grafeno 250 mg L⁻¹ y 500 mg L⁻¹. Los resultados mostraron que la concentración de 100 mg L⁻¹ de CNT obtuvo el menor porcentaje de incidencia (44 %) y a su vez redujo la severidad en un 56 %. Por otra parte, se incrementó 25 % el peso de frutos tras la aplicación de 50 mg L⁻¹ de CNT y a su vez 24 % la actividad de la enzima SOD. De igual manera el tratamiento de 250 mg L⁻¹ aumentó el contenido de clorofilas totales en un 28 %. Los nanomateriales de carbono actúan como bioestimulantes mitigando los daños causados por agentes patógenos.

Palabras clave: Capacidad antioxidante; bioestimulación; estrés biótico.

1. INTRODUCCIÓN

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) de la familia Solanaceae, es el segundo cultivo con mayor explotación en todo el mundo, precedido por la papa (*Solanum tuberosum* L.) (Morris y Taylor, 2017). De 2010 a 2019 el cultivo tuvo un promedio de producción mundial de 170,740,696.7 toneladas y un rendimiento promedio de 35.49 toneladas por hectárea (FAO, 2021a). Además de su importancia alimentaria, la planta de tomate se ha utilizado como modelo biológico para la experimentación en los campos de nutrición, fisiología, ecología, genética y ciencias ómicas (Causse *et al.*, 2016; OECD, 2017; Zorzoli *et al.*, 2007).

Los problemas fitosanitarios en el cultivo de tomate representan una pérdida económica significativa para los productores ya que disminuye el rendimiento y calidad del fruto (Gatahi, 2020). Algunas de los principales agentes de enfermedades dentro del cultivo son: *Botrytis cinerea*, *Phytophthora infestans*, *Rhizoctonia solani*, *Sclerotinia sclerotiorum*, *Xanthomonas* spp., *Clavibacter michiganensis*, *Pseudomonas corrugata* y *Fusarium oxysporum* (Blancard, 2012a).

La nanotecnología ofrece un panorama prometedor para el sector agrícola, incrementando la eficiencia del agroecosistema con menor entrada de insumos y elevando el rendimiento (Duhan *et al.*, 2017; Fraceto *et al.*, 2016). Ejemplos de los usos de la nanotecnología en la agricultura incluyen: formulación de nanofertilizantes y nanopesticidas, el diseño-construcción de nanosensores y cubiertas para cultivos, asimismo, el uso de nanomateriales para remediación de agua y suelo contaminados (Iavicoli *et al.*, 2017; Shojaei *et al.*, 2018; Verma *et al.*, 2019).

Los nanomateriales de carbono (CNMs) son un tipo de nanocompositos alótopos del carbono que poseen propiedades particulares, tales como: alta conductividad térmica y eléctrica, alta relación superficie-volumen y biocompatibilidad (Speranza, 2021; Zaytseva y Neumann, 2016). En el sector agrícola se han utilizado los CNMs en las plantas como bioestimulantes y/o elicitores para inducir la germinación, incrementar la biomasa y aumentar la tolerancia a diferentes tipos de estrés (Juárez-Maldonado *et al.*, 2021; Khan *et al.*, 2021; Mukherjee *et al.*, 2016).

Los bioestimulantes son sustancias de origen natural o sintético que se aplican a las plantas en diferentes etapas fenológicas con el objetivo de influir positivamente en su crecimiento y desarrollo (du Jardin, 2015; Yakhin *et al.*, 2017). En concentraciones bajas permiten que las plantas logren una mayor eficiencia en su metabolismo traducido en un aumento de rendimiento (Feitosa de Vasconcelos y Garófalo Chaves, 2020).

En adición al concepto anterior, el fenómeno de bioestimulación comprende la respuesta biológica de estímulos físicos, químicos y biológicos que inducen cambios metabólicos y fisiológicos en las plantas para hacer un uso eficiente de los recursos (Juárez-Maldonado *et al.*, 2019). Los nanomateriales actúan como agentes ambientales capaces de ejercer la bioestimulación gracias a sus propiedades físicas y químicas (Juárez-Maldonado *et al.*, 2021) considerando dos fases: la primera de carácter fisicoquímico y la segunda, respuestas bioquímicas como resultado de la interacción agente-receptor (Poschenrieder *et al.*, 2013; Zuverza-Mena *et al.*, 2017).

1.1. Objetivo general

Evaluar el efecto del grafeno y los nanotubos de carbono como bioestimulantes en plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) inoculadas con el hongo *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*.

1.2. Objetivos específicos

Determinar el efecto de los nanomateriales de carbono sobre la incidencia y severidad de *Fusarium oxysporum* en plantas de tomate.

Evaluar los cambios en el sistema de defensa antioxidante de las plantas de tomate.

Cuantificar el rendimiento agronómico de las plantas de tomate infestadas con *Fusarium oxysporum*.

1.3. Hipótesis

La aplicación de nanomateriales de carbono inducirá respuestas que incrementarán la capacidad de tolerancia a *Fusarium oxysporum* en el cultivo de tomate.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Origen y taxonomía del cultivo de tomate

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) fue descrito por primera vez en el siglo XVI por el naturalista Pietro Andrea Matthioli (Peralta *et al.*, 2006). Es una planta perenne que pertenece a la familia Solanaceae, de igual manera que la papa (*Solanum tuberosum* L.) y la berenjena (*Solanum melongena* L.). Se encuentra entre las cinco hortalizas más cultivadas en todo el mundo (FAO, 2021a; OECD, 2017).

Es una especie nativa del oeste de Sudamérica y Mesoamérica que incluye los países de Ecuador, Perú, Chile, Colombia, Bolivia y México (Jenkins, 1948; Peralta y Spooner, 2007), su clasificación taxonómica se extiende en el Cuadro 1:

Cuadro 1. Taxonomía de la planta de tomate

Reino	Plantae
División	Angiospermae
Clase	Equisetopsida C. Agardh
Orden	Solanales Juss. Ex Bercht. Y J. Presl
Familia	Solanaceae Juss.
Género	<i>Solanum</i> L.
Especie	<i>Solanum lycopersicum</i> L.

Fuente: Missouri Botanical Garden, 2021

2.2. Descripción botánica

La planta de tomate es de origen nativo del continente americano y de longevidad perenne, sin embargo se le trata (en la mayoría de los casos) como un cultivo anual, de hasta tres ciclos en un año, dependiendo de las condiciones climáticas en las que se encuentre (Blancard, 2012b). Es una especie diploide con 24 cromosomas (Singh *et al.*, 2016).

Las hojas de la planta de tomate son imparipinnadas que contienen de 7 a 9 folíolos con margen dentado; el tipo de inflorescencia que presenta es el racimo, con un número de flores que oscila entre 5 a 12, tiene una disposición cíclica, simetría actinomorfa y flor hermafrodita, perianto formado por el cáliz de 5 sépalos soldados y corola de 5 pétalos soldados, androceo de 5 estambres y gineceo de ovario súpero bicarpelar (Seguí-Simarro, 2016). Los frutos se clasifican botánicamente como bayas, pasan por varios colores para llegar a la maduración, desde un verde oscuro hasta llegar al rojo intenso (Esguerra *et al.*, 2018).

Las plantas de tomate pueden ser de crecimiento indeterminado donde una yema lateral se extiende en una rama principal y se sigue desarrollando, a diferencia de los cultivares de crecimiento determinado, que poseen un hábito autopodante con ramas simpodiales que forman hasta cuatro racimos florales (Ohta y Ikeda, 2015).

2.3. Importancia en el mercado internacional y nacional

El tomate es el segundo cultivo más importante en todo el mundo después de la papa, debido a su consumo para satisfacer la demanda nacional e internacional (FAO, 2021a; SIAP, 2020). La parte de la planta utilizada para consumo humano es el fruto y manejado en fresco para utilizarse en ensaladas y jugos, o cocida para cátsup, sopas y salsas, todo esto por las características organolépticas y nutraceuticas que posee (García Alonso *et al.*, 2020).

En 2019, de acuerdo a los datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, 2021a), la producción neta de tomate fueron 180,766,329 toneladas, teniendo un aumento de 2,949,800 toneladas con respecto al 2017. El primer país productor de tomate fue China, seguido de India, Turquía, Estados Unidos de América (EUA) y Egipto (Cuadro 2). La superficie cosechada en 2019 fue de 5,030,545 hectáreas, incrementando un 2.14 % con respecto al año anterior.

Cuadro 2. Producción mundial de tomate

Lugar	País	Producción (t)
1	China	62,869,502
2	India	19,007,000
3	Turquía	12,841,990
4	Estados Unidos de América	10,858,990
5	Egipto	6,751,856
6	Italia	5,252,690
7	Irán	5,248,904
8	España	5,000,560
9	México	4,271,914
10	Brasil	3,917,967

Es la hortaliza de mayor producción en México y el consumo anual per cápita entre 2012 y 2020 osciló en los 15.2 kg (SIAP, 2020) mientras que el consumo a nivel mundial fue de 20.4 kg entre los años 2011 y 2013 (FAO, 2021b). En el año 2019 se produjeron 3,441,639 toneladas de tomate en territorio nacional (SIAP, 2020), los primeros cinco estados que se muestran en Cuadro 3 son lo que aportaron casi el 53 % del volumen total.

Cuadro 3. Producción nacional de tomate

Lugar	Estado	Producción (t)
1	Sinaloa	764,435
2	San Luis Potosí	391,719
3	Michoacán	280,478
4	Zacatecas	180,319
5	Jalisco	175,999
6	Baja California Sur	159,423
7	Puebla	140,425
8	Baja California	137,632
9	Morelos	134,093
10	Coahuila	121,580

Fuente: SIAP, 2020.

2.4. Composición nutricional

El tomate es un componente importante en una dieta balanceada por el contenido de minerales, vitaminas, fibras, carotenoides y polifenoles (Cuadro 4) (Chaudhary *et al.*, 2018), por lo que se recomienda una ingesta de 250 gr diariamente (DGAC, 1995). El valor antioxidante del tomate está directamente relacionado con el contenido de licopeno, β -caroteno, y vitamina C (Viskelis *et al.*, 2015).

Los carotenoides, la vitamina C y los compuestos fenólicos regulan la reactividad de Especies Reactivas de Oxígeno (ROS) por su naturaleza antioxidante protegiendo a las células de daño a proteínas, ácidos nucleicos y muerte celular programada (Kelebek *et al.*, 2017). Los compuestos antioxidantes que se muestran en el Cuadro 5 intervienen en la prevención de enfermedades crónico-

degenerativas, así como en mantener en buen estado las funciones fisiológicas y el sistema nervioso del cuerpo humano (Alam *et al.*, 2019; Ali *et al.*, 2021; Pinela *et al.*, 2012).

Cuadro 4. Composición porcentual en fruto de tomate

Ingredientes principales	Peso fresco (%)	Peso seco (%)
Agua	95	10
Proteínas	0.82	14.7
Grasas	0.18	3.3
Carbohidratos	2.24	40.3
Glucosa	0.93	16.8
Fructuosa	1.17	21.1
Fibra	0.82	14.7
Minerales	0.53	9.5

Fuente: Mühlbauer y Müller, 2020.

Cuadro 5. Contenido de antioxidantes en el fruto de tomate

Antioxidante	Cantidad ($\mu\text{g } 100 \text{ g}^{-1}$)
Licopeno	2860
Betacaroteno	276
α -tocoferol	540
Vitamina A	24
Vitamina B1	56
Vitamina B2	<0.1 mg
Vitamina C	17,800

Fuente: USDA, 2021.

2.5. Antioxidantes

Las ROS son moléculas de radicales libres ($O_2\cdot$, $O_2\cdot^-$, $HO\cdot$, $HO_2\cdot^-$, $RO\cdot$) y formas no radicales (H_2O_2 , O_2) que actúan como señalizadores primarios en la célula de la planta a causa de cambios ambientales y/o presencia de fitopatógenos (Cheng *et al.*, 2018; Das y Roychoudhury, 2014; Nafees *et al.*, 2019). En concentraciones excesivas pueden llegar a causar daños en la membrana celular y los organelos, como en las proteínas, lípidos y ácidos nucleicos (Sharma *et al.*, 2012).

En la maquinaria celular al presentarse un alto contenido de ROS a causa de factores de estrés se activa el sistema de defensa para tratar de neutralizar dichas moléculas por medio de la producción de antioxidantes enzimáticos y no enzimáticos y así garantizar la homeostasis en la célula (Das *et al.*, 2015).

Los antioxidantes son compuestos que atenúan los efectos de las ROS y ayudan a restaurar el estado redox de la célula (Papalia *et al.*, 2018); los organelos con mayor flujo de electrones (cloroplasto, peroxisoma y mitocondria) son los lugares que contienen los porcentajes más altos de ROS (Das y Roychoudhury, 2014).

2.5.1. Antioxidantes enzimáticos

El sistema antioxidante enzimático se integra por las enzimas ascorbato peroxidasa (APX), catalasa (CAT), deshidroascorbato reductasa (DHR), glutatión peroxidasa (GPX), glutatión reductasa (GR), monodehidroascorbato reductasa (MDHAR), superóxido dismutasa (SOD) y peroxidasa (POD); cada una de estas enzimas cataliza una reacción para volver menos reactiva una molécula (Cuadro 6) (Bhatla y Lal, 2018; Bhattacharjee, 2019).

Cuadro 6. Reacciones de antioxidantes enzimáticos

Enzima	Reacción catalizada
SOD	$O_2^{\cdot-} + O_2^{\cdot-} + 2H^+ \rightarrow 2H_2O_2 + O_2$
CAT	$2H_2O_2 \rightarrow O_2 + 2H_2O$
GPX	$2GSH + R-OOH \rightarrow GSSG + R-OH + H_2O$
APX	$AA + H_2O_2 \rightarrow DHA + 2H_2O$
POD	Donador + $H_2O_2 \rightarrow$ Donador oxidado + $2H_2O$
GR	$NADPH + GSSG \rightarrow NADPH^+ + 2GSH$
PHGPX	$2GSH + PUFA-OOH \rightarrow GSSG + PUFA-OH + 2H_2O$

GSSG: glutatión oxidado; GSH: glutatión reducido; AA: ácido ascórbico; PUFA: ácido graso poliinsaturado; DHA: deshidroascorbato.

Fuente: (Bhatla y Lal, 2018)

La enzima SOD es una metaloenzima que actúa como primera línea de defensa para la protección contra ROS. De manera natural existen tres formas de SOD en la célula dependiendo de su cofactor: Mn-SOD, Fe-SOD y Cu/Zn-SOD, ubicadas en la mitocondria, cloroplasto y peroxisoma, respectivamente (Fukai y Ushio-Fukai, 2011).

La CAT es una enzima tetramérica que tiene una elevada afinidad por el peróxido de hidrógeno y se encuentra en mayor proporción en los peroxisomas; CAT remueve y desintoxica el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) de la célula sin requerir un gasto excesivo de energía y no requiere de ningún reductor para catalizar la reacción (Anjum *et al.*, 2016).

La APX actúa en la reducción del H_2O_2 en agua y deshidroascorbato ($C_6H_6O_6$) empleando como reductor al ácido ascórbico ($C_6H_8O_6$), su actividad enzimática se lleva a cabo sobre todo en el citosol y los cloroplastos. La APX puede tener secuencias diferentes de aminoácidos y sitios de acción como los son: peroxisoma, estroma, tilacoide, citosol y mitocondria (Pandey *et al.*, 2017).

GPX es una enzima que reduce el H_2O_2 en agua y los ácidos grasos a alcoholes, utilizando como sustratos al glutatión y tioredoxina (Bela *et al.*, 2015); en los sitios activos de las enzimas del reino vegetal se encuentra el aminoácido cisteína a diferencia de los animales que poseen selenio-cisteína (Lennarz y Lane, 2013; Passaia y Margis-Pinheiro, 2015).

2.5.2. Antioxidantes no enzimáticos

Los antioxidantes no enzimáticos se componen de vitaminas A, C y E, glutatión, ascorbato, tocoferol, carotenoides y fenoles, que en complemento con los antioxidantes enzimáticos mitigan el daño oxidativo y ayudan en la tolerancia contra estrés biótico y abiótico (Waśkiewicz *et al.*, 2014).

El glutatión reducido es una proteína a base de tiol que se localiza en cloroplastos, citosol, retículo endoplasmático, peroxisomas, mitocondrias, vacuolas y apoplasto (Hasanuzzaman *et al.*, 2017); es un excelente antioxidante reduciendo las moléculas de $O_2^{\cdot-}$, H_2O_2 , HO^{\cdot} o formando aductos orgánicos de radicales libres (Khan *et al.*, 2020).

El ascorbato es el antioxidante que se encuentra en mayor proporción que otros dentro de la célula, y también se le considera la primera línea de defensa contra ROS al reducir las moléculas reactivas como el $O_2^{\cdot-}$, HO^{\cdot} y H_2O_2 (Akram *et al.*, 2017), las concentraciones más altas están dentro del cloroplasto, citosol y peroxisoma en comparación del apoplasto (Fenech *et al.*, 2019).

Los compuestos fenólicos son un grupo de sustancias que contienen por lo menos un anillo de fenol en su estructura e incluye a los flavonoides, antocianinas, taninos y ácidos fenólicos (Abu Khalaf *et al.*, 2019). Como antioxidantes, gracias a la naturaleza química del grupo OH^{\cdot} permite la eliminación y estabilización de los

radicales libres, además de la capacidad de quelación de metales (Pandey *et al.*, 2012);

Los carotenoides son tetraterpenos formados por unidades múltiples de isopreno con un anillo de ciclohexano reemplazado e insaturado en cada uno de sus extremos (García Alonso *et al.*, 2020). Se clasifican en dos grupos: las xantofilas que contienen oxígeno como grupo funcional y los carotenos, que solo poseen cadenas de carbono y ausencia de grupo funcional (Saini *et al.*, 2015). Su mecanismo de acción es la inactivación de moléculas reactivas por reacciones fotosensibles (Carranco *et al.*, 2011).

2.6. Bioestimulación

Un bioestimulante es una sustancia (orgánica o inorgánica) u organismo que aplicado a la planta o rizósfera le confiere una mayor aclimatación (González-Morales *et al.*, 2021; Ricci *et al.*, 2019). Algunas de las ventajas de esta aclimatación incluyen la tolerancia a diferentes tipos de estrés, aumentar la eficiencia en el uso de recursos, incrementar la disponibilidad de nutrientes y promover el crecimiento y desarrollo en las plantas (Juárez-Maldonado *et al.*, 2019). Por otra parte, la bioestimulación implica la modificación de los procesos metabólicos de un organismo a causa de un estímulo de carácter físico, físico-químico o biológico (Juárez-Maldonado *et al.*, 2019).

du Jardin (2015) clasifica a los bioestimulantes en siete categorías: ácidos húmicos y fúlvicos, hidrolizados de proteínas, extractos de algas, quitosano y otros biopolímeros, compuestos inorgánicos, hongos beneficiosos y bacterias beneficiosas. Los bioestimulantes intervienen en la producción de compuestos antioxidantes, estabilidad y funcionamiento de la membrana, producción de metabolitos secundarios y la producción de pigmentos fotosintéticos (Wozniak *et al.*, 2020).

2.7. Patógenos del cultivo de tomate

El término *patógeno* se define como un organismo que provoca alteraciones en el funcionamiento de un hospedero, siendo de carácter facultativo u obligado (Balloux y van Dorp, 2017). Los patógenos en el sector agrícola representan uno de los más importantes factores limitantes de la producción al causar pérdidas de rendimiento y calidad del producto (Savary *et al.*, 2012).

En el cultivo de tomate se pueden distinguir cuatro tipos de patógenos de acuerdo a Blancard (2012a): bacterias transmitidas por el aire y suelo, hongos transmitidos por el aire, patógenos transmitidos por el suelo y los virus. La colonización y severidad de las enfermedades son producto de la interacción de tres factores: ambiente adecuado, planta huésped y virulencia del patógeno (Xiang *et al.*, 2020).

Las principales enfermedades causadas por bacterias incluyen: mancha negra (*Pseudomonas corrugata*), mancha bacteriana (*Xanthomonas* spp.) y cancro bacteriano (*Clavibacter michiganensis* subsp. *michiganensis*); por otro lado, las enfermedades fúngicas más importantes son: tizón temprano del tomate (*Alternaria solani*), tizón tardío del tomate (*Phytophthora infestans*), moho gris (*Botrytis cinerea*), pudrición de la raíz (*Rhizoctonia solani*) y marchitez vascular del tomate (*Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*). Otros patógenos asociados al cultivo del tomate son: virus del mosaico del tomate (*Tobamovirus*), virus del mosaico del pepino (*Potexvirus*), nemátodo del nudo de la raíz (*Meloidogyne incognita*) y nemátodo del quiste de la raíz (*Globodera* spp.) (Blancard, 2012b; Flores *et al.*, 2012; Pavan Kumar *et al.*, 2018).

2.8. *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*

Fusarium oxysporum f. sp. *lycopersici* (FOL) es un hongo patógeno que causa daño en numerosas especies de importancia agrícola incluyendo el tomate, causando la enfermedad de la pudrición de la raíz o marchitez vascular cuando las plantas son

adultas (Srinivas *et al.*, 2019). La abreviatura de *formae specialis* (f. sp.) se utiliza en hongos parásitos que tienen características semejantes en su fisonomía y adaptación fisiológica exclusiva a un huésped (Boix-Ruíz *et al.*, 2015), se extiende la taxonomía de FOL en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Taxonomía de FOL

Reino	Fungi
División	Ascomycota
Clase	Sordariomycetes
Orden	Hypocreales
Familia	Nectriaceae
Género	<i>Fusarium</i>
Especie	<i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>lycopercisi</i> (Sacc.) W.C. Snyder & H.N. Hansen

Fuente: Schoch *et al.*, 2020

FOL está presente en la microbiota del suelo, por lo tanto, comienza a colonizar la raíz causando daño en el tejido vascular, además de presentar clorosis y necrosis en las hojas maduras, el tallo y las raíces, como resultado existe un retardo en el crecimiento hasta llegar a la muerte de la planta (Vásquez Ramírez y Castaño Zapata, 2017). La infección comienza con el reconocimiento de huésped-patógeno, para luego dar lugar a la unión superficial de las hifas y los pelos radiculares, después, se propaga por el tejido vascular habitando en los vasos del xilema, obstruyendo los mismos y causando estrés hídrico que deriva a los síntomas de marchitez y por último la exudación de micotoxinas (Singh *et al.*, 2017).

En el mundo se reconocen 3 razas de FOL (r1, r2 y r3) de acuerdo a la virulencia que expresen en el cultivo del tomate (genes I-1, I-2, I-3 e I-7) (Biju *et al.*, 2017); la raza 1 no presenta virulencia en plantas con gen I-1, la raza 2 es virulenta con el

gen I-1, pero no es virulenta en genotipos I-2, por último la raza 3 es virulenta en los genotipos I-1 e I-2, pero avirulenta en aquellos con I-3 e I-7 (Adhikari *et al.*, 2020).

2.9. Métodos de control de patógenos

El control de FOL en el cultivo de tomate es complejo debido a la capacidad de las clamidosporas de mantenerse en sustrato por hasta diez años y comportarse como hongo saprófito en ausencia de hospederos (Akhter *et al.*, 2016). FOL representa del 40 % al 80 % de pérdidas de producción en tomate, es por eso que se buscan nuevas estrategias para evitar su dispersión y colonización, tanto en ambientes protegidos como el cultivares a cielo abierto (Nirmaladevi *et al.*, 2016).

Dentro del control cultural se sugiere la rotación de cultivos, con la intención de enriquecer la microbiota del suelo, promover la competencia y que FOL se abstenga de parasitar a las plantas de tomate, dejando reposar el suelo por lo menos cinco años de solanáceas (De Corato *et al.*, 2020). Otra práctica útil es el acolchado de suelo al crear un microclima desfavorable para las malezas y organismos patógenos del suelo (Maurya *et al.*, 2019).

La solarización del suelo disminuye la densidad de patógenos al elevar su temperatura en una profundidad aproximada de 20 cm (Kanaan *et al.*, 2015), se produce el incremento de microorganismos que toleran temperaturas altas y la inactivación térmica (McGovern, 2015). Por otro lado, la desinfección de agua de riego por radiación ultravioleta (240-280 nm) es efectiva en hongos, bacterias y virus, al causar daños en material genético (Scarlett *et al.*, 2016).

La aplicación de fungicidas se puede realizar en la base de las plantas o en el sistema de riego; algunos ingredientes activos para el control específico de FOL son: fludioxonil , carbendazim, benomilo, bromuconazo, azoxistrobina y procloraz (Amini y Sidovich, 2010; Baloch *et al.*, 2021), sin embargo se recomienda combinar

el método químico con el físico, cultural o biológico para evitar inducir resistencia a las razas o cepas (Bawa, 2016).

El control biológico por medio de microorganismos promotores de crecimiento vegetal (PGPM, por sus siglas en inglés) suprimen a los microorganismos antagonistas al establecer la relación de competencia, además de la exudación de sustancias inhibitoras (Jiao *et al.*, 2021); algunos ejemplos de PGPM comprenden los géneros de *Azotobacter*, *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Trichoderma* y *Paenebacillus* (Ajilogba y Babalola, 2013; Al-Askar *et al.*, 2021; McGovern, 2015).

2.10. Nanotecnología

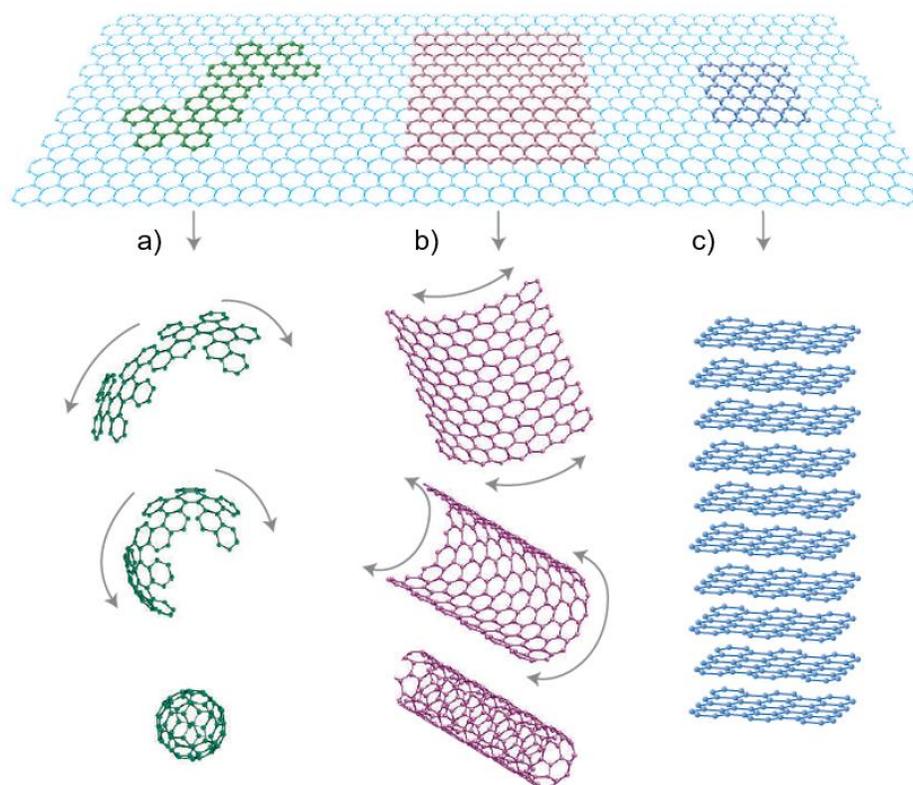
La nanotecnología es definida como "el diseño, caracterización, fabricación y aplicación de formas y tamaños controlados de materias en la nanoescala" (Nasrollahzadeh *et al.*, 2019). Es la creación y manipulación de composites orgánicos o inorgánicos a una escala de 1 a 100 nanómetros (nm). Al disminuir las dimensiones de los materiales, aumenta la relación volumen-superficie, proveyendo la interfaz entre el material en sí y su ambiente (Razura-Carmona *et al.*, 2020).

Desde 1960 que se acuñó el término nanotecnología por el físico Richard P. Feynman se ha vuelto un tema de interés la nanoescala y sus aplicaciones, tanto en la fabricación de nuevos materiales y aparatos, así como en los sistemas biológicos (Nasrollahzadeh *et al.*, 2019). También se han tomado como ejemplo los modelos biológicos (estructura y comportamiento) para la creación de algoritmos que a su vez ayuden en la invención de compuestos cada vez más pequeños con propiedades físicas, químicas y electrónicas más útiles (Ghorbanpour *et al.*, 2017).

2.10.1. Nanomateriales de Carbono

El carbono es un elemento químico de número atómico 6 y masa atómica de 12.01 Da, perteneciente al grupo de los no metales. Es esencial para que se desarrolle la vida, pues todas las biomoléculas están compuestas de él. Ocupa el 18 % de la masa del cuerpo de los seres humanos (Chang, 2008). Venosta (2019) menciona que el carbono se puede mostrar naturalmente en dos estados alotrópicos: el diamante y el grafito; estas dos formas son factibles gracias a la hibridación de sus orbitales, teniendo la oportunidad de dar origen a diferentes estructuras estables (Figura 1) como los fullerenos con 0 dimensión, nanotubos de carbono (CNT) unidimensionales y el grafeno (GP) bidimensional (Ebrahimi y Heidari, 2015; Jagadeesan *et al.*, 2020).

Figura 1. Grafeno como base de otros nanomateriales

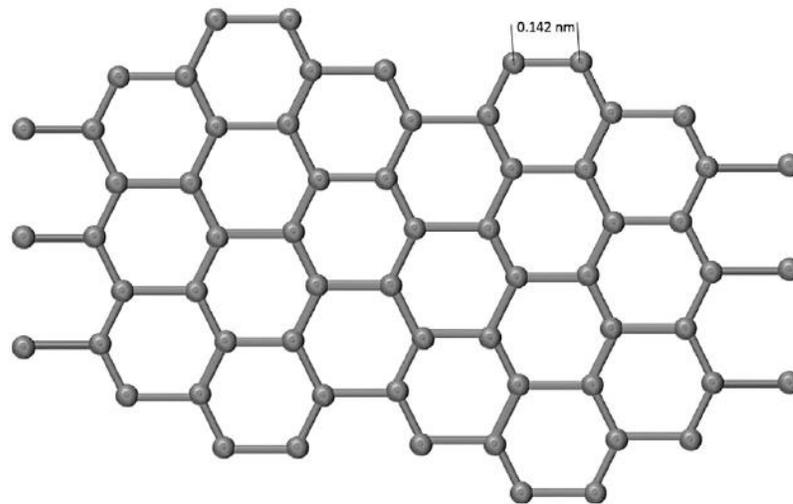


a) Fullerenos; b) Nanotubos; c) Grafito.

Fuente: Geim y Novoselov, 2007.

El GP es una película de átomos de carbono con hibridación sp^2 que están dispuestos de manera hexagonal (Figura 2.) (Ameen *et al.*, 2020); es el material más delgado y fuerte que se ha conocido, además de poseer gran superficie específica ($2630 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$), excelente conductividad térmica ($5000 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$), estabilidad química, alta resistencia mecánica, flexibilidad y una excelente propiedad de transporte con una movilidad de carga muy alta ($200,000 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$) (Ebrahimi y Heidari, 2015; Phiri *et al.*, 2017; Rudrapati, 2020; Takai *et al.*, 2020).

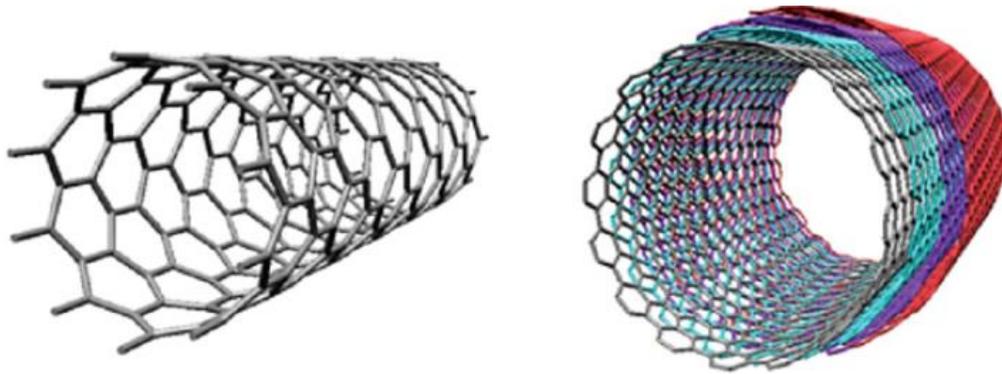
Figura 2. Estructura del grafeno



Fuente: Phiri *et al.*, 2017

Los CNT son cilindros de enlaces carbono- carbono e hibridación sp^2 con un diámetro de entre 4-30 nm y longitud de hasta $1 \mu\text{m}$ (Figura 3) (Bepete *et al.*, 2018). De acuerdo al número de laminillas que posean se clasifican en nanotubos de pared simple (SWCNT) y nanotubos de pared múltiple (MWCNT), ambos tienen una excelente elasticidad, propiedades de transporte útiles, resistencia media de fractura ($>100 \text{ GPa}$), alta conductividad térmica ($3,000 \text{ WK}^{-1} \text{ m}^{-1}$) y gran densidad de corriente (10^9 A cm^{-2}) (Anzar *et al.*, 2020; Qiu y Yang, 2017).

Figura 3. Nanotubos de carbono de pared simple y múltiple



Fuente: Zhang *et al.*, 2010.

2.10.2. Nanotecnología en la agricultura

La nanotecnología ofrece ventajas en el sector agrícola al reducir insumos, maximizar rendimientos, inocuidad y no causar disturbios en el ecosistema (Acharya y Pal, 2020).

La utilización de nanofertilizantes disminuye las pérdidas por volatilización y lixiviación, ya que la planta va tomando los compuestos conforme los demande (Chhipa, 2017), las formulaciones incluyen macroelementos, microelementos y elementos benéficos. Los nanopesticidas ofrecen la capacidad de liberación controlada del ingrediente activo, conservando su estabilidad por periodos prolongados con dosis bajas, reduciendo de manera considerable el costo económico y ambiental por contaminación de agroquímicos (Bratovcic *et al.*, 2021).

Los biosensores en los agroecosistemas facilitan el monitoreo de factores bióticos y abióticos ya que pueden ser manejados a distancia y ser programados dependiendo de lo que se desee controlar (e.g. temperatura, viento, humedad relativa) (Malhotra y Ali, 2018), su forma de operación consiste en la traducción de un estímulo producido por un agente biológica en uno de carácter físico-químico o eléctrico (Su *et al.*, 2017).

Otra aplicación importante es la remediación de suelos contaminados por medio de reacciones redox, adsorción, fotocátalisis, filtración e intercambio iónico gracias al tamaño de partícula de los nanomateriales (Usman *et al.*, 2020). Se clasifica a la remediación por nanomateriales en dos grupos: agentes que promueven la movilización y agentes inmovilizadores (Zhu *et al.*, 2019).

De la misma manera, se han utilizado CNMs y nanohíbridos para control de patógenos en agroecosistemas (Alghuthaymi *et al.*, 2021) gracias a las propiedades antimicrobianas causando daño en las membranas de microorganismos por contacto directo, inducir estrés oxidativo y provocar plasmólisis (Maksimova, 2019). Se ha demostrado el control sobre *Fusarium graminearum* (Wang *et al.*, 2014), *Ralstonia solanacearum* (Wang *et al.*, 2013), *Alternaria solani* (González-García *et al.*, 2021), *Sclerotinia sclerotiorum* (Min *et al.*, 2009), *Plasmopara viticola* (Wang *et al.*, 2017) entre otras especies.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Establecimiento del experimento

El experimento se realizó en el vivero de patógenos perteneciente al Departamento de Botánica, en las instalaciones de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN). Ubicado en las coordenadas N 25° 21' 01.22" W 101° 01' 27.59" a una altura de 1805 msnm, en un invernadero tipo túnel con cubierta de polietileno, ventilación natural y orientación norte-sur.

3.2. Material vegetal

Se utilizaron semillas de tomate saladette de la variedad El Cid F1 (Harris Moran, Davis, CA, EE. UU.) de crecimiento indeterminado.

3.3. Características de los Nanomateriales de Carbono

Los CNMs fueron proporcionados por el Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA). Se utilizaron MWCNT con pureza de 95 %, diámetro de 40 nm y largo de 15 μm , y láminas de GP con una pureza de 97 %, diámetro de 2 μm y grosor de 10 nm.

3.4. Desarrollo del cultivo

El experimento se realizó mediante el trasplante de plántulas de tomate en bolsas de poliestireno de 20 L, con un total de 6 repeticiones por cada tratamiento como se muestra en Cuadro 8:

Cuadro 8. Tratamientos y concentración de CNM

Tratamiento	<i>F. oxysporum</i>	GP	CNT
	UFC	mg L⁻¹	mg L⁻¹
T0	0	0	0
FOL	1x10 ⁷ esporas mL ⁻¹	0	0
CNT 50	1x10 ⁷ esporas mL ⁻¹	0	50
CNT 100	1x10 ⁷ esporas mL ⁻¹	0	100
GP 250	1x10 ⁷ esporas mL ⁻¹	250	0
GP 500	1x10 ⁷ esporas mL ⁻¹	500	0

T0: Testigo absoluto; FOL: *Fusarium oxysporum*; CNT: Nanotubos de carbono; GP: Grafeno.

Se utilizó como sustrato una mezcla de peat moss-perlita en proporción 1:1 con base a volumen. Para la aplicación del riego se utilizó un sistema de riego dirigido con solución Steiner (Steiner, 1961) de acuerdo a cada etapa fenológica. El pH de la solución nutritiva se ajustó con ácido sulfúrico (H₂SO₄) concentrado a un valor de 6.5 para favorecer la absorción de nutrientes. El cultivo se desarrolló durante 120 días.

La inoculación de *F. oxysporum* se realizó al momento del trasplante sumergiendo la raíz de las plantas en una solución que contenía 1x10⁷ esporas por mL.

La primera aplicación de los tratamientos de CNMs se realizó a dos semanas después del trasplante (ddt), posteriormente las siguientes aplicaciones se realizaron en intervalos de cada 15 días, para un total de cinco aplicaciones.

Las aplicaciones se realizaron vía suelo tomando 10 mL de cada solución y se colocó de manera uniforme alrededor de la base del tallo de cada planta (Figura 4). El testigo absoluto se trató con agua.

Figura 4. Aplicación de CNMs en plantas de tomate



3.5. Evaluación de incidencia y severidad de *F. oxysporum*

La severidad en las plantas de tomate (Figura 5) se determinó de acuerdo a la escala de Diener y Ausubel (2005) donde la sintomatología es:

- Sin síntomas visibles (0 %).
- Peciolos de hojas con crecimiento detenido (20 %)
- Hojas viejas con clorosis vascular y hojas jóvenes con crecimiento detenido (40 %)
- Hojas viejas cloróticas y hojas jóvenes con crecimiento detenido (60 %)
- Hojas viejas muertas y hojas jóvenes con clorosis vascular (80 %)

- Planta muerta (100 %)

Figura 5. Plantas de tomate afectadas por FOL



3.6. Variables agronómicas

Para la evaluación del crecimiento y desarrollo de las plantas de tomate se realizaron mediciones, cada 15 días (ddt). Se midió altura de planta (flexómetro), diámetro de tallo (vernier digital) y se contabilizó el número de hojas.

Al momento de la cosecha se evaluó la biomasa fresca, peso fresco de tallo y hojas (g), se utilizó una balanza digital (OHAUS Modelo Adventurer Pro). El peso seco de tallo y hojas (g) se obtuvo al secar las muestras, en una estufa de secado marca Drying Oven modelo DHG9240A durante 72 h a una temperatura constante de 90°C.

3.7. Antioxidantes enzimáticos

A los 71 días (ddt) se tomaron muestras al azar de la cuarta hoja completamente expandida y se trasladaron inmediatamente en hielo a 4°C y se conservaron a -20°C en ultra congelador para detener la actividad enzimática.

Posteriormente las muestras se sometieron a liofilización a -20 °C y 20 KPa durante una semana.

Para la extracción de biocompuestos se pesaron 200 mg de tejido liofilizado y se colocaron en un microtubo de 2 mL. A este se le añadieron 20 mg de polivinilpirrolidona y 1.5 mL de buffer de fosfatos, (pH de 7.0-7.2). El extracto obtenido se centrifugó a 12,000 repeticiones por minuto (rpm) durante 10 minutos a 4 °C en una microcentrífuga (OHAUS Frontier Modelo FC5515 R). Se recolectó el sobrenadante y se filtró con una membrana de nylon (Ramos *et al.*, 2010) y se realizó una dilución 1:20 con buffer de fosfatos pH 7.0-7.2 (0.1 M).

Con este extracto se determinaron las enzimas ascorbato peroxidasa (APX), catalasa (CAT), glutatión peroxidasa (GPX), superóxido dismutasa (SOD) y fenilalanina amonio liasa (PAL).

3.8. APX Ascorbato peroxidasa

La medición de la actividad enzimática ascorbato peroxidasa se llevó a cabo de acuerdo a lo establecido por Nakano y Asada, (1987) con algunas modificaciones.

La medición se realizó en 2 tiempos (tiempo 0 (T0) y tiempo 1 (T1)). Para el T0, en un microtubo se adicionaron 125 µL de extracto, 625 µL de ascorbato (10 mg L⁻¹) y 1.25 mL de H₂O₂ (100 mM), se agitó durante 30 segundos en un vórtex y se midió la absorbancia en un espectrofotómetro UV-VIS (UNICO Spectrophotometer Modelo UV2150) a 266 nm con celdilla de cuarzo.

Para el T1 se agitó durante un minuto en vórtex a una temperatura de 26°C, transcurrido el tiempo se midió la absorbancia. Para el blanco se utilizó buffer de fosfatos (pH 7.0-7.2; 0.1 M) más los reactivos utilizados. La determinación de ascorbato peroxidasa se basa en la cuantificación de la tasa de oxidación del ascorbato mediante la disminución de la absorbancia (T0-T1).

3.9. CAT Catalasa

La medición de la actividad enzimática de catalasa se cuantificó por el método espectrofotométrico de Dhindsa *et al.*, (1981) con algunas modificaciones. La medición se realizó en 2 tiempos, tiempo 0 (T0) y tiempo 1 (T1).

Para el T0, en un microtubo se adicionaron 182 µL de extracto y 1.818 mL de peróxido de hidrógeno (H₂O₂, 100 mM) se agitó durante 30 segundos en un vórtex y se midió la absorbancia en un espectrofotómetro UV-VIS (UNICO Spectrophotometer Modelo UV2150) a 270 nm con celdilla de cuarzo.

Para el T1 se agitó durante un minuto en vórtex a una temperatura de 26°C, transcurrido el tiempo se midió la absorbancia. Para el blanco se utilizó buffer de fosfatos (pH 7.0-7.2; 0.1 M) más los reactivos utilizados. La determinación de catalasa se basa en la cuantificación de la tasa de oxidación del H₂O₂ mediante la disminución de la absorbancia (T0-T1). El estándar de calibración se preparó con H₂O₂ (0-100 mM). Los resultados se expresan en U por g proteínas totales.

3.10. GPX Glutación peroxidasa

Fue determinado por el método modificado por Flohé y Günzler, (1984) y adaptado por Xue *et al.*, (2001) con algunas modificaciones.

En un microtubo se colocaron 200 μL de extracto, 400 μL de glutatión (GSH, 0.1 mM) y 200 μL de fosfato disódico (Na_2HPO_4 , 0.067 M).

La mezcla se precalentó en baño de agua a 25 °C durante 5 minutos, posteriormente se añadieron 200 μL de peróxido de hidrógeno (H_2O_2 , 1.3 mM) para iniciar la reacción catalítica. Transcurridos 10 min a una temperatura de 26 °C, se detuvo la reacción mediante la adición de 1 mL de ácido tricloroacético ($\text{C}_2\text{HCl}_3\text{O}_2$, 1 %), y la mezcla se introdujo en un baño de hielo durante 30 min. Posteriormente se centrifugó a 3,000 rpm durante 10 minutos a 4°C.

Para la cuantificación se colocaron en un microtubo 0.320 mL del extracto, 1.46 mL de fosfato dibásico de sodio (Na_2HPO_4 , 0.32 M) y 0.213 mL del colorante ácido 5,5'-ditiobis-2- nitrobenzoico (DTNB, 1 mM). Se mezcló en un vórtex y se tomó la lectura en un espectrofotómetro UV-Vis (UNICO Spectrophotometer Modelo UV2150) a 412 nm usando una celdilla de cuarzo. El blanco fue buffer de fosfatos (pH 7.0-7.2; 0.1 M). Los valores se obtienen de la curva de calibración previamente elaborada con GSH (0-0.8 mM). Los resultados se expresan en U por g de proteínas totales.

3.11. SOD Superóxido dismutasa

La determinación de la actividad enzimática de SOD se realizó usando el kit de SOD Cayman 706002®. En una microplaca se colocaron 20 μL de extracto, 200 μL del detector radical (sal de tetrazolio) y 20 μL de solución de xantina oxidasa. Se protegió la microplaca con una cubierta transparente (kit), se agitó durante 10 segundos para mezclar y se incubó a una temperatura de 26 °C durante 30 minutos. Transcurrido el tiempo se midió la absorbancia a una longitud de 450 nm usando un lector de placas (BioTek EL x 808).

El blanco fue buffer de fosfatos más los reactivos, donde la xantina oxidasa se sustituyó por buffer del kit. La curva de calibración se realizó con la preparación de

estándares de SOD del mismo Kit que contenían eritrocitos bovinos SOD (Cu / Zn) en un rango de 0-0.05 U mL⁻¹. El principio del ensayo se basa en el uso de una sal de tetrazolio para la detección de los radicales superóxido generados por la xantina oxidasa y la hipoxantina. Una unidad de SOD se define como la cantidad de enzima necesaria para exhibir 50 % de dismutación del radical superóxido. Los resultados se expresan en U mL⁻¹ por proteínas totales (mg g⁻¹).

3.12. PAL Fenilalanina amonio liasa

Se determinó de acuerdo a Sykłowska-Baranek *et al.*, (2012) con algunas modificaciones. En un microtubo se agregaron 32 µL del extracto, 288 µL de L-Fenilalanina (6 mM) y se incubó en baño maría durante 30 min a 40°C. Transcurrido el tiempo se detuvo la reacción con 80 µL de ácido clorhídrico (HCl, 5 N), se colocaron en baño de hielo y se adicionaron 1.6 mL de agua destilada.

Finalmente se tomó la lectura en espectrofotómetro UV-Vis (UNICO Spectrophotometer Modelo UV2150) a una longitud de onda de 290 nm en una celdilla de cuarzo. Para el blanco se utilizó buffer de fosfatos (pH 7.0-7.2; 0.1 M) más los reactivos utilizados. Los valores se obtuvieron a partir de la curva de calibración preparada con ácido transcinámico (0- 60 mg L⁻¹). Los resultados se expresan como U por g de proteínas totales.

3.13. Clorofilas

De acuerdo al método de Nagata y Yamashita, (1992) con algunas modificaciones. Para realizar la extracción se pesaron 200 mg de tejido liofilizado y se colocaron en un microtubo de 2 mL, se añadieron 1.5 mL de hexano:acetona (3:2). El extracto obtenido se centrifugó a 12,000 rpm durante 10 minutos a 4°C en una microcentrífuga (OHAUS Frontier Modelo FC5515 R). Se recolectó el sobrenadante. Con este extracto se determinaron clorofilas.

El contenido de clorofila *a* y clorofila *b* se determinó mediante espectrofotometría (UNICO Spectrophotometer Modelo UV2150) usando la absorbancia (A) leída a 663 nm y 645 nm en las ecuaciones 1 y 2. La clorofila total se obtiene con la ecuación 3. El blanco fue hexano:acetona (3:2). Los resultados se expresaron en mg 100 g⁻¹ de peso seco.

$$\text{Clorofila } a = 25.38 * A_{663} + 3.6A_{645} \quad (1)$$

$$\text{Clorofila } b = 30.38 * A_{645} - 6.5 * A_{663} \quad (2)$$

$$\text{Clorofila total} = 18.8 * A_{663} + 34.02 * A_{645} \quad (3)$$

3.14. Análisis estadístico

Para la evaluación de las variables agronómicas se consideraron seis repeticiones por tratamiento usando un diseño en cuadro latino y para las variables bioquímicas seis repeticiones por tratamiento, utilizando un diseño completamente al azar. El análisis de varianza y prueba de medias de Fisher LSD ($p \leq 0.05$) se realizaron en el software Infostat versión 2018. Además, se realizó un análisis multivariado de varianza (MANOVA) y la prueba de Hotelling ($\alpha = 0.05$) sobre la incidencia y severidad de *F. oxysporum*.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Incidencia y severidad de *F. oxysporum*

La incidencia de *F. oxysporum* en plantas de tomate disminuyó con la aplicación de CNMs (Figura 6A). El menor porcentaje de incidencia se observó en el tratamiento con CNT 100 mg L⁻¹ seguido del GP 250 mg L⁻¹ y CNT 50 mg L⁻¹ con 44 %, 50 % y 56 % respectivamente. La concentración alta de GP (500 mg L⁻¹) obtuvo la mayor tasa de incidencia 67 % de los tratamientos evaluados. Mientras que el control positivo tuvo una incidencia del 100 %.

La severidad de *F. oxysporum* en plantas de tomate disminuyó con la aplicación de ambos CNM (Figura 6B). Todos los tratamientos fueron significativamente inferiores al control positivo. El tratamiento con CNT 100 mg L⁻¹ fue un 56 % menos severo que el control positivo; seguido de CNT 50 mg L⁻¹ con un 47 % menos de gravedad que el control positivo.

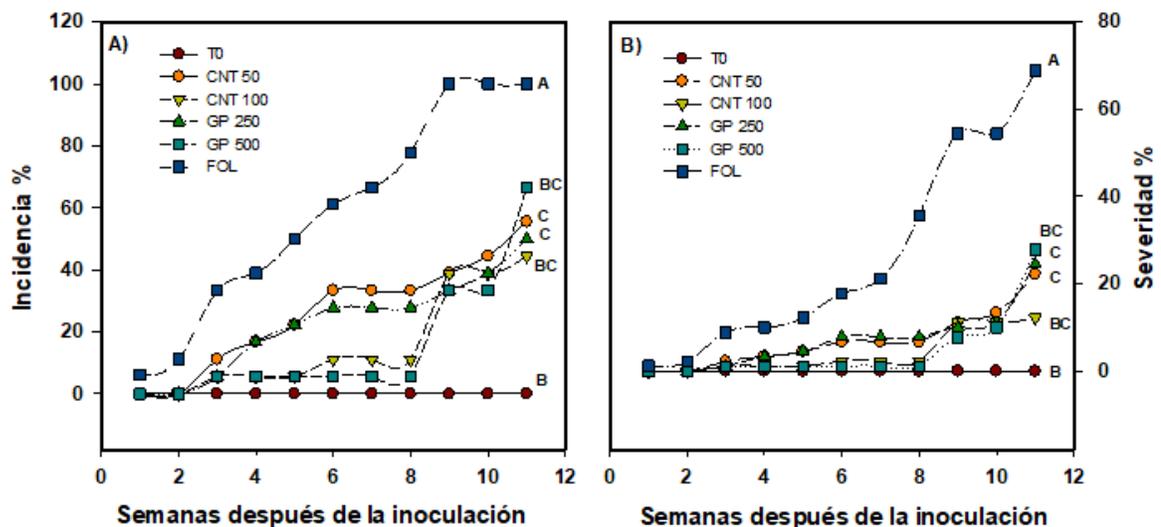


Figura 6. Incidencia (A) y Severidad (B) de *F. oxysporum* en el cultivo de tomate. T0: control; CNT: nanotubos de carbono; GP: grafeno; FOL: Control positivo inoculado con *F. oxysporum*; 50, 100, 250 y 500 representan los mg L⁻¹ aplicados de cada nanomaterial de carbono. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos según la prueba de Hotelling ($\alpha = 0.05$).

El alto valor de la relación superficie-volumen de los SWCNT y MWCNT les permite tener una adhesión firme a la pared o membrana celular de los microorganismos y de esta manera poder alterar su integridad celular y metabolismo (Aslam *et al.*, 2016). El estrés oxidativo causado por el contacto de GP en la pared o membrana celular resulta en la muerte microbiana y reducción de su resistencia (Xie *et al.*, 2019).

En el estudio de González-García *et al.* (2021) la aplicación foliar de MWCNT en dosis de 100 mg L⁻¹ en cultivo de tomate (*S. lycopersicum* L.) se obtuvo el porcentaje de incidencia del patógeno *Alternaria solani* con 80 %, y una disminución de la severidad del 44 % en comparación al control positivo.

El uso de nanopartículas de cobre (NP CuO/10 mg L⁻¹) y nanoláminas de trihidrato de fosfato de cobre [Cu₃(PO₄)₂ • 3H₂O/1000 mg L⁻¹] por medio de la inmersión de raíz en el cultivo de sandía [*Citrullus lanatus* (Thunb.) Matsum. & Nakai] suprimieron los efectos de *Fusarium oxysporum* f. sp. *niveum* hasta en un 58 % con una única aplicación de los nanomateriales en etapa de plántula (Borgatta *et al.*, 2018).

4.2. Variables agronómicas

La altura de plantas de tomate aumentó con la aplicación de GP y CNT (Figura 7A). La mayor altura dentro de los CNM se observó en el tratamiento de CNT 50 mg L⁻¹, seguido de GP 250 mg L⁻¹ y GP 500 mg L⁻¹, con un aumento del 13 %, 11 % y 8 % respectivamente en comparación al control positivo. El testigo absoluto obtuvo la

mayor altura en comparación a todos los tratamientos con una media de 228 cm, en comparación con el control positivo que tuvo 208 cm.

Se observaron diferencias estadísticamente significativas en el diámetro de tallo (Figura 7B), encontrando que el tratamiento CNT 100 mg L⁻¹ superó al testigo absoluto y el control positivo en un 10 % y 14 %, respectivamente. El menor diámetro lo tuvieron el testigo absoluto y el control positivo con una media de 8 mm. Los otros tratamientos de CNM tuvieron un comportamiento estadístico similar.

La biomasa aérea final se vio afectada positivamente con la aplicación de CNM (Figura 7C). Los tratamientos de CNT 100 mg L⁻¹ y GP 250 mg L⁻¹ obtuvieron un incremento de 33 % en comparación con el control positivo. El testigo absoluto fue el que obtuvo mayor biomasa final con una media de 1366 g, en comparación del control positivo que fue el de menor biomasa final con 798 g.

Para el número de frutos se encontraron diferencias estadísticamente significativas (Figura 7D) en los tratamientos CNT 50 mg L⁻¹, CNT 100 mg L⁻¹ y GP 500 mg L⁻¹ ya que se incrementaron 17 %, 15 % y 14 % mayor número de frutos, respectivamente en comparación del control positivo. El testigo absoluto obtuvo el valor más alto de la variable con una media de 47 frutos, en contraste con el control positivo, teniendo una media de 36.

El peso de frutos se influenció con la aplicación de nanomateriales (Figura 7E). Los tratamientos de CNMs fueron estadísticamente diferentes al control positivo, obteniendo un incremento en la variable de 25 % en CNT 50 mg L⁻¹ y CNT 100 mg L⁻¹; por otra parte, GP 500 mg L⁻¹ y GP 250 mg L⁻¹ lograron aumentar en un 22 % y 18 %, respectivamente, el peso de fruto en comparación al control positivo. El testigo absoluto fue el que obtuvo el valor más alto con una media de 5532 g.

La producción de biomasa está directamente relacionada con la eficiencia fotosintética de la planta, ya que los fotosintatos serán los compuestos utilizados para su crecimiento y desarrollo (Ayub *et al.*, 2019). Los nanomateriales pueden ejercer una mejora en la eficiencia fotosintética y de esta manera producir mayor cantidad de biomasa, o en su defecto, provocar un desbalance en la planta por estrés oxidativo y generar menos biomasa al gastar energía en la fabricación de compuestos antioxidantes (Juárez-Maldonado *et al.*, 2021).

Los CNM penetran la pared y membrana celular gracias a la unión que hacen con las acuaporinas, lo que permite que se pueda absorber mayor cantidad de agua y nutrientes por el incremento de poros en la célula (Martínez-Ballesta *et al.*, 2016). De igual manera, aumentan el rendimiento de las plantas al influir en la asimilación neta de CO₂, permeabilidad de la membrana, división celular y formación de la pared celular (Husen y Siddiqi, 2014; Taha *et al.*, 2016).

Al-rekaby (2018) utilizó MWCNT (500 mg L⁻¹ y 1000 mg L⁻¹) vía suelo en plantas de jamaica (*Hibiscus sabdariffa* L.), los resultados de la concentración baja de MWCNT logró un incremento del 29.8 % en longitud de raíz y 59.6 % en número de frutos en comparación al tratamiento control, por otro lado, la dosis alta de MWCNT aumentó 16.7 % la altura de planta, 58.4 % la longitud de raíz y 114 % el número de frutos.

Se ha observado que los MWCNT en concentración de 40 mg L⁻¹ producen más poros o regulan la actividad de las acuaporinas, aumentando la permeabilidad de las semillas de tomate (*S. lycopersicum* L.) lo que permite acortar el tiempo de germinación y aumentar la producción de biomasa (Khodakovskaya *et al.*, 2009).

En otro estudio, Khodakovskaya *et al.*, 2013 demostró que las concentraciones de MWCNT a 50 mg L⁻¹ y 200 mg L⁻¹ aplicadas vía suelo en plantas de tomate (*S. lycopersicum* L.) obtuvieron ejemplares con mayores alturas y cantidad de flores en comparación al testigo.

Mcgehee *et al.* (2017) experimentó con plantas de tomate (*S. lycopersicum* L.) y MWCNT en dosis de 50 mg L⁻¹ por suministro hidropónico encontrando que los nanomateriales provocaron 65 % mayor número de frutos a comparación del tratamiento control, y a su vez, un aumento del 15.5 % del peso de peso fresco de fruto.

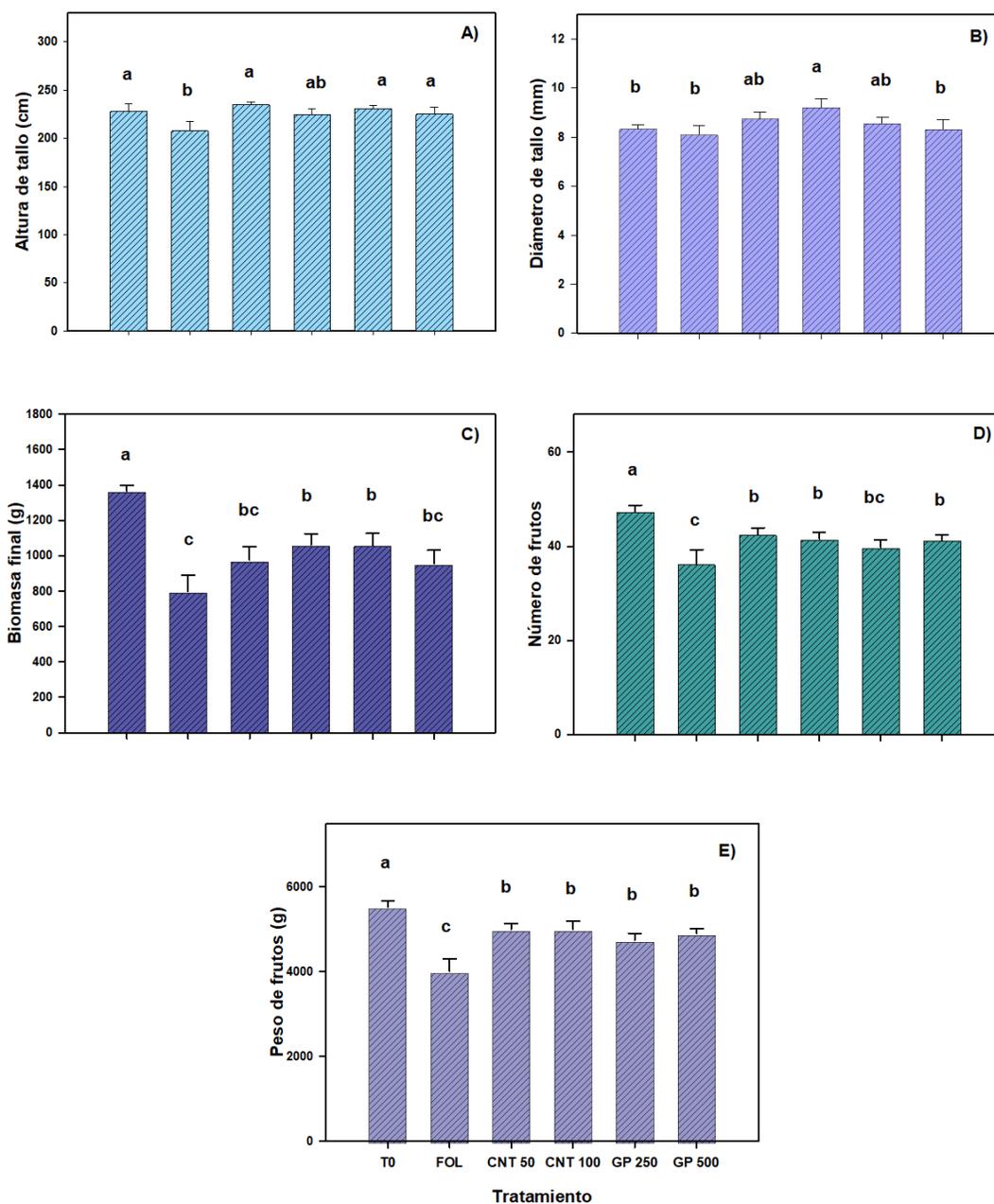


Figura 7. Variables agronómicas evaluadas en el cultivo de tomate. Altura de planta (A), Diámetro de tallo (B), Biomasa fresca (C), Número de frutos (D) y Peso de Frutos (E). T0: control; CNT: Nanotubos de Carbono; GP: Grafeno; FOL: *F. oxysporum*; 50, 100, 250 y 500 representan los mg L⁻¹ aplicados de cada nanomaterial de carbono. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos según la prueba de LSD de Fisher ($\alpha = 0.05$). n = 6 \pm error estándar.

4.3. Antioxidantes enzimáticos

No se modificó la actividad de la enzima APX por los tratamientos de CNM (Figura 8A). Su rango tuvo una variación de entre 13.98 y 10.05 U g⁻¹ de Proteínas Totales, correspondiente a los tratamientos de CNT 50 mg L⁻¹ y el testigo absoluto, respectivamente.

Para la variable CAT no se encontraron diferencias estadísticas significativas (Figura 8B). La actividad enzimática osciló entre 17.89 (GP 500 mg L⁻¹) y 11.43 (CNT 50 mg L⁻¹) U g⁻¹ de Proteínas Totales.

La actividad enzimática de GPX en hojas de tomate indicó diferencias significativas entre tratamientos (Figura 8C), siendo GP 500 mg L⁻¹ el que obtuvo un 5 % y 24 % de aumento de la variable con respecto al control positivo y el testigo absoluto respectivamente.

Se encontraron diferencias estadísticamente significativas para la actividad enzimática de SOD (Figura 8D) dado que hubo una disminución de 13 %, 19 % y 21 % en los tratamientos CNT 100 mg L⁻¹, GP 250 mg L⁻¹ y GP 500 mg L⁻¹ respectivamente. Sin embargo, se incrementó dicha enzima en CNT 50 mg L⁻¹ y CNT 100 mg L⁻¹ con un 24 % y 10 % con respecto al control positivo.

En la actividad de la enzima PAL (Figura 8E) no se encontraron diferencias estadísticamente significativas. El rango fluctuó entre 1.56 y 1.21 U g⁻¹ de Proteínas Totales.

Los CNM tienen la capacidad de producir cambios en la membrana y pared celular a través de la formación de ROS, además de modificar el equilibrio redox de la célula y dañar el material genético (Bhattacharjee, 2019). A bajas concentraciones los CNM actúan como bioestimulantes, activando sistema de defensa y promueven la elaboración de compuestos antioxidantes enzimáticos y no enzimáticos (Juárez-Maldonado *et al.*, 2021).

Se ha documentado la aplicación de CNM como elicitores y bioestimulantes en la expresión de genes que se encargan de la síntesis de metabolitos secundarios en plantas (Ghassemi *et al.*, 2015). La producción de las enzimas APX, SOD, GPX y CAT tiene una relación directa con mantener la homeostasis de las células para protegerlas de daño ocasionado por los radicales libres producidos en sitios como el cloroplasto, la mitocondria y el citosol (Biswas *et al.*, 2020; Mittler, 2017).

La enzima PAL actúa como catalizador en la liberación de un grupo amino de la fenilalanina, teniendo como producto al ácido transcinámico (Heldt y Piechulla, 2011). Es una enzima fundamental para la síntesis de fenol, cuya acumulación se traduce en la primer señalización contra estrés biótico y abiótico, además se ha documentado que la actividad de PAL está relacionada en la defensa contra infección de patógenos, déficit de nutrientes, irradiación UV y temperaturas extremas al participar en la síntesis del ácido salicílico (Kim y Hwang, 2014; Romanazzi y Feliziani, 2016)

Khan y Siddiqui (2021) en su experimento con NPs de óxido de zinc (ZnO) a una concentración de 100 y 200 mg L⁻¹ inoculadas con *Rhizotocnia solani* en betabel (*Beta vulgaris* L.) obtuvieron un aumento de la actividad de las enzimas SOD y CAT en un 36.5 % y 25.2 % con respecto al control; a diferencia de los datos obtenidos

en el experimento con FOL, los autores indicaron el incremento en un 27.9 % de la actividad de PAL en las plantas inoculadas con *Pectobacterium betavascularum*.

Por otro lado, Ramos Cortez (2018) experimentó con plantas de alfalfa (*Medicago sativa* L.) aplicando vía foliar 100 mg L⁻¹ de NPs de óxido de cobre (CuO) y óxido de zinc (ZnO) obteniendo un incremento del 110 % y 84.2 % de la enzima CAT en comparación al tratamiento al control. De igual manera aumentó la actividad de APX en el tratamiento NPs CuO en un 108 % con respecto al control.

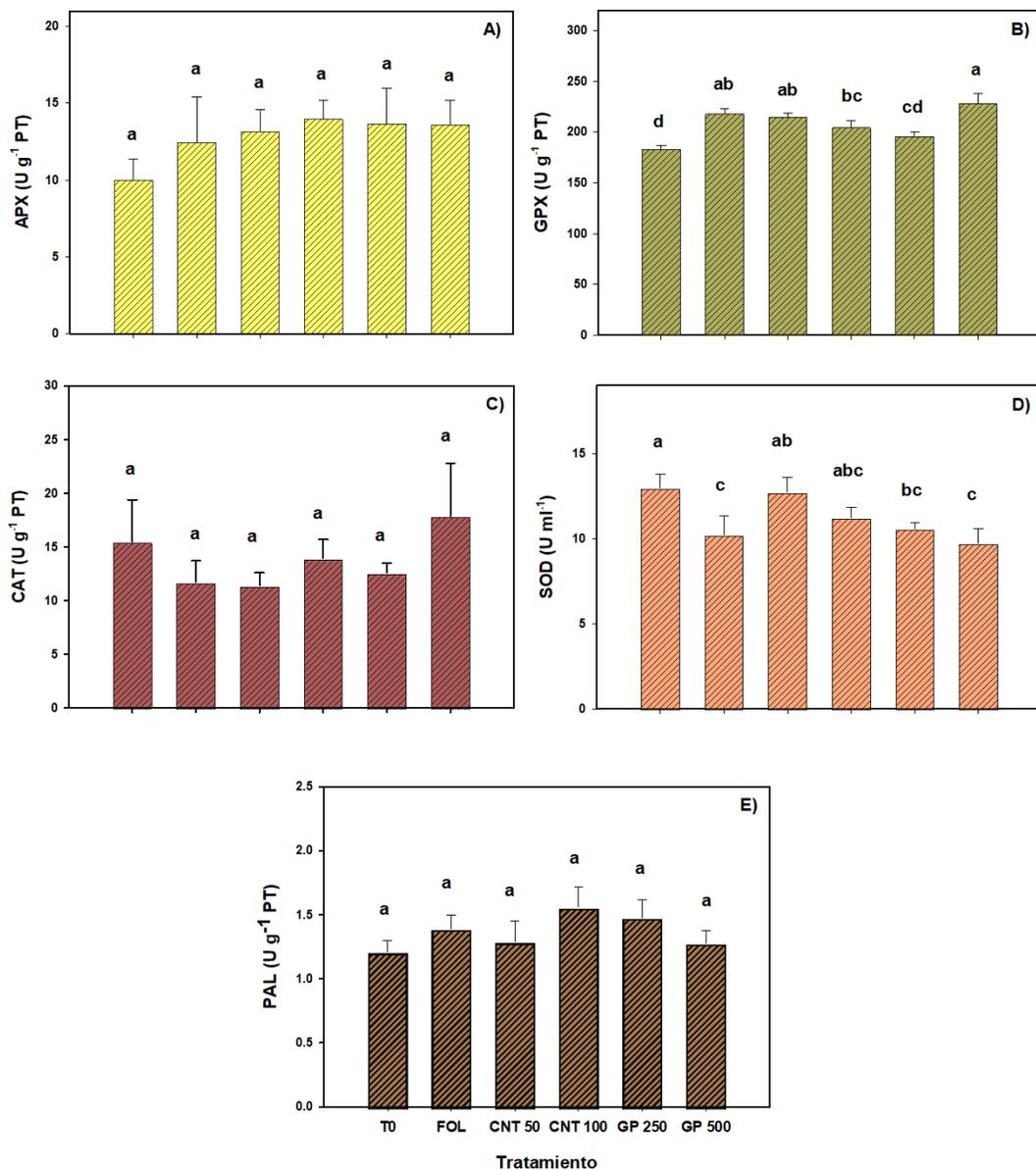


Figura 8. Antioxidantes enzimáticos evaluados en hojas de tomate. APX (A), GPX (B), CAT (C), SOD (D) y PAL (E). T0: control; CNT: Nanotubos de Carbono; GP: Grafeno; FOL: *F. oxysporum*; 50, 100, 250 y 500 representan los mg L⁻¹ aplicados de cada nanomaterial de carbono. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos según la prueba de LSD de Fisher ($\alpha = 0.05$). $n = 6 \pm$ error estándar.

4.4. Clorofilas

La aplicación de CNM influyeron positivamente en el contenido de clorofilas en el cultivo de tomate (Figura 9). El mayor porcentaje de contenido de clorofila *a* (Figura 9) se observó en los tratamientos GP 250 mg L⁻¹ y CNT 100 mg L⁻¹ con 27 % y 15 % en comparación al testigo absoluto y el control positivo respectivamente. Por otra parte, la baja concentración de CNT disminuyó en un 31% en comparación con GP 250 mg L⁻¹ y CNT 100 mg L⁻¹.

Los tratamientos GP 250 mg L⁻¹ y CNT 100 mg L⁻¹ aumentaron en un 31 % y 28 % respectivamente el contenido de clorofila *b* (Figura 9) en relación al control positivo, en contraste con 36 % y 33 % con el testigo absoluto. El menor contenido se observó en el tratamiento GP 500 mg L⁻¹ con una disminución del 32 % con respecto a GP 250 mg L⁻¹.

La aplicación de CNMs aumentó el contenido de clorofilas totales (Figura 9) ya que estas aumentaron en un 28 % y 27 % en los tratamientos GP 250 mg L⁻¹ y CNT 100 mg L⁻¹ con respecto al testigo positivo, de igual manera se incrementó en un 20 % y 19 % en comparación con el testigo absoluto.

Las clorofilas están directamente relacionadas con el proceso de fotosíntesis ya que es el pigmento que interviene en la absorción y conversión de energía luminosa (Nimir y Guisheng, 2018). Dadas las características de los CNM estos pueden adherirse o internarse dentro de la célula causando una serie de reacciones en cadena, como parte de la señalización, e. g. modificación de proteínas integrales,

generación de compuestos antioxidantes y alteración en la expresión génica (Lipşa *et al.*, 2020).

González-García *et al.*, (2019) encontraron que la aplicación de GP a una concentración de 500 mg L⁻¹ incrementó el contenido de clorofila *a* en un 72 % en relación al grupo control vía suelo y 66 % vía foliar en un cultivo de tomate (*S. lycopersicum* L.). En un estudio de 2015 Raliya *et al.* obtuvieron resultados similares en frijol mungo (*Vigna radiata* L.) utilizando NPs de óxido de titanio (TiO₂) en aplicaciones foliares de 10 mg L⁻¹ con un aumento de clorofila de 46.4 % en comparación al tratamiento control.

El contenido de clorofila *a*, clorofila *b* y clorofila total incrementó en un 41 %, 44 % y 42 %, respectivamente, con la aplicación foliar de NPs de Selenio y Cobre (20 mg L⁻¹ de NPs de Se + 10 mg L⁻¹ de NPs de Cu) en plantas de tomate (*S. lycopersicum* L.) en presencia del patógeno *Alternaria solani* (Quiterio-Gutiérrez *et al.*, 2019).

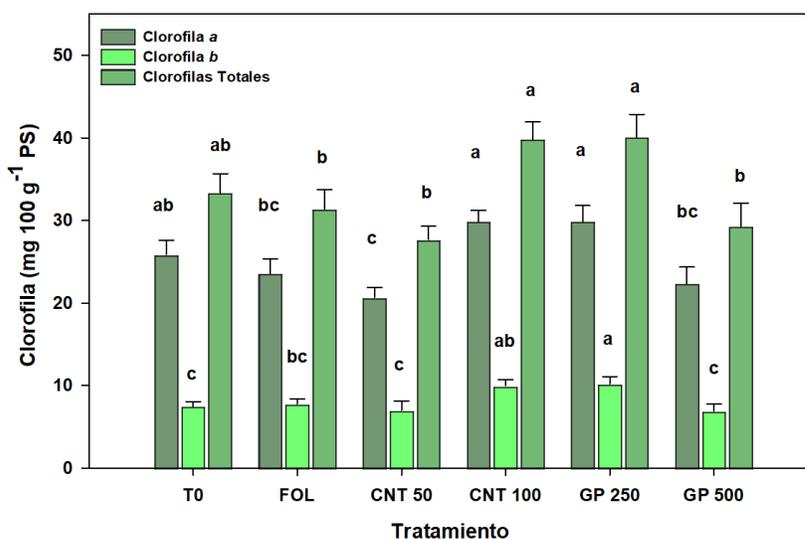


Figura 9. Contenido de clorofilas en hojas de tomate. T0: control; CNT: Nanotubos de Carbono; GP: Grafeno; FOL: *F. oxysporum*; 50, 100, 250 y 500 representan los mg L⁻¹ aplicados de cada nanomaterial de carbono. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos según la prueba de LSD de Fisher ($\alpha = 0.05$). $n = 6 \pm$ error estándar.

5. CONCLUSIONES

El grafeno y los nanotubos de pared múltiple aplicados vía suelo disminuyen la incidencia y severidad del patógeno *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* en plantas de tomate.

La aplicación de nanomateriales tuvo un impacto positivo en las variables agronómicas logrando un aumento significativo en altura de plantas, diámetro de tallo, biomasa final, número de frutos y peso de frutos.

De la misma manera, el sistema antioxidante de las plantas de tomate fue influenciado de manera favorable con el suministro de grafeno y nanotubos de pared múltiple en sus diferentes dosis observándose un incremento en las enzimas GPX y SOD.

El contenido de clorofilas obtuvo valores más altos en presencia de CNM con un mayor porcentaje en la clorofila a, clorofila b y clorofilas totales.

Este experimento demostró que los CNMs pueden ser de gran utilidad en parcelas con problemas del patógeno *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* al disminuir los estragos producidos por la enfermedad. Aunque, si bien, los tratamientos de grafeno y nanotubos no superaron al testigo absoluto, lo hicieron con el control positivo.

6. REFERENCIAS

- Abu Khalaf, R., Alhusban, A. A., Al-Shalabi, E., Al-Sheikh, I., & Sabbah, D. A. (2019). Isolation and structure elucidation of bioactive polyphenols. In *Studies in Natural Products Chemistry* (Vol. 63, pp. 267–337). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817901-7.00010-1>
- Acharya, A., & Pal, P. K. (2020). Nanoimpact agriculture nanotechnology: translating research outcome to field applications by influencing environmental sustainability. *NanoImpact*, *19*, 100232. <https://doi.org/10.1016/j.impact.2020.100232>
- Adhikari, T. B., Gao, A., Ingram, T., & Louws, F. J. (2020). Pathogenomics characterization of an emerging fungal pathogen, *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* in greenhouse tomato production systems. *Frontiers in Microbiology*, *11*(1995). <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01995>
- Ajilogba, C. F., & Babalola, O. O. (2013). Integrated management strategies for tomato fusarium wilt. *Biocontrol Science*, *18*(3), 117–127. <https://doi.org/10.4265/bio.18.117>
- Akhter, A., Hage-Ahmed, K., Soja, G., & Steinkellner, S. (2016). Potential of Fusarium wilt-inducing chlamydospores, in vitro behaviour in root exudates and physiology of tomato in biochar and compost amended soil. *Plant and Soil*, *406*, 425–440. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-2948-4>
- Akram, N. A., Shafiq, F., & Ashraf, M. (2017). Ascorbic acid-a potential oxidant scavenger and its role in plant development and abiotic stress tolerance. *Frontiers in Plant Science*, *8*(613). <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00613>
- Al-Askar, A. A., Saber, W. I. A., Ghoneem, K. M., Hafez, E. E., & Ibrahim, A. A. (2021). Crude citric acid of *Trichoderma asperellum*: tomato growth promotor and suppressor of *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*. *Plants*, *10*(222). <https://doi.org/10.3390/plants10020222>

- Al-rekaby, L. S. (2018). Influence of multiwalled carbon nanotubes and biostimulators on growth and content of bioactive constituents of karkade (*Hibiscus sabdariffa* L.). *Journal of Botany*, 2018, 9097363. <https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2018/9097363>
- Alam, P., Raka, M. A., Khan, S., Sarker, J., Ahmed, N., Nath, P. D., ... Taher Sagor, M. A. (2019). A clinical review of the effectiveness of tomato (*Solanum lycopersicum*) against cardiovascular dysfunction and related metabolic syndrome. *Journal of Herbal Medicine*, 16, 100235. <https://doi.org/10.1016/j.hermed.2018.09.006>
- Alghuthaymi, M. A., Rajkuberan, C., Rajiv, P., Kalia, A., Bhardwaj, K., Bhardwaj, P., ... Kuca, K. (2021). Nanohybrid antifungals for control of plant diseases: current status and future perspectives. *Journal of Fungi*, 7(1), 1–20. <https://doi.org/10.3390/jof7010048>
- Ali, M. Y., Ibn Sina, A. A., Saif Khandker, S., Neesa, L., Tanvir, E. M., Kabir, A., ... Hua Gan, S. (2021). Nutritional composition and bioactive compounds in tomatoes and their impact on human health and disease: A review. *Foods*, 10(45). <https://doi.org/10.3390/foods10010045>
- Ameen, S., Godbole, R., Akhtar, M. S., & Shin, H.-S. (2016). An introduction to graphene plasmonics. *Graphene Production and Application*. World Scientific. <https://doi.org/10.1142/9948>
- Amini, J., & Sidovich, F. D. (2010). The effects of fungicides on *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* associated with fusarium wilt of tomato. *Journal of Plant Protection Research*, 50(2), 172–178. <https://doi.org/10.2478/v10045-010-0029-x>
- Anjum, N. A., Sharma, P., Gill, S. S., Hasanuzzaman, M., Khan, E. A., Kachhap, K., ... Tuteja, N. (2016). Catalase and ascorbate peroxidase—representative H₂O₂-detoxifying heme enzymes in plants. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(19), 19002–19029. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7309-6>
- Anzar, N., Hasan, R., Tyagi, M., Yadav, N., & Narang, J. (2020). Carbon nanotube - a review on synthesis, properties and plethora of applications in the field of biomedical science. *Sensors International*, 1, 100003. <https://doi.org/10.1016/j.sintl.2020.100003>
- Aslam, A., Khan, P., Khan, A., Rahman, M. M., Asiri, A. M., & Oves, M. (2016). Lead sensors development and antimicrobial activities based on graphene oxide/carbon nanotube/poly (O-toluidine) nanocomposite. *International Journal of Biological*

- Macromolecules*, 89, 198–205. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.04.064>
- Ayub, M. A., Sohail, M. I., Umair, M., Rehman, M. Z. ur, Usman, M., Sabir, M., ... Ahmad, Z. (2019). Cerium oxide nanoparticles: advances in synthesis, prospects and application in agro-ecosystem. In *Engineered Nanomaterials and Phytonanotechnology: Challenges for Plant Sustainability* (1a ed., Vol. 87, pp. 209–250). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/bs.coac.2019.10.003>
- Balloux, F., & van Dorp, L. (2017). Q&A: What are pathogens, and what have they done to and for us? *BMC Biology*, 15(91), 1–6. <https://doi.org/10.1186/s12915-017-0433-z>
- Baloch, A., Bangulzai, B. A., Dawood, M., & Yousaf, S. (2021). Efficacy of different fungicides against fusarium wilt and their impacts on height and yield of tomato crop under the tunnel farming condition. *Pakistan Journal of Biotechnology*, 18(1), 1–5.
- Bawa, I. (2016). Management strategies of fusarium wilt disease of tomato incited by *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* (Sacc.): A review. *International Journal of Advanced Academic Research*, 2(5), 32–42.
- Bela, K., Horváth, E., Gallé, Á., Szabados, L., Tari, I., & Csiszár, J. (2015). Plant glutathione peroxidases: emerging role of the antioxidant enzymes in plant development and stress responses. *Journal of Plant Physiology*, 176, 192–201. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2014.12.014>
- Bepete, G., & Coleman, K. S. (2018). Carbon nanotubes: electronic structure and spectroscopy. In *Comprehensive Nanoscience and Nanotechnology* (Second ed., pp. 1–14). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.11401-8>
- Bhatla, S. C., & Lal, M. A. (2018). *Plant Physiology, Development and Metabolism*. Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-981-13-2023-1_32
- Bhattacharjee, S. (2019). ROS and oxidative modification of cellular components. In *Reactive Oxygen Species in Plant Biology* (pp. 81–105). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-81-322-3941-3_4
- Biju, V. C., Fokkens, L., Houterman, P. M., Rep, M., & Cornelissen, B. J. C. (2017). Multiple evolutionary trajectories have led to the emergence of races in *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*. *Applied and Environmental Microbiology*, 83(4), e02548-16. <https://doi.org/10.1128/AEM.02548-16>
- Biswas, K., Adhikari, S., Tarafdar, A., Kumar, R., Soumen, S., Ghosh, P., & Abstract. (2020).

- Reactive oxygen species and antioxidant defence systems in plants: role and crosstalk under biotic stress. S. S. Roychowdhury R., Choudhury S., Hasanuzzaman M. (Ed.), In *Sustainable Agriculture in the Era of Climate Change* (pp. 265–292). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-45669-6>
- Blancard, D. (2012a). Principal characteristics of pathogenic agents and methods of control. In *Tomato Diseases* (Second Edi, pp. 413–650). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-387737-6.50003-0>
- Blancard, D. (2012b). The tomato plant and its culture. In *Tomato Diseases* (Second Edi, pp. 17–34). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-387737-6.50001-7>
- Boix-Ruíz, A., Gálvez-Patón, L., de Cara-García, M., Palmero-Llamas, D., Camacho-Ferre, F., & Tello-Marquina, J. C. (2015). Comparison of analytical techniques used to identify tomato-pathogenic strains of *Fusarium oxysporum*. *Phytoparasitica*, *43*, 471–483. <https://doi.org/10.1007/s12600-014-0444-z>
- Borgatta, J., Ma, C., Hudson-Smith, N., Elmer, W., Plaza Pérez, C. D., De la Torre-Roche, R., ... Hamers, R. J. (2018). Copper based nanomaterials suppress root fungal disease in watermelon (*Citrullus lanatus*): role of particle morphology, composition and dissolution behavior. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, *6*(11), 14847–14856. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b03379>
- Bratovicic, A., Hikal, W. M., Ahl, H. A. H. S.-A., Tkachenko, K. G., Baeshen, R. S., Sabra, A. S., & Sany, H. (2021). Nanopesticides and nanofertilizers and agricultural development: scopes , advances and applications. *Open Journal of Ecology*, *11*, 301–316. <https://doi.org/10.4236/oje.2021.114022>
- Causse, M., Giovannoni, J., Bouzayen, M., & Zouine, M. (2016). *The Tomato Genome*. (C. Kole, Ed.). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-3-662-53389-5_6
- Chang, R. (2008). *General chemistry, the essential concepts* (Fifth edit). McGraw- Hill.
- Chaudhary, P., Sharma, A., Singh, B., & Nagpal, A. K. (2018). Bioactivities of phytochemicals present in tomato. *Journal of Food Science and Technology*, *55*, 2833–2849. <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3221-z>
- Cheng, X., Ni, X., Wu, R., Chong, Y., Gao, X., & Ge, C. (2018). Evaluation of the structure – activity relationship of carbon nanomaterials as antioxidants. *Nanomedicine*, *13*(7), 733–747. <https://doi.org/10.2217/nnm-2017-0314>

- Chhipa, H. (2017). Nanofertilizers and nanopesticides for agriculture. *Environmental Chemistry Letters*, 15, 15–22. <https://doi.org/10.1007/s10311-016-0600-4>
- Das, K., & Roychoudhury, A. (2014). Reactive oxygen species (ROS) and response of antioxidants as ROS-scavengers during environmental stress in plants. *Frontiers in Environmental Science*, 2(53). <https://doi.org/10.3389/fenvs.2014.00053>
- Das, P., Nutan, K. K., Singla-Pareek, S. L., & Pareek, A. (2015). Oxidative environment and redox homeostasis in plants: dissecting out significant contribution of major cellular organelles. *Frontiers in Environmental Science*, 2(70). <https://doi.org/10.3389/fenvs.2014.00070>
- De Corato, U., Patruno, L., Avella, N., Salimbeni, R., Lacolla, G., Cucci, G., & Crecchio, C. (2020). Soil management under tomato-wheat rotation increases the suppressive response against Fusarium wilt and tomato shoot growth by changing the microbial composition and chemical parameters. *Applied Soil Ecology*, 154(103601). <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103601>
- DGAC, (Dietary Guidelines Advisory Committee). (1995). *Report of the Dietary Guidelines Advisory Committee. Dietary Guidelines for Americans, 1995. Nutrition Reviews* (Vol. 53). <https://doi.org/10.1111/j.1753-4887.1995.tb01493.x>
- Dhindsa, R. S., Plumb-dhindsa, P., & Thorpe, T. A. (1981). Leaf senescence: correlated leaf senescence: correlated with increased levels of membrane permeability and lipid peroxidation, and decreased levels of superoxide dismutase and catalase. *Journal of Experimental Botany*, 32(126), 93–101. <https://doi.org/10.1093/jxb/32.1.93>
- Diener, A. C., & Ausubel, F. M. (2005). Resistance to *Fusarium oxysporum* 1, a dominant Arabidopsis disease-resistance gene, is not race specific. *Genetics Society of America*, 171, 305–321. <https://doi.org/10.1534/genetics.105.042218>
- du Jardin, P. (2015). Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation. *Scientia Horticulturae*, 196, 3–14. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.021>
- Duhan, J. S., Kumar, R., Kumar, N., Kaur, P., & Nehra, K. (2017). Nanotechnology: the new perspective in precision agriculture. *Biotechnology Reports*, 15, 11–23. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2017.03.002>
- Ebrahimi, F., & Heidari, E. (2015). A review on modeling, synthesis, and properties of graphene. F. Ebrahimi (Ed.), In *Graphene - New Trends and Developments* (pp. 1–38).

- IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/61564>
- Esguerra, E. B., Rolle, R., & Rapusas, R. S. (2018). Post-harvest management of tomato for quality and safety assurance Guidance for horticultural supply chain stakeholders. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO, (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2021a). Crops. Recuperado el 4 de abril de 2021, de <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC>
- FAO, (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2021b). Food Balances (old methodology and population). Recuperado el 19 de julio de 2021, de <http://www.fao.org/faostat/en/#data/SC>
- Feitosa de Vasconcelos, A. C., & Garófalo Chaves, L. H. (2020). Biostimulants and their role in improving plant growth under abiotic stresses. S. M. Mirmajlessi & R. Radhakrishnan (Eds.), In *Biostimulants in Plant Science* (pp. 1–14). IntechOpen. <https://doi.org/DOI:10.5772/intechopen.82916>
- Fenech, M., Amaya, I., Valpuesta, V., & Botella, M. A. (2019). Vitamin C content in fruits: Biosynthesis and regulation. *Frontiers in Plant Science*, 9(2006). <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.02006>
- Flohé, L., & Günzler, W. A. (1984). Assays of glutathione peroxidase. *Methods in Enzymology*, 105, 114–121.
- Flores, C., Buono, S., & Giorgini, S. (2012). Enfermedades de tomate. Ediciones INTA. Recuperado de https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta_-_guia-enfermedades-tomate.pdf
- Fraceto, L. F., Grillo, R., Medeiros, G. A. De, & Scognamiglio, V. (2016). Nanotechnology in agriculture : which innovation potential does it have? *Frontiers in Environmental Science*, 4(20). <https://doi.org/10.3389/fenvs.2016.00020>
- Fukai, T., & Ushio-Fukai, M. (2011). Superoxide dismutases: role in redox signaling, vascular function, and diseases. *Antioxidants and Redox Signaling*, 15(6), 1583–1606. <https://doi.org/10.1089/ars.2011.3999>
- García Alonso, F. J., García Valverde, V., Navarro González, I., Martín Pozuelo, G., González Barrio, R., & Periago, M. J. (2020). Tomato. A. K. Jaiswal (Ed.), In *Nutritional Composition and Antioxidant Properties of Fruits and Vegetables* (pp. 255–271). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812780-3.00015-5>

- Gatahi, D. M. (2020). Challenges and opportunities in tomato production chain and sustainable standards introduction. *International Journal of Horticultural Science and Technology*, 7(3), 235–262. <https://doi.org/10.22059/ijhst.2020.300818.361>
- Geim, A. K., & Novoselov, K. S. (2007). The rise of graphene. *Nature materials*, 6, 183–191. <https://doi.org/https://doi.org/10.1038/nmat1849>
- Ghassemi, B., Hosseini, R., & Nayeri, F. D. (2015). Effects of cobalt nanoparticles on artemisinin production and gene expression in *Artemisia annua*. *Turkish Journal of Botany*, 39, 769–777. <https://doi.org/10.3906/bot-1410-9>
- González-García, Y., Cadenas-Pliego, G., Alpuche-Solís, Á. G., Cabrera, R. I., & and Juárez-Maldonado, A. (2021). Carbon nanotubes decrease the negative impact of *alternaria solani* in tomato crop. *Nanomaterials*, 11(1080). <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/nano11051080>
- González-García, Y., López-Vargas, E. R., Cadenas-Pliego, G., Benavides-Mendoza, A., González-Morales, S., Robledo-Olivo, A., ... Juárez-Maldonado, A. (2019). Impact of carbon nanomaterials on the antioxidant system of tomato seedlings. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(5858). <https://doi.org/10.3390/ijms20235858>
- González-Morales, S., Solís-Gaona, S., Valdés-Caballero, M. V., Juárez-Maldonado, A., Loredó-Treviño, A., & Benavides-Mendoza, A. (2021). Transcriptomics of biostimulation of plants under abiotic stress. *Frontiers in Genetics*, 12, 583888. <https://doi.org/10.3389/fgene.2021.583888>
- Hasanuzzaman, M., Nahar, K., Anee, T. I., & Fujita, M. (2017). Glutathione in plants: biosynthesis and physiological role in environmental stress tolerance. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 23(2), 249–268. <https://doi.org/10.1007/s12298-017-0422-2>
- Heldt, H.-W., & Piechulla, B. (2011). Phenylpropanoids comprise a multitude of plant secondary metabolites and cell wall components. In *Plant Biochemistry* (Fourth Edi, pp. 431–449). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-384986-1.00018-1>
- Husen, A., & Siddiqi, K. S. (2014). Carbon and fullerene nanomaterials in plant system. *Journal of Nanobiotechnology*, 12(16). <https://doi.org/https://doi.org/10.1186/1477-3155-12-16>
- Iavicoli, I., Leso, V., Beezhold, D. H., & Shvedova, A. A. (2017). Nanotechnology in

- agriculture: opportunities, toxicological implications, and occupational risks. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 329, 96–111. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2017.05.025>
- Jagadeesan, A. K., Thangavelu, K., & Dhananjeyan, V. (2020). Carbon nanotubes: synthesis, properties, and applications. P. Pham, P. Goel, S. Kumar, & K. Yadav (Eds.), In *21st Century Surface Science -a Handbook* (pp. 1–21). IntechOpen. <https://doi.org/10.1080/02726350902775962>
- Jenkins, J. A. (1948). The origin of the cultivated tomato. *Economic Botany*, 2, 379–392. <https://doi.org/10.1007/BF02859492>
- Jiao, X., Takishita, Y., Zhou, G., & Smith, D. L. (2021). Plant associated rhizobacteria for biocontrol and plant growth enhancement. *Frontiers in Plant Science*, 12(634796). <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.634796>
- Juárez-Maldonado, A., Ortega-Ortíz, H., Morales-Díaz, A. B., González-Morales, S., Morelos-Moreno, Á., Cabrera-De la Fuente, M., ... Benavides-Mendoza, A. (2019). Nanoparticles and nanomaterials as plant biostimulants. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(1). <https://doi.org/10.3390/ijms20010162>
- Juárez-Maldonado, A., Tortella, G., Rubilar, O., Fincheira, P., & Benavides-Mendoza, A. (2021). Biostimulation and toxicity: the magnitude of the impact of nanomaterials in microorganisms and plants. *Journal of Advanced Research*, 31, 113–126. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2020.12.011>
- Kanaan, H., Medina, S., Krassnovsky, A., & Raviv, M. (2015). Survival of *Macrophomina phaseolina* s.l. and *Verticillium dahliae* during solarization as affected by composts of various maturities. *Crop Protection*, 76, 108–113. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2015.07.006>
- Kelebek, H., Selli, S., Kadiroğlu, P., Kola, O., Kesen, S., Uçar, B., & Çetiner, B. (2017). Bioactive compounds and antioxidant potential in tomato pastes as affected by hot and cold break process. *Food Chemistry*, 220, 31–41. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.09.190>
- Khan, A. K., Kousar, S., Tungmunnithum, D., Hano, C., Abbasi, B. H., & Anjum, S. (2021). Nano-elicitation as an effective and emerging strategy for in vitro production of industrially important flavonoids. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(1694).

<https://doi.org/10.3390/app11041694>

- Khan, M. R., & Siddiqui, Z. A. (2021). Role of zinc oxide nanoparticles in the management of disease complex of beetroot (*Beta vulgaris* L.) caused by *Pectobacterium betavasculorum*, *Meloidogyne incognita* and *Rhizoctonia solani*. *Horticulture Environment and Biotechnology*, *62*(2), 225–241. <https://doi.org/10.1007/s13580-020-00312-z>
- Khan, M., Samrana, S., Zhang, Y., Malik, Z., Khan, M. D., & Zhu, S. (2020). Reduced glutathione protects subcellular compartments from Pb-induced ROS injury in leaves and roots of upland cotton (*Gossypium hirsutum* L.). *Frontiers in Plant Science*, *11*(412). <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00412>
- Khodakovskaya, M., Dervishi, E., Mahmood, M., Xu, Y., Li, Z., Watanabe, F., & Biris, A. S. (2009). Carbon nanotubes are able to penetrate plant seed coat and dramatically affect seed germination and plant growth. *ACS Nano*, *3*(10), 3221–3227. <https://doi.org/10.1021/nn900887m>
- Khodakovskaya, M. V., Kim, B. S., Kim, J. N., Alimohammadi, M., Dervishi, E., Mustafa, T., & Cernigla, C. E. (2013). Carbon nanotubes as plant growth regulators: Effects on tomato growth, reproductive system, and soil microbial community. *Small*, *9*(1), 115–123. <https://doi.org/10.1002/sml.201201225>
- Kim, D. S., & Hwang, B. K. (2014). An important role of the pepper phenylalanine ammonia-lyase gene (PAL1) in salicylic acid-dependent signalling of the defense response to microbial pathogens. *Journal of Experimental Botany*, *65*(9), 2295–2306. <https://doi.org/10.1093/jxb/eru109>
- Lennarz, W. J., & Lane, M. D. (2013). *Encyclopedia of biological chemistry* (Second). Burlington, USA: Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-378630-2.09990-4>.
- Lipşa, F.-D., Ursu, E.-L., Ursu, C., Ulea, E., & Cazacu, A. (2020). Evaluation of the antifungal activity of gold–chitosan and carbon nanoparticles on *Fusarium oxysporum*. *Agronomy*, *10*(1143). <https://doi.org/doi:10.3390/agronomy10081143>
- Maksimova, Y. G. (2019). Microorganisms and carbon nanotubes: interaction and applications (review). *Applied Biochemistry and Microbiology*, *55*(1), 1–12. <https://doi.org/10.1134/S0003683819010101>

- Malhotra, B. D., & Ali, M. A. (2018). nanomaterials in biosensors: fundamentals and applications. In *Nanomaterials for Biosensors*. (pp. 1–74). Elsevier. <https://doi.org/doi:10.1016/B978-0-323-44923-6.00001-7>
- Mansoori, G. A. (2017). An introduction to nanoscience and nanotechnology. M. Ghorbanpour, K. Manika, & A. Varma (Eds.), In *Nanoscience and Plant– Soil Systems* (pp. 3–20). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46835-8_1
- Martínez-Ballesta, M. C., Zapata, L., Chalbi, N., & Carvajal, M. (2016). Multiwalled carbon nanotubes enter broccoli cells enhancing growth and water uptake of plants exposed to salinity. *Journal of Nanobiotechnology*, *14*(42). <https://doi.org/10.1186/s12951-016-0199-4>
- Maurya, S., Dubey, S., Kumari, R., & Verma, R. (2019). Management tactics for Fusarium wilt of tomato caused by *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* (Sacc.): a review. *International Journal of Research in Pharmacy and Pharmaceutical Sciences International*, *4*(5), 1–7.
- Mcgehee, D. L., Lahiani, M. H., Irin, F., Green, M. J., & Khodakovskaya, M. V. (2017). Multiwalled carbon nanotubes dramatically affect the fruit metabolome of exposed tomato plants. *ACS Applied Materials & Interfaces*, *9*(38), 32430–32435. <https://doi.org/10.1021/acsami.7b10511>
- McGovern, R. J. (2015). Management of tomato diseases caused by *Fusarium oxysporum*. *Crop Protection*, *73*, 78–92. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2015.02.021>
- Min, J. S., Kim, K. S., Kim, S. W., Jung, J. H., Lamsal, K., Kim, S. Bin, ... Lee, Y. S. (2009). Effects of colloidal silver nanoparticles on sclerotium-forming phytopathogenic fungi. *Plant Pathology Journal*. <https://doi.org/10.5423/PPJ.2009.25.4.376>
- Mittler, R. (2017). ROS are good. *Trends in Plant Science*, *22*(1), 11–19. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2016.08.002>
- Morris, W. L., & Taylor, M. A. (2017). The solanaceous vegetable crops: potato, tomato, pepper, and eggplant. In *Encyclopedia of Applied Plant Sciences* (Second, Vol. 3, pp. 55–58). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394807-6.00129-5>
- Mühlbauer, W., & Müller, J. (2020). Tomato (*Solanum lycopersicum* L.). In *Drying Atlas* (pp. 195–205). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-818162-1.00023-7>

- Mukherjee, A., Majumdar, S., Servin, A. D., Pagano, L., Dhankher, O. P., & White, J. C. (2016). Carbon nanomaterials in agriculture: a critical review. *Frontiers in Plant Science*, 7(172). <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00172>
- Nafees, M., Fahad, S., Shah, A. N., Bukhari, M. A., Ahmed, I., Ahmad, S., & Hussain, S. (2019). Reactive oxygen species signaling in plants. A. H. Hasanuzzaman M., Hakeem K., Nahar K. (Ed.), In *Plant Abiotic Stress Tolerance: Agronomic, Molecular and Biotechnological Approaches* (pp. 259–272). Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-06118-0>
- Nagata, M., & Yamashita, I. (1992). Simple method for simultaneous determination of chlorophyll and carotenoids in tomato fruit. *Japan Society for Food Science and Technology*, 39, 925–928.
- Nakano, Y., & Asada, K. (1987). Purification of ascorbate peroxidase in spinach chloroplasts; its inactivation in ascorbate-depleted medium and reactivation by monodehydroascorbate radical. *Plant and Cell Physiology*, 28(1), 131–140. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.pcp.a077268>
- Nasrollahzadeh, M., Sajadi, S. M., Sajjadi, M., & Issaabadi, Z. (2019). An introduction to nanotechnology. In *An Introduction to Green Nanotechnology* (1a ed., Vol. 28, pp. 1–27). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813586-0.00001-8>
- Nimir, N. E. A., & Guisheng, Z. (2018). Photosynthesis and carbon metabolism. J. C. García Cañedo & G. L. López Lizárraga (Eds.), In *Photosynthesis - From Its Evolution to Future Improvements in Photosynthetic Efficiency Using Nanomaterials* (pp. 9–14). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.78031>
- Nirmaladevi, D., Venkataramana, M., Srivastava, R. K., Uppalapati, S. R., Gupta, V. K., Yli-Mattila, T., ... Chandra, N. S. (2016). Molecular phylogeny, pathogenicity and toxigenicity of *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*. *Scientific Reports*, 6(21367). <https://doi.org/10.1038/srep21367>
- OECD, (Organización para la Cooperación Económica y el Desarrollo). (2017). Tomato (*Solanum lycopersicum*). In *Safety Assessment of Transgenic Organisms in the Environment* (Vol. 7, pp. 349–361). OECD Publishing. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-1695-5_28
- Ohta, K., & Ikeda, D. (2015). Differences in branch formation in indeterminate and

- determinate tomato types. *Environmental Control in Biology*, 53(4), 189–198. <https://doi.org/10.2525/ecb.53.189>
- Pandey, A. K., Mishra, A. K., & Mishra, A. (2012). Antifungal and antioxidative potential of oil and extracts derived from leaves of indian spice plant *Cinnamomum tamala*. *Cellular and Molecular Biology*, 58(1), 142–147. <https://doi.org/10.1170/T933>
- Pandey, S., Fartyal, D., Agarwal, A., Shukla, T., James, D., Kaul, T., ... Reddy, M. K. (2017). Abiotic stress tolerance in plants: myriad roles of ascorbate peroxidase. *Frontiers in Plant Science*, 8(581). <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00581>
- Papalia, T., Panuccio, M. R., Sidari, M., & Muscolo, A. (2018). Reactive oxygen species and antioxidant enzymatic systems in plants: role and methods. A. M. Sánchez-Moreiras & M. J. Reigosa (Eds.), In *Advances in plant ecophysiology techniques* (pp. 177–194). Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-93233-0>
- Passaia, G., & Margis-Pinheiro, M. (2015). Glutathione peroxidases as redox sensor proteins in plant cells. *Plant Science*, 234, 22–26. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2015.01.017>
- Pavan Kumar, S., Raja Babu, K., & Srinivasulu, A. (2018). Symptomology of major fungal diseases on tomato and its management. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 7(6), 1817–1821.
- Peralta, I. E., Knapp, S., & Spooner, D. M. (2006). Nomenclature for wild and cultivated tomatoes. *Report of the Tomato Genetics Cooperative*, 56, 6–12.
- Peralta, I. E., & Spooner, D. M. (2007). History, origin and early cultivation of tomato (Solanaceae). M. K. Razdan & A. K. Mattii (Eds.), In *Genetic Improvement of Solanaceous Crops* (pp. 8–9). Science Publishers.
- Perrin, H. (2016). *Solanum lycopersicum*. https://doi.org/10.1007/978-94-007-5628-1_41
- Phiri, J., Gane, P., & Maloney, T. C. (2017). General overview of graphene: production, properties and application in polymer composites. *Materials Science and Engineering: B*, 215, 9–28. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2016.10.004>
- Pinela, J., Barros, L., Carvalho, A. M., & Ferreira, I. C. F. R. (2012). Nutritional composition and antioxidant activity of four tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) farmer's varieties in Northeastern Portugal homegardens. *Food and Chemical Toxicology*, 50, 829–834. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2011.11.045>
- Poschenrieder, C., Cabot, C., Martos, S., Gallego, B., & Barceló, J. (2013). Do toxic ions

- induce hormesis in plants? *Plant Science*, 212, 15–25.
<https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2013.07.012>
- Qiu, H., & Yang, J. (2017). *Structure and properties of carbon nanotubes*. (H. Peng, Q. Li, & T. Chen, Eds.), *Industrial Applications of Carbon Nanotubes*. Elsevier Inc.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-323-41481-4.00002-2>
- Quiterio-Gutiérrez, T., Ortega-Ortiz, H., Cadenas-Pliego, G., Hernández-Fuentes, A. D., Sandoval-Rangel, A., Benavides-Mendoza, A., ... Juárez-Maldonado, A. (2019). The application of selenium and copper nanoparticles modifies the biochemical responses of tomato plants under stress by *Alternaria Solani*. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(8), 1950. <https://doi.org/10.3390/ijms20081950>
- Raliya, R., Biswas, P., & Tarafdar, J. C. (2015). TiO₂ nanoparticle biosynthesis and its physiological effect on mung bean (*Vigna radiata* L.). *Biotechnology Reports*, 5, 22–26. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2014.10.009>
- Ramos Cortez, E. (2018). *Actividad antimicrobiana in vitro e in vivo de nanopartículas de Ag, CuO y ZnO contra bacterias fitopatógenas*. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Razura-Carmona, F. F., Prado-Guzmán, G. A., Perez-Larios, A., Ramírez-Marez, M. V., Herrera-Martínez, M., & Alberto Sánchez-Burgos, J. (2020). Biofunctionalized polymer nanomaterials: implications on shapes and sizes. S. Clichici, A. Filip, & G. M. do Nascimento (Eds.), In *Nanomaterials - Toxicity, Human Health and Environment* (pp. 1–13). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.88707>
- Ricci, M., Tilbury, L., Daridon, B., & Sukalac, K. (2019). General principles to justify plant biostimulant claims. *Frontiers in Plant Science*, 10(494).
<https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00494>
- Romanazzi, G., & Feliziani, E. (2016). Use of chitosan to control postharvest decay of temperate fruit: effectiveness and mechanisms of action. S. Bautista-Baños, G. Romanazzi, & A. Jiménez-Aparicio (Eds.), In *Chitosan in the Preservation of Agricultural Commodities* (pp. 155–177). Academic Press.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802735-6.00006-9>
- Rudrapati, R. (2020). Graphene: fabrication methods, properties, and applications in modern industries. S. Ameen, M. S. Akhtar, & H.-S. Shin (Eds.), In *Graphene Production and Application* (pp. 1–14). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.92258>

- Savary, S., Ficke, A., Aubertot, J. N., & Hollier, C. (2012). Crop losses due to diseases and their implications for global food production losses and food security. *Food Security*, 4, 519–537. <https://doi.org/10.1007/s12571-012-0200-5>
- Scarlett, K., Collins, D., Tesoriero, L., Jewell, L., van Ogtrop, F., & Daniel, R. (2016). Efficacy of chlorine, chlorine dioxide and ultraviolet radiation as disinfectants against plant pathogens in irrigation water. *European Journal of Plant Pathology*, 145(1), 27–38. <https://doi.org/10.1007/s10658-015-0811-8>
- Schoch, C. L., Ciufu, S., Domrachev, M., Hotton, C. L., Kannan, S., Khovanskaya, R., ... Karsch-Mizrachi, I. (2020). NCBI taxonomy: a comprehensive update on curation, resources and tools. *Database*, 2020(2), 1–21. <https://doi.org/10.1093/database/baaa062>
- Seguí-Simarro, J. M. (2016). Androgenesis in solanaceae. M. A. Germanà & M. Lambardi (Eds.), *Methods in Molecular Biology* (Vol. 1359, pp. 209–244). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3061-6_9
- Sharma, P., Jha, A. B., Dubey, R. S., & Pessarakli, M. (2012). Reactive oxygen species , oxidative damage , and antioxidative defense mechanism in plants under stressful conditions. *Journal of botany*, 2012(217037). <https://doi.org/10.1155/2012/217037>
- Shojaei, T. R., Salleh, M. A. M., Tabatabaei, M., Mobli, H., Aghbashlo, M., Rashid, S. A., & Tan, T. (2018). Applications of nanotechnology and carbon nanoparticles in agriculture. S. A. Rashid, R. N. I. R. Othman, & M. Z. Hussein (Eds.), In *Synthesis, Technology and Applications of Carbon Nanomaterials* (pp. 247–277). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815757-2.00011-5>
- SIAP, (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). (2020). *Panorama Agroalimentario 2020*. México.
- Singh, M., Tiwari, S., Karkute, S. G., Prasanna, H. C., & Gujar, R. S. (2016). Biology of *Solanum lycopersicum* (tomato). Ministry of Enviroment, Forest and Climate Change. Government of India. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/336319341_Biology_of_Solanum_lycopersicum_Tomato
- Singh, V. K., Singh, H. B., & Upadhyay, R. S. (2017). Role of fusaric acid in the development of ‘Fusarium wilt’ symptoms in tomato: physiological, biochemical and proteomic perspectives. *Plant Physiology and Biochemistry*, 118, 320–332.

<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.06.028>

- Speranza, G. (2021). Carbon nanomaterials: synthesis, functionalization and sensing applications. *Nanomaterials*, *11*(967). <https://doi.org/10.3390/nano11040967>
- Srinivas, C., Nirmala Devi, D., Narasimha Murthy, K., Mohan, C. D., Lakshmeesha, T. R., Singh, B. P., ... Chandra Nayaka, S. (2019). *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* causal agent of vascular wilt disease of tomato: biology to diversity– A review. *Saudi Journal of Biological Sciences*, *26*(7), 1315–1324. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2019.06.002>
- Steiner, A. A. (1961). A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. *Plant and Soil*, *15*(2), 134–154. <https://doi.org/10.1007/BF01347224>
- Su, H., Li, S., Yiyun, J., Ziyue, X., Duowen, Y., Zhou, W., ... Kagan, K. (2017). Nanomaterial-based biosensors for biological detections. *Advanced Health Care Technologies*, *3*, 19–29. <https://doi.org/https://doi.org/10.2147/AHCT.S94025>
- Sykłowska-Baranek, K., Pietrosiuk, A., Naliwajski, M. R., Kawiak, A., Jeziorek, M., Wyderska, S., ... Chinou, I. (2012). Effect of l-phenylalanine on PAL activity and production of naphthoquinone pigments in suspension cultures of *Arnebia euchroma* (Royle) Johnst. *In Vitro Cellular and Developmental Biology - Plant*, *48*(5), 555–564. <https://doi.org/10.1007/s11627-012-9443-2>
- Taha, R. A., Hassan, M. M., Ibrahim, E. A., Abou Baker, N. H., & Shaaban, E. A. (2016). Carbon nanotubes impact on date palm in vitro cultures. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, *127*(2), 525–534. <https://doi.org/10.1007/s11240-016-1058-6>
- Takai, K., Tsujimura, S., Kang, F., & Inagaki, M. (2020). Electrical properties and applications. K. Takai, S. Tsujimura, F. Kang, & M. Inagaki (Eds.), In *Graphene* (First, pp. 173–249). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819576-5.00003-7>
- USDA, (United States Department of Agriculture). (2021). Tomato, roma. Recuperado el 5 de mayo de 2021, de <https://fdc.nal.usda.gov/fdc-app.html#/food-details/1750354/nutrients>
- Usman, M., Farooq, M., Wakeel, A., Nawaz, A., Alam, S., Ashraf, I., & Sanaullah, M. (2020). Science of the total environment nanotechnology in agriculture : current status , challenges and future opportunities. *Science of the Total Environment*, *721*, 137778. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137778>

- Vásquez Ramírez, L. M., & Castaño Zapata, J. (2017). Manejo integrado de la marchitez vascular del tomate [*Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* (Sacc.) W.C. Snyder & H.N. Hansen]: una revisión. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 20(2), 363–374. <https://doi.org/10.31910/rudca.v20.n2.2017.394>
- Venosta, L. F. (2019). *Propiedades estructurales y magneticas de nanomateriales basados en carbono*. Universidad Nacional de Córdoba. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.32576.58884>
- Verma, S. K., Das, A. K., Gantait, S., Kumar, V., & Gurel, E. (2019). Applications of carbon nanomaterials in the plant system: A perspective view on the pros and cons. *Science of the Total Environment*, 667, 485–499. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.409>
- Viskelis, P., Radzevicius, A., Urbonaviciene, D., Viskelis, J., Karkleliene, R., & Bobinas, C. (2015). Biochemical parameters in tomato fruits from different cultivars as functional foods for agricultural, industrial, and pharmaceutical uses. H. El-Shemy (Ed.), In *Plants for the future* (pp. 137–144). IntechOpen. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.5772/60873>
- Wang, X., Cai, A., Wen, X., Jing, D., Qi, H., & Yuan, H. (2017). Graphene oxide-Fe₃O₄ nanocomposites as high-performance antifungal agents against *Plasmopara viticola*. *Science China Materials*, 60(3), 258–268. <https://doi.org/10.1007/s40843-016-9005-9>
- Wang, X., Liu, X., Chen, J., Han, H., & Yuan, Z. (2014). Evaluation and mechanism of antifungal effects of carbon nanomaterials in controlling plant fungal pathogen. *Carbon*, 68, 798–806. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2013.11.072>
- Wang, X., Liu, X., & Han, H. (2013). Evaluation of antibacterial effects of carbon nanomaterials against copper-resistant *Ralstonia solanacearum*. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 103, 136–142. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2012.09.044>
- Waśkiewicz, A., Beszterda, M., & Goliński, P. (2014). Nonenzymatic antioxidants in plants. P. Ahmad (Ed.), In *Oxidative Damage to Plants: Antioxidant Networks and Signaling* (pp. 201–234). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-799963-0.00007-1>
- Wozniak, E., Blaszczyk, A., Wiatrak, P., & Canady, M. (2020). Biostimulant mode of action: impact of biostimulant on cellular level. D. Geelen & L. Xu (Eds.), In *The Chemical Biology of Plant Biostimulants* (First Edit, pp. 229–243). John Wiley & Sons Ltd.
- Xiang, Q., Lott, A. A., Assmann, S. M., & Chen, S. (2020). Advances and perspectives in

- the metabolomics of stomatal movement and the disease triangle. *Plant Science*, 302, 110697. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2020.110697>
- Xie, Y., Hu, X., Zhang, Y., Wahid, F., Chu, L., Jia, S., & Zhong, C. (2019). Development and antibacterial activities of bacterial cellulose/graphene oxide-CuO nanocomposite film. *Carbohydrate Polymers*, 229, 115456. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115456>
- Xue, T., Hartikainen, H., & Piironen, V. (2001). Antioxidative and growth-promoting effect of selenium on senescing lettuce. *Plant and Soil*, 237(1), 55–61. <https://doi.org/10.1023/A:1013369804867>
- Yakhin, O. I., Lubyantsev, A. A., Yakhin, I. A., & Brown, P. H. (2017). Biostimulants in plant science: a global perspective. *Frontiers in Plant Science*, 7(2049). <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.02049>
- Zaytseva, O., & Neumann, G. (2016). Carbon nanomaterials: production, impact on plant development, agricultural and environmental applications. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 1–26. <https://doi.org/10.1186/s40538-016-0070-8>
- Zhang, Y., Bai, Y., & Yan, B. (2010). Functionalized carbon nanotubes for potential medicinal applications. *Drug Discovery Today*, 15(11–12), 428–435. <https://doi.org/10.1016/j.drudis.2010.04.005>
- Zhu, Y., Xu, F., Liu, Q., Chen, M., Liu, X., Wang, Y., ... Zhang, L. (2019). Science of the total environment nanomaterials and plants: positive effects, toxicity and the remediation of metal and metalloid pollution in soil. *Science of the Total Environment*, 662, 414–421. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.234>
- Zorzoli, R., Pratta, G. R., Rodríguez, G. R., & Picardi, L. A. (2007). Advances in biotechnology: tomato as a plant model system. *Functional Plant Science and Biotechnology*, 1(1), 146–159.
- Zuverza-Mena, N., Martínez-Fernández, D., Du, W., Hernandez-Viezcas, J. A., Bonilla-Bird, N., López-Moreno, M. L., ... Gardea-Torresdey, J. L. (2017). Exposure of engineered nanomaterials to plants: Insights into the physiological and biochemical responses-A review. *Plant Physiology and Biochemistry*, 110, 236–264. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.05.037>