

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE BOTÁNICA



Aplicación de Nanopartículas de Selenio, Silicio y Cobre en el Crecimiento y
Desarrollo del Cultivo de Pimiento Morrón (*Capsicum annuum* L).

Por:

ULICES LINARES NIETO

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN AGROBIOLOGÍA

Saltillo, Coahuila, México.
Junio 2019

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO DE BOTÁNICA

Aplicación de Nanopartículas de Selenio, Silicio y Cobre en el Crecimiento y
Desarrollo del Cultivo de Pimiento Morrón (*Capsicum annum L.*)

Por:

ULICES LINARES NIETO

TESIS:

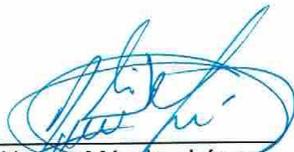
Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN AGROBIOLOGÍA

Aprobada por el Comité de Asesoría:



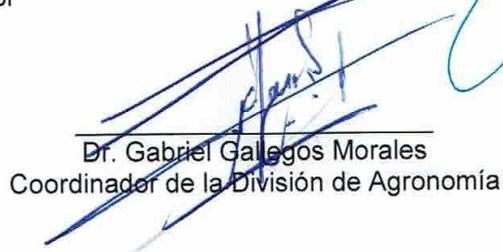
Dr. Antonio Juárez Maldonado
Asesor Principal



Dr. Alonso Méndez López
Coasesor



Dr. Jesús Valdés Reyna
Coasesor



Dr. Gabriel Gallegos Morales
Coordinador de la División de Agronomía



Saltillo, Coahuila, México.
Junio 2019

DEDICATORIAS

A mi familia:

A mi madre **Josefina Nieto Vega**, quien siempre me motivo a seguir luchando por mis metas, estar presente en los buenos y malos momentos, por brindarme su apoyo a pesar de mis equivocaciones, por hacerme sonreír cuando me siento mal, por ser esa maravillosa persona, quien hace especial mi existencia, te amo mamá.

A mi padre el **sr. Francisco Inares Lugo**, por apoyarme a lo largo de mi carrera y de mi vida, sabes que sin tu apoyo jamás hubiera logrado este sueño, por aconsejarme y orientarme a tomar un buen camino, por ofrecerme un abrazo cuando más lo necesito, por tratar de darnos lo mejor y por haber creído en mí, te amo papá.

A mis hermanas, **Olivia, Monserrat, Sarahi, Yadira, Yoselin, Anahí y Getsemaní**, por motivarme a cumplir este gran sueño, por escucharme y por brindarme su cariño, por cada momento vivido de alegría y tristeza.

A mis hermanos, **Eric, Francisco y Omar** por apoyarme cuando se me presentaban dificultades en el camino, por escucharme y apoyarme en cada situación.

AGRADECIMIENTOS

Principalmente mis padres **Josefina Nieto** y **Francisco Linares** quienes me apoyaron incondicionalmente en mi carrera universitaria.

A la **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro**, la cual me ha dado mucho sobre conocimiento, amistades, crecimiento personal, por formalizarme profesionalmente.

Al **Dr. Antonio Juárez Maldonado**, por el tiempo dedicado a mi trabajo, por apoyarme y aconsejarme durante la carrera.

Al **Dr. Alonzo Méndez López**, por el conocimiento transmitido, por su importante contribución en este proyecto, que sirvieron para reforzar mi trabajo.

Al **Dr. Jesús Valdez Reyna**, por brindarme conocimiento y su dedicación para enriquecer mi trabajo.

A **Héctor Hernández Ramírez**, por compartir juntos este gran logro, por su apoyo y amistad incondicionalmente, más que un amigo es como mi hermano de sangre.

A mis amigos, **Bladimir, Abigail, Regina, Nelly, Mary** y **Everardo**, por apoyarme en muchas situaciones, por compartir momentos únicos y especiales.

Y especialmente a **José Armando Alvarado Alvarez**, por estar siempre a mi lado en las buenas y en las malas, apoyándome y motivarme a querer seguir adelante, agradezco por cada momento, por cada risa y por darme palabras de aliento cuando la tristeza me invade, gracias por formar parte de mi vida y por el gran cariño que me tienes que sabes que es mutuo.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIAS.....	iii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
ÍNDICE DE TABLAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
RESUMEN	ix
INTRODUCCIÓN	1
JUSTIFICACIÓN	3
OBJETIVOS	4
Objetivo general.....	4
Objetivos específicos.....	4
HIPÓTESIS	4
REVISIÓN DE LA LITERATURA	5
Descripción del pimiento	5
Importancia nutricional.....	6
Vitamina C	6
Importancia económica.....	7
La nanotecnología (NT).	7
Investigaciones en la NT orientada a la agricultura	8
Aplicaciones de la NT en la agricultura.	8
Aplicación de nanopartículas en la agricultura.	9
Efecto de las nanopartículas en el crecimiento y desarrollo de la planta.	11
Nanopartículas de elementos minerales.	11
NPs de silicio.....	13
NPs selenio.	14
NPs de óxido de cobre.....	15
Impactos negativos al medio ambiente y al humano aplicar NPs.	16
MATERIALES Y MÉTODOS.....	18
Ubicación del experimento	18
Desarrollo experimental.....	18
Variables evaluadas.....	20
Diseño estadístico	22
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	23

Peso fresco: tallo, hojas del cultivo	25
Rendimiento del cultivo	26
Calidad del fruto	29
Acidez titulable y vitamina C	31
CONCLUSIONES	33
LITERATURA CITADA.....	37

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tratamientos de NPs de Si, Se y Cu en diferentes dosis	19
Tabla 2. Altura final, diámetro y número de hojas en plantas de pimiento.	24
Tabla 3. Peso fresco de hoja, tallo, y raíz de la planta de pimiento.....	26
Tabla 4. Número de abortos, número de frutos y peso total de cosechas.	29
Tabla 5. Calidad del fruto de pimiento.....	31
Tabla 6. Acidez titulable y vitamina C en el pimiento morrón.	32

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Efecto de NPs-Cu en geles de quitosán sobre el crecimiento de plántulas de tomate.	16
Figura 2. Establecimiento del experimento y labores culturales.....	19
Figura 3. Medición de la altura de la planta.....	20
Figura 4. Medición del diámetro de la planta.....	20
Figura 5. Conteo de frutos y hojas	20
Figura 6. Fruto de la planta	20
Figura 7. Extracción de la pulpa de la fruta	21
Figura 8. Titulación para evaluar acidez titulable y contenido de vitamina C	21

RESUMEN

Se estableció un cultivo de pimiento variedad “kitrino” bajo condiciones de invernadero, con el objetivo de evaluar el efecto de la aplicación de nanopartículas (NPs) de selenio (Se), silicio (Si) y cobre (Cu) sobre el crecimiento, rendimiento y aumento en el contenido de vitamina C en frutos del cultivo de pimiento. Los tratamientos aplicados fueron: 10 mg·L⁻¹ NPs de selenio, 50 mg·L⁻¹ de NPs de selenio, 200 mg·L⁻¹ de NPs silicio, 1000 mg·L⁻¹ de NPs silicio, 100 mg·L⁻¹ de cobre, y 500 mg·L⁻¹ de cobre y un testigo absoluto. Se evaluaron las variables: altura, diámetro, número de hoja, peso fresco, calidad de fruto, acidez titulable, vitamina C, y rendimiento. El experimento se estableció bajo un diseño completamente al azar con 10 repeticiones por tratamiento. En los resultados se observó que la aplicación de los tratamientos mejoró los parámetros agronómicos. El tratamiento con NPs de Cu a 100 mg·L⁻¹ aumento el número de hoja a un 2.76% sobre el testigo absoluto y el tamaño del diámetro al 2.16%, el tratamiento con NPs de Cu a 500 mg·L⁻¹ aumento 5% de la altura sobre el testigo absoluto. El tratamiento con NPs de Se a 10 mg·L⁻¹ aumento el número de frutos en 7.2% y un peso total de cosecha a 7.57% sobre el testigo absoluto. El tratamiento con NPs de Si a 200 mg·L⁻¹ mejoró la firmeza del fruto a un 41.01%, se obtuvo un aumento de 7.92% en °Brix al aplicar NPs de Cu a 100 mg·L⁻¹, la conductividad eléctrica mejoró con NPs de Se a dosis de 10 mg·L⁻¹ sobre el testigo absoluto, se consiguió un resultado favorable al obtener números negativos en los ORP ya que esto indica un mayor potencial de antioxidantes el cual fue de 21.30% con NPs de Cu 100 mg·L⁻¹, mientras que el pH, acidez titulable y vitamina C no manifestaron efecto positivo, puesto que se obtuvieron resultados más bajos que el testigo absoluto.

INTRODUCCIÓN

El chile morrón forma parte del reducido género de hierbas tropicales que pertenece a la familia de la dulcamara solanáceas, se refiere a las variedades de chile dulce, hay muchas diversas variedades, de diferente crecimiento, tamaño, forma, color y pungencia del fruto (SIAP, 2010). Su gran diversidad genética conlleva a que existan varias posturas respecto a su denominación botánica. Sin embargo, la mayoría de los autores aceptan que es *Capsicum annum* la especie que engloba a casi todas las variedades cultivadas (Namesny, 2009).

Durante el 2009, México ocupó el segundo lugar a nivel mundial como productor de pimienta morrón con cerca de 2 millones de toneladas, en el mismo año China produjo 14 millones de toneladas ocupando el primer lugar en producción. En México la mayor parte de la producción de pimienta morrón se exporta hacia los Estados Unidos de América y Canadá, estas exportaciones han venido en ascenso llegando a un máximo de 229 mil toneladas en 2006 (Castellanos & Borbón, 2009).

La nanotecnología (NT) es considerada como una tecnología emergente, se orienta a la caracterización, elaboración y aplicación de materiales de dimensiones muy pequeñas, en el rango de 1 a 100 nanómetros (Yadollahi *et al.*, 2009).

Los diversos usos potenciales de la NT en la agricultura ofrecen la posibilidad de mejorar la producción agrícola mediante diversas estrategias que pueden incrementar la producción de los cultivos utilizando menores insumos de materiales y reduciendo los costos de producción y los desperdicios agroquímicos (Servín & White, 2016), para la producción de nano, macro y micronutrientes, así como para hacer más eficaz el uso y aplicaciones de los agroquímicos (Nuruzzaman *et al.*, 2016).

En la agricultura el uso de NT permite aplicar nanopartículas (NPs) de elementos minerales, los cuales tienen dimensiones diminutas para que la planta las asimile

más rápidamente ocasionando un mejor rendimiento, esto se debe a que las NPs se emplean como inductoras de crecimiento, en la producción de nanoencapsulados para la lenta liberación de fertilizantes, así como la formulación de nanoplaguicidas y nanoherbicidas (Lira *et al.*, 2017).

El silicio (Si) es un elemento fundamental para el crecimiento y desarrollo de los cultivos además juega un papel muy importante contra una gama de estrés biótico y abiótico. Otros efectos beneficiosos se manifiestan en diferentes niveles que va desde los cambios fisiológicos hasta la expresión de genes alterados (Khandekar & Leisner, 2011).

El selenio (Se) es un microelemento importante en el desarrollo de la planta, puesto que se ha descubierto que los alimentos que contienen selenio son ricos en proteínas y son fundamentales para el ser humano ya que tiene propiedades antioxidantes, además de tener resultados positivos en la respuesta inflamatoria, mejoramiento en la respuesta inmune y efectos anticancerígenos (Ryaman, 2008). El cobre (Cu) es un elemento que es considerable fundamental en el desarrollo de la planta en la formación de granos, semillas, y frutos, además de mejorar la calidad en la producción. En efecto, las deficiencias de Cu ocasionan la reducción en la producción de frutos y semillas (Kirkby & Romheld, 2007).

JUSTIFICACIÓN

El desarrollo y crecimiento son las etapas más importantes en el ciclo de vida de cualquier cultivo, ya que, en estas fases, es cuando la planta requiere los nutrientes fundamentales para alcanzar su madurez y que los frutos lleguen a cumplir las características que desea el productor.

El contenido de vitamina C en las frutas y verduras es considerable como antioxidantes que contribuyen a reducir el riesgo de enfermedades crónicas como el cáncer, enfermedades del corazón y trastornos como artritis, por lo que es importante mantener o aumentar la concentración de antioxidantes que benefician la salud.

La aplicación de elementos minerales mejora el desarrollo y crecimiento de los cultivos pero que a su vez las diversas concentraciones dependiendo del mineral empleado y al cultivo establecido no son completamente utilizables por la planta generando una expansión de minerales en áreas donde no se requieren, causando gastos en la inversión y una productividad baja.

Es importante buscar nuevas técnicas para obtener una mayor producción en los cultivos como la aplicación de nanopartículas vía drench de elementos minerales en pequeñas concentraciones que sean rápidamente asimilables y que tengan un mejor aprovechamiento de los nutrientes para las plantas, evitando pérdidas económicas para el agricultor.

OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar el efecto de la aplicación de nanopartículas silicio, selenio y cobre en el crecimiento, desarrollo y el rendimiento del cultivo de pimiento.

Objetivos específicos

1. Valorar si el suministro de nanopartículas de Si, Se y Cu incrementa el contenido de vitamina C en el cultivo de pimiento.
2. Definir si la utilización de nanopartículas de Si, Se y Cu mejora la calidad de los frutos del cultivo de pimiento.
3. Determinar si el uso de nanopartículas de Si, Se y Cu contribuye en rendimiento de la producción del pimiento.

HIPÓTESIS

La aplicación de nanopartículas de Si, Cu, y Se vía drench dirigido al suelo, influirá en forma benéfica en el desarrollo, crecimiento, rendimiento y en el contenido de vitamina C en plantas del cultivo de pimiento (*Capsicum annum* L.) ya que por su pequeña dimensión las nanopartículas tienen la capacidad de ser rápidamente asimiladas por la planta.

REVISIÓN DE LA LITERATURA

El pimiento es originario de América del sur, de la zona de Bolivia y Perú; al igual que otras especies vegetales, rápidamente se incorporó al elenco de los productos saborizantes y de las hortalizas del viejo mundo. En la actualidad, cerca de la mitad del pimiento en el mundo se cultiva en el área del Mediterráneo. Es parte de las hortalizas cultivadas en la mayor parte del mundo y en España es una de las hortalizas que ha tenido resultados más favorables durante los últimos años. Al igual que el tomate, el pimiento pertenece a la familia botánica de las solanáceas, posee una diversa variabilidad genética que conlleva a que existan varias posturas respecto a su denominación botánica. Por lo tanto, la mayoría de los autores aprueban que es *Capsicum annum* la especie que abarca la mayoría de las especies cultivadas (Namesny, 2009).

Descripción del pimiento

Botánicamente el pimentón pertenece al orden solanales, siendo una planta herbácea autótrofa, de hojas alternas y espiraladas o subopuestas, sin estípulas y con margen entero o lobulado, de flores perfectas actinomorfas, solitarias, con cáliz y corola pentámeras, estambres usualmente en igual número que los pétalos, dispuestos en la base de la corola y alternando con los lóbulos. En las flores los pétalos forman una corola tubular en la base, cáliz es acampanado, la corola es estrellada. Los estambres pueden ser iguales o desiguales, los filamentos son en general cortos e insertos en la base de la corola. El fruto es una baya seca, con muchas semillas chatas. Las semillas se hallan rodeadas de una sustancia mucilaginosa que impide la germinación. El ovario es bicarpelar, con numerosos óvulos (Jaramillo *et al.*, 2014).

Importancia nutricional

El tejido comestible del fruto de pimiento tiene como principales componentes el agua, hidratos de carbono, lo que hace que sea una hortaliza con un bajo aporte calórico, y una buena fuente de fibra. Al igual que el resto de las hortalizas, su contenido proteico es muy bajo; aporta grasas y son muy ricos en vitaminas, sobre todo los de color rojo. De hecho, llega a contener más del doble de la que se encuentra en frutas como la naranja o las fresas. Es una buena fuente de carotenos, entre los que se encuentra la capsaicina, pigmento con propiedades antioxidantes que aporta el característico color rojo. Se destaca su contenido de provitamina A (Betacaroteno criptoxantina) de folatos, también de vitaminas C, E y del grupo B. Estos contenidos junto con los carotenos convierten al pimentón en una importante fuente de antioxidantes, con los beneficios que estas sustancias aportan a la salud humana (Jaramillo *et al.*, 2014).

Vitamina C

La vitamina C o ácido ascórbico es un monosacárido hidrosoluble que se encuentra en alimentos, es destruido por el calor, la oxidación y los álcalis, se clasifica como un antioxidante exógeno, es decir; que debe ser ingerida en la dieta, mediante frutos, hortalizas o suplementos vitamínicos. La vitamina C por sus propiedades favorece la absorción de hierro a nivel intestinal, regenera la forma oxidada de la vitamina E y como antioxidante neutraliza el oxígeno singlete y captura radicales hidroxilo, disminuyendo los daños oxidativos de lípidos, proteínas y ácidos nucleicos causados por especies de oxígeno reactivo, que incluyen los radicales libres que es un fenómeno continuo con implicaciones en el envejecimiento y la carcinogénesis. Estudios indican que la vitamina C puede impedir mutaciones en el ADN humano, y a altas concentraciones puede reducir mutaciones causadas por el estrés oxidativo en células humanas *in vitro* (García-Gonzales *et al.*, 2016).

Importancia económica

En 2011, México produjo 2.1 millones de toneladas en 144 mil hectáreas, de los cuales 7.5 % de la superficie cosechada y 14.1 % de la producción obtenida correspondió al estado de Sinaloa. En el país la mayor parte de la producción de pimiento morrón se destina a la exportación, tanto la que se genera a campo abierto como bajo condiciones protegidas; de esta variedad se siembran aproximadamente 6 mil ha, con rendimientos en campo hasta de 50 toneladas/ha por año, y la exportación a los Estados Unidos y Canadá fue de 240 mil toneladas en 2006 (Castellanos & Borbón, 2009).

La nanotecnología (NT).

La NT representa una de las más novedosas innovaciones científicas, y en muchos sentidos, la de mayor alcance en lo referente a la alta tecnología para la agricultura y los alimentos frescos. Se estima que en la actualidad en todo el mundo hay más de 300 nanoproductos alimenticios disponibles en el mercado y se prevé que para el 2015 la NT se utilizará en el 40% de las industrias de alimentos. Se ha acuñado el término “nanobiotecnología”, combina numerosas disciplinas científicas tan variadas como la biotecnología, la nanotecnología, el procesamiento químico, la ciencia de los materiales y la ingeniería de sistemas (Maine *et al.*, 2013).

La nanotecnología es un extenso campo de la investigación interdisciplinaria, ya que con ella se abre un amplio rango de oportunidades en distintas áreas como la medicina, la industria farmacéutica, la electrónica y la agricultura sustentable (Prasad *et al.*, 2014).

Investigaciones en la NT orientada a la agricultura

En años recientes muchos esfuerzos se han venido realizando en centros de investigación e instituciones de educación superior de todo el mundo, para motivar la investigación sobre NT con el fin de encontrar numerosas aplicaciones de esta emergente ciencia en la producción sustentable de alimentos y cultivos (Ditta *et al.*, 2015; Kashyap *et al.*, 2015). En este contexto, la bioencapsulación de agroquímicos y microorganismos benéficos ha desarrollado una gran relevancia porque es una manera de controlar plagas y enfermedades con bajo impacto ambiental, lo cual reduce la cantidad de agroquímicos que dañen los ecosistemas de una manera más amigable con el medio ambiente (Grillo *et al.*, 2016).

Es por eso las inversiones en agricultura y alimentación nanotecnológica van en aumento, debido a que sus beneficios potenciales se enfocan a mejorar la calidad e inocuidad de los insumos agrícolas al ser utilizados en menor volumen y promoviendo mejoras en la nutrición de los cultivos (Razzaq *et al.*, 2016).

Aplicaciones de la NT en la agricultura.

La nanotecnología tiene el potencial de revolucionar la industria agrícola y alimentaria con nuevas herramientas para el tratamiento molecular de enfermedades, la detección rápida de enfermedades, mejorar la capacidad de las plantas para absorber nutrientes, etc. Los sensores inteligentes y sistemas de entrega inteligentes ayudarán a la industria agrícola a combatir virus y otros patógenos de cultivos. En un futuro estarán disponibles catalizadores nanoestructurados que aumentarán la eficacia de los pesticidas y herbicidas, permitiendo el uso de dosis más bajas. La nanotecnología también protegerá el medio ambiente indirectamente mediante el uso de suministros de energía alternativa renovable y filtros o catalizadores para reducir la contaminación y limpiar los contaminantes que existen en el suelo (Ditta, 2012).

Los diversos usos potenciales de la NT en la agricultura han creado un gran interés, ya que ofrecen la posibilidad de mejorar la producción agrícola mediante diversas estrategias que pueden incrementar la producción de alimentos utilizando menores insumos y reduciendo los costos de producción y minimizando desperdicios de agroquímicos (Servin & White, 2016).

Las aplicaciones de la NT en la agricultura son muy diversas, destacando principalmente la elaboración de nanopesticidas encapsulados para su liberación controlada (Grillo *et al.*, 2016), para la producción de nano, macro y micronutrientes, así como para hacer más eficiente el uso y aplicaciones de los agroquímicos en los cultivos agrícolas (Nuruzzaman *et al.*, 2016).

Algunos materiales como arcillas y zeolitas pueden ser empleados al nivel nano para mejorar la capacidad de retención de agua en el suelo, y además actúan como materiales de lenta liberación de agua y fertilizantes, los cuales incrementan la eficiencia en el uso de este recurso hídrico y de los nutrientes por las plantas (Sekhon, 2014).

Aplicación de nanopartículas en la agricultura.

Uno de los objetivos en la elaboración de nanopartículas (NPs) es la reducción a los daños de tejidos vegetales, pero también minimización de cantidades de químicos dañinos que contaminan el medio ambiente. Hay algunos nanoproductos que se han desarrollado para usar como mejoradores del suelo que promueven la distribución uniforme de agua y almacenamiento. Varios de los desarrollos más importantes en producción de productos en la nanotecnología son nanomateriales, nanoestructuras, nanofibras, nanotubos, etc. Con características físicas, mecánicas únicas y propiedades químicas que los hacen electroquímicamente activos. Tales dispositivos juegan un papel importante en plantas (Prasanna, 2007).

Las NPs pueden servir como "balas mágicas", que contienen herbicidas, productos químicos o genes, que se dirigen a partes particulares de la planta para liberar su contenido. Las cápsulas nano permiten la penetración efectiva de herbicidas a través de las cutículas y los tejidos, permitiendo la liberación lenta y constante de las sustancias activas (Pérez & Rubiales, 2009).

Usar nanopartículas y nano cápsulas de pesticidas es más efectivo y amigable con el medioambiente; y producción de nanocristales para aumentar la eficacia de los pesticidas para su aplicación con dosis más bajas. Las nanopartículas para el suministro de ingredientes activos o moléculas de fármaco estarán a la cabeza en un próximo futuro para la terapia de todos los padecimientos patológicos de las plantas. Hay innumerables nanomateriales que integran nanopartículas poliméricas, nanopartículas de óxido de hierro y nanopartículas de oro que pueden sintetizarse fácilmente y explotarse como cargas secundarias de suministro de pesticidas o fármacos (Sharon *et al.*, 2010).

Por otro lado, respecto al uso de NPs en el área de los fertilizantes químicos o tradicionales, en China se ha reportado la preparación de nanocompuestos conteniendo fertilizantes de liberación lenta, lo cual es un importante avance en la nutrición vegetal (Liu *et al.*, 2016). Actualmente los nanodispositivos se consideran que tendrán la capacidad de detectar una infección, la deficiencia de nutrientes en las plantas, o cualquier otro problema de fitosanidad, mucho antes de que los síntomas sean evidentes en la escala macro (Scott & Chen, 2013). Este tipo de tratamiento puede ser dirigido a la zona afectada con una mayor conciencia sobre los riesgos asociados con el uso de plaguicidas sintéticos o tradicionales. Debido al efecto adverso en los agroecosistemas, se ha originado una necesidad urgente de explorar productos alternativos para el control de plagas y enfermedades (Rai & Ingle, 2012).

Las nanocápsulas ayudarán a reducir problemas en los cultivos mediante la utilización de herbicidas sistémicos contra malezas parásitas (Yin *et al.*, 2012). La

nanoencapsulación puede mejorar la aplicación de herbicidas, proporcionando una mejor penetración a través de cutículas y tejidos, ya que permite la liberación lenta y constante de las sustancias activas (Amemiya *et al.*, 2005).

La conversión directa de la energía solar a electricidad a partir de las proteínas responsables de la fotosíntesis en las hojas de las plantas es otro ejemplo de una nueva aplicación de las NPs en la agricultura, tal y como lo han demostrado investigadores de la Universidad Vanderbilt (Scott & Chen, 2013).

Efecto de las nanopartículas en el crecimiento y desarrollo de la planta.

Las nanopartículas interactúan con las plantas y provocan muchos cambios morfológicos y fisiológicos, según las propiedades de las NPs. La eficacia de las NPs se determina por su composición química, tamaño, cobertura superficial, reactividad y, lo que es más importante, la dosis a la que son eficaces (Khodakovskaya *et al.*, 2012).

Nanopartículas de elementos minerales.

Algunas NPs como las de CuO muestran un efecto positivo sobre la reactividad de fitohormonas, especialmente del ácido indolacético (AIA), así como del ácido salicílico, esto hace que se facilite o incremente la acción fitoestimulante de las NPs (Wang *et al.*, 2014).

Las NPs de óxido de zinc (NPsZnO) son usadas en diferentes áreas como la industria de cosméticos, textiles, medicina, electricidad y en la agricultura (Chang, *et al.*, 2012). En el sector agrícola son estudiadas por su actividad antimicrobial (Fang *et al.*, 2013). Trabajos efectuados en diversas especies de plantas confirman que las NPsZnO promueven la germinación y crecimiento de plántulas (Siddiqui *et al.*, 2015).

El efecto de las NPs de óxido de zinc ZnO en el crecimiento de las plantas, podría relacionarse a la actividad que tiene el zinc como precursor en la producción de auxinas reguladoras del crecimiento, las cuales también promueven la elongación y división celular (Rehman *et al.*, 2012). Además, se comprobó que el zinc es uno de los nutrientes esenciales y un componente muy importante de varias enzimas responsables de muchas reacciones metabólicas (Shyla & Natarajan, 2014), de igual manera desempeña una importante función en la elaboración de clorofila; germinación de semillas; producción de polen y biomasa (Pandey *et al.*, 2010).

Por otra parte, ha sido puntualizado que las nanopartículas de plata (NPsAg) en concentraciones bajas poseen un efecto positivo en la germinación de semillas y en la promoción del crecimiento en plantas. Sharma *et al.* (2012), reportaron que las NPsAg promueven el crecimiento de plántulas de mostaza *Brassica juncea* en concentraciones de 25 y 50 mg L⁻¹, reflejándose en mayor longitud de raíz, biomasa seca y altura. Sin embargo, altas concentraciones 250-500 mg de suelo, inhibieron la germinación y crecimiento de las plantas de haba. Estos incrementos podrían estar relacionados con la producción endógena de fitohormonas como citoquininas y giberelinas, las cuales están implicadas en la división y elongación celular, respectivamente. Además, estas NPs pueden mejorar la eficiencia de intercambio de electrones a nivel celular en las plantas, lo que podría reducir la formación de las dañinas especies reactivas de oxígeno (Dimkpa *et al.*, 2015).

Otras NPs como las de TiO₂ aplicadas al follaje, muestran un incremento en la actividad de varias enzimas y promueven la absorción del nitrato, el cual acelera la transformación del nitrógeno inorgánico a orgánico haciéndolo más asimilable, reflejándose esto en mayor crecimiento vegetal (Capaldi *et al.*, 2015).

Estos resultados pueden servir de base para considerar el uso de NPs magnéticas como un sistema acarreador de drogas para remediar enfermedades bacterianas. Por otro lado, Zhu *et al.* (2008), observo que las plantas de calabaza *Cucurbita*

maxima, al aplicarles NPs de magnetita (Fe_3O_4), pueden absorber, traslocar y acumular las NPs en el tejido vegetal.

Diversas investigaciones han demostrado que tanto las NPs de carbón, como las metálicas, son capaces de producir estrés en las plantas, generando un exceso de ROS (especies reactivas del oxígeno), que pueden afectar las proteínas, lípidos, carbohidratos y ADN. Las NPs alteran la eficiencia fotosintética, la fluorescencia fotoquímica y el rendimiento cuántico en las plantas, debido a las interacciones de estas con los fotosistemas I y II, ya que estudios han demostrado que las clorofilas transfieren la energía a las NPs (Olejnik *et al.*, 2013; Rico *et al.*, 2015).

Pocos estudios se han realizado sobre la interacción de la nanopartícula de oro (AuNP) con las plantas. Algunos investigadores encontraron que los AuNP inducen toxicidad en las plantas al inhibir la función de aquaporina, un grupo de proteínas que ayudan en el transporte de una amplia gama de moléculas, incluido el agua (Shah & Belozeroova, 2009).

Las NPs de oro mejoran la germinación de la semilla, mejora el número de hojas, el área foliar, la altura de la planta, el contenido de clorofila y el contenido de azúcar que conducen a un mejor rendimiento del cultivo (Arora *et al.*, 2012).

NPs de silicio

El crecimiento y desarrollo de las plantas comienza con la germinación de las semillas seguida de la elongación de la raíz y la emergencia del brote como los primeros signos de crecimiento y desarrollo. Por lo tanto, es importante comprender el curso del crecimiento y desarrollo de las plantas en relación con las NPs. Los datos informados de varios estudios sugirieron que el efecto de las NPs sobre la germinación de la semilla dependía de las concentraciones. Las concentraciones más bajas de dióxido de nano silicio y nano SiO_2 mejoraron la germinación de la semilla del tomate (Siddiqui & Al-Whaibi, 2014). Bao-shan *et al.*

(2004), aplicaron exógenamente nano SiO₂ sobre plántulas de alerce de Changbai (*Larix olgensis*) y encontraron que nano SiO₂ mejoró el crecimiento y la calidad de las plántulas, incluida la altura media, el diámetro de la raíz, la longitud de la raíz principal y el número de raíces laterales de las plántulas y también indujo la síntesis de clorofila. Bajo estrés abiótico, nano SiO₂ aumenta la germinación de la semilla. Haghghi *et al.* (2012), en tomate y Siddiqui *et al.* (2014), en squash informaron que el nano-SiO₂ mejoró la germinación de las semillas y estimuló el sistema antioxidante bajo el estrés de NaCl. Shah y Belozerova en el 2009 probaron sílicas, paladio, oro y cobre en su estudio y encontraron que todas estas NP tienen una influencia significativa en las semillas de lechuga. La aplicación exógena de nano-SiO₂ y dióxido de nano titanio y nano TiO₂ mejora la germinación de semillas de soja al aumentar el nitrato reductasa (Lu *et al.*, 2002).

Bajo estrés por salinidad, las nanopartículas de SiO₂ mejora el peso fresco y seco de la hoja, el contenido de clorofila y la acumulación de prolina. Un aumento en la acumulación de prolina, aminoácidos libres, contenido de nutrientes, actividad de enzimas antioxidantes debido al nanopartículas de SiO₂, mejorando así la tolerancia de las plantas al estrés abiótico (Kalteh *et al.*, 2014; Haghghi *et al.*, 2012; Li *et al.*, 2012; Siddiqui *et al.*, 2014).

NPs selenio.

Las nanopartículas de selenio actúan como un posible agente quimiopreventivo con toxicidad reducida. Se ha informado que las nanopartículas de selenio tienen altas actividades biológicas y baja toxicidad. Por lo tanto, las nanopartículas de selenio causaron gran interés de los investigadores y se han explotado una variedad de métodos de síntesis (Manavi *et al.*, 2017).

Está bien documentado que el Se contiene propiedades que lo convierten en un elemento único en relación con otros metales y metaloides. Por varias razones, los investigadores eligieron el selenio debido a su aplicación en ciencias ecológicas y

ecotoxicología. El selenio puede ejercer diversos efectos beneficiosos a bajas concentraciones, incluidas las actividades de promoción del crecimiento de las plantas superiores (Hawkesford *et al.*, 2014; Hasanuzzaman *et al.*, 2012). La tolerancia de las plantas al aumentar su capacidad antioxidante (Tang *et al.*, 2015) y el aumento de la resistencia de la planta contra el estrés oxidativo (Zhang *et al.*, 2001).

NPs de óxido de cobre.

Existen numerosas publicaciones científicas que evidencian las propiedades antimicrobianas de nanopartículas metálicas como el cobre. Se ha probado su poder antimicrobiano frente *Bacillus subtilis*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Salmonella choleraesuis* y *Candida albicans*. Además, hay evidencia que demuestra las propiedades bactericidas de nanopartículas fabricadas a partir de polímeros naturales como el quitosano. Se ha encontrado que estas partículas de biopolímero presentan actividad antimicrobiana frente a *Staphylococcus aureus*, *Listeria monocitogenes*, *Salmonella typhimurium* y *Escherichia coli* y *Streptococcus mutans*. En la literatura disponible, existe evidencia de la actividad antimicrobiana nanopartículas de óxido de cobre (CuONP) frente a *Streptococcus mutans*, sin embargo, no existen reportes de nanopartículas de cobre puro sobre este microorganismo (Trepiana, 2015). Además, estudios demuestran que nanopartículas metálicas, como el cobre, soportadas en una matriz de quitosano, presentan mejoras en sus propiedades (Cruzat, 2010).

NPsCu fueron sintetizadas para evaluar la acción antifúngica en tomate (*Solanum lycopersicum Mill*). El tratamiento con NPsCu demostró un efecto importante en el desarrollo del tomate, tanto en la germinación, como el desarrollo de las plántulas, peso seco y peso fresco. Las concentraciones de 61.5 y 83.0% provocaron inhibición en la germinación de las esporas de *Alternaria solani* y *Fusarium oxysporum*, respectivamente, en un modelo *in vitro* entre los tratamientos, el crecimiento micelial *in vitro* y la germinación de las esporas de *A. solani* y el *F.*

oxysporum se inhibió eficazmente en las concentraciones de 0.10 y 0.12% de NPsCu. La síntesis de NPsCu en geles de quitosán abre la posibilidad para su uso contra hongos y enfermedades a nivel de campo abierto (Rivera–Jaramillo, 2017).

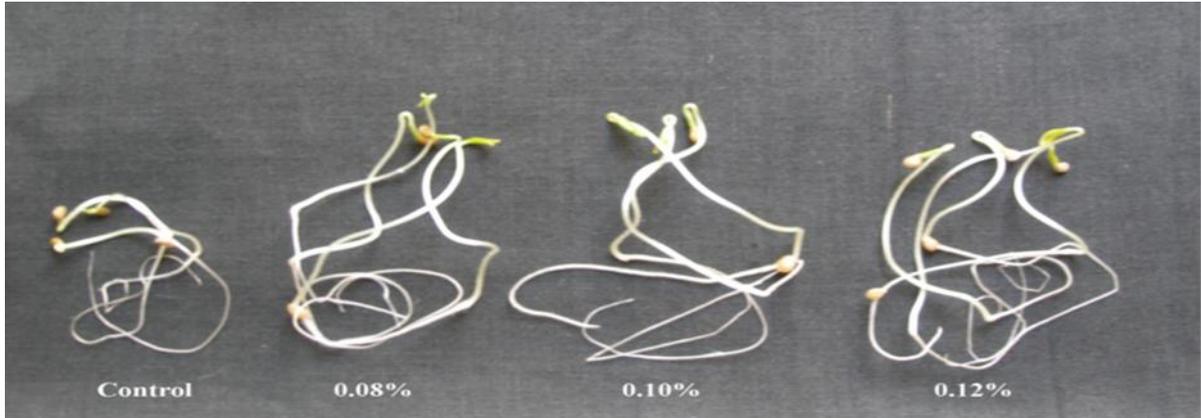


Figura 1. Efecto de NPs-Cu en geles de quitosán sobre el crecimiento de plántulas de tomate (Rivera- Jaramillo, 2017).

Impactos negativos al medio ambiente y al humano aplicar NPs.

Toda nueva tecnología supone riesgos, las nanotecnologías no son excepción. El tamaño de las nanopartículas despierta sospechas de sus posibles riesgos a la salud humana; ya que partículas de tamaño semejante, que son subproducto de procesos productivos como el humo de la combustión de los motores o el asbesto pueden provocar cáncer (Foladori *et al.*, 2012).

El panorama resulta ser muy complicado, hay nanopartículas de muy diferentes materiales, combinadas de distintas formas y que exponen a los seres vivos de variadas maneras. Las nanopartículas de plata pueden interactuar con el material genético modificándolo y afectando la replicabilidad de un organismo (Yang *al et.*, 2009).

Entre el año 2000 y finales de 2010 se han acumulado 176 artículos sobre riesgos de los nanotubos de carbono, 190 sobre riesgos de la nanoplata y 70 sobre riesgos del dióxido de titanio nanomanufacturado, entre otros materiales

clasificados. La acumulación de información científica ya no permite ignorar la duda razonable de que varias nanopartículas sean tóxicas para la salud humana y el medio ambiente. El problema de la toxicidad no se reduce a la salud humana, también afecta al medio ambiente, donde la acumulación de nanopartículas puede causar estragos en los ecosistemas y en las cadenas tróficas, lo cual obliga a un análisis del ciclo de vida de las nanopartículas (Foladori *et al.*, 2012).

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación del experimento

El presente trabajo se realizó en un invernadero tipo multitunel con cubierta de polietileno en Departamento de Botánica de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN). Ubicada en Saltillo, México (coordenadas 25°21'21.50 latitud Norte y 101° 2'10.82 longitud Oeste, a una altitud de 1763 msnm).

Desarrollo experimental

Se germinaron semillas de pimiento variedad “kitrino” de crecimiento indeterminado en charolas de poliestireno. Las plántulas se desarrollaron durante 52 días, el trasplante se realizó en macetas de 12 L con una mezcla de peat moss y perlita 1:1 (v/v) (Figura 2). Se usó como medio de nutrición solución nutritiva Steiner (Steiner, 1961) mediante un sistema de riego dirigido para proveer los nutrientes necesarios para el crecimiento de la planta. El aporte de los nutrientes fue ajustado manejando la concentración de la solución Steiner aplicada en diferentes concentraciones de acuerdo con sus etapas fenológicas: crecimiento 25% de concentración, desarrollo vegetativo, floración 50 % de concentración, amarre de fruto al 75% de concentración, desarrollo del fruto y cosechas 100% de concentración. En las labores culturales en el ciclo del cultivo se tutoro (tipo holandés) a la planta para darle soporte a medida que esta iba creciendo, también se realizaron podas, conduciendo a la planta a 2 tallos y se tomó datos de parámetros agronómicos cada 15 días.



Figura 2. Establecimiento del experimento y labores culturales.

Tratamientos

Se aplicaron diferentes NPs (NPsSe, NPsCu y NPsSi) en diferentes dosis como tratamientos, las aplicaciones de NPs fueron 10 ml por planta de solución vía suelo en intervalos de 30 días a partir del trasplante con un total de 5 aplicaciones (Tabla 1).

Tabla 1. Tratamientos de NPs de Si, Se y Cu en diferentes dosis

Tratamientos	Dosis
T.0	0 mg L ⁻¹
NPsSe	10 mg L ⁻¹
NPsSe	50 mg L ⁻¹
NPsSi	200 mg L ⁻¹
NPsSi	1000 mg L ⁻¹
NPsCu	100 mg L ⁻¹
NPsCu	500 mg L ⁻¹

Variables evaluadas

Los parámetros agronómicos evaluados fueron: la altura de la planta la cual se midió con una cinta métrica, el diámetro del tallo mediante un vernier digital, a simple vista se contó número de hojas, número de frutos, número de abortos, y se evaluó peso fresco de la planta, fruto y raíz con una báscula analítica cada 15 días durante el ciclo del cultivo (Figuras 3, 4, 5 y 6).



Figura 4. Medición del diámetro de la planta



Figura 3. Medición de la altura de la planta

Figura 5. Conteo de frutos y hojas

Figura 6. Fruto de la planta

En cuanto a la calidad de fruto, para medir la firmeza, se utilizó un penetrómetro con el cual se inspecciona la resistencia de los frutos indicando los diferentes tamaños y durezas. Para conocer el pH y la conductividad eléctrica (CE) se

determinó con un potenciómetro digital, y los sólidos solubles (°Brix) con un refractómetro digital.

La acidez titulable (% de ácido cítrico) se calculó tomando 10 ml de pulpa de cada fruto, a la cual se añadieron 2 gotas de fenolftaleína (1%) y se tituló con NaOH 0.1 N hasta teñirse de color rosa (Figura 7).

El contenido de vitamina C se determinó por el método de titulación con 2,6 diclorofenolindofenol (AOAC, 1968). Se pesaron 10 g de fruto fresco y se maceraron en un mortero con 10 ml de HCl al 2%, después se filtró a través de una gasa absorbente estéril sobre un matraz de aforación de 100 ml. Se tomó una alícuota de 10 ml y se tituló con 2,6 diclorofenolindofenol hasta obtener una coloración rosácea (Figura 8).

Los resultados se expresaron en mg/100 g de peso fresco.



Figura 8. Extracción de la pulpa de la fruta

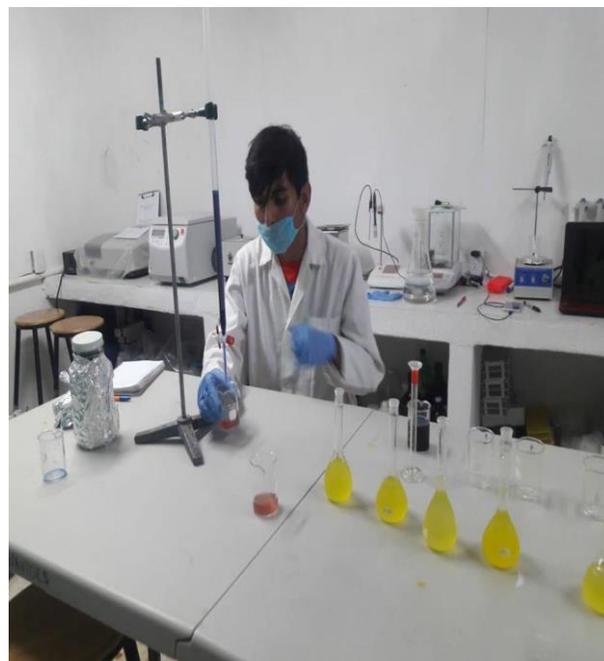


Figura 7. Titulación para evaluar acidez titulable y contenido de vitamina C

Diseño estadístico

Cada planta corresponde a una unidad experimental, para las variables agronómicas (altura de la planta, diámetro del tallo, número de hojas número de frutos, se evaluaron 10 plantas por cada tratamiento. En el caso de la calidad de fruto se valoraron cinco repeticiones por tratamiento. Para el desarrollo del experimento se usó un diseño de bloques completos al azar. Para detectar la existencia de diferencias estadísticas entre tratamientos se realizó un ANOVA, adicionalmente se realizó una prueba de comparación de medias según LSD ($p < 0.05$). Todos los análisis estadísticos los cuales se llevaron a cabo en el software estadístico infoStat versión 2018.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La aplicación de nanopartículas de Se, Si y Cu en diferentes dosis en plantas de pimiento morrón mejoraron el crecimiento y el rendimiento del cultivo ya que se presentan resultados favorables al emplearlas como inductoras de crecimiento.

En la Tabla 2, se muestra que no hubo diferencias significativas en la variable altura final en los distintos tratamientos aplicados a la planta; sin embargo, en forma numérica si se observan diferencias donde el mejor resultado fue con nanopartículas de cobre en dosis de $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ con una altura de 190.50 cm y con una diferencia mayor de 5% sobre el testigo absoluto. Cabe mencionar que el resultado más bajo se obtuvo con nanopartículas de Si con dosis de $1000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ con una altura de 153.80 cm y con una diferencia menor sobre el testigo absoluto del 15.22 %.

Estos resultados concuerdan con los obtenidos Hhan *et al.* (2014), quienes en un experimento donde se trabajó con plántulas de algodón transgénico, a las cuales se les aplicó nanopartículas de dióxido de silicio en dosis de $2000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, no afectaron la altura de las plantas de algodón, esto se debe a que los diversos nanomateriales tienen diferentes efectos sobre los cultivos, y en grandes cantidades estos pueden reaccionar de manera negativa.

Los tratamientos presentaron diferencias significativas en el grosor de tallo, ya que se observó que al aplicar las nanopartículas de cobre en dosis de $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ se obtuvo un mejor diámetro de 18.38 mm con diferencia mayor al testigo absoluto de 2.16%. El tratamiento con menor diámetro fue con nanopartículas de Si con dosis de $1000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ con un diámetro de 15.77 mm y teniendo una diferencia menor al tratamiento absoluto de 12.35%.

En el número de hoja por planta no hubo diferencias significativas, pero es importante mencionar que el número de hojas aumento con nanopartículas de

cobre 100 mg·L⁻¹ con un total de 200 hojas a lo largo del cultivo siendo este el resultado más alto obtenido en el experimento. El tratamiento de silicio a dosis de 1000 mg·L⁻¹ fue el único tratamiento menor cantidad de hojas con 171.40 unidades, siendo este es el resultado más bajo con respecto a los demás tratamientos.

Rawat *et al.* (2017), realizaron un experimento con plántulas de pimiento en el cual se aplicaron nanopartículas de óxido de cobre en dosis de 62.5, 125, 250 y 500 mg, durante 90 días en el que se observó que ninguno de los tratamientos afectó significativamente el alargamiento del tallo, la biomasa seca de la planta, el área foliar, el contenido de clorofila de la hoja y la productividad del fruto de pimiento. En general, esta investigación mostró que, en las concentraciones analizadas, las NPs CuO presentaron baja toxicidad, la cual se evaluó haciendo una comparación entre los tratamientos, los cuales no mostraron diferenciación significativa en la biomasa vegetal y en la producción de la fruta.

Tabla 2. Altura final, diámetro y número de hojas en plantas de pimiento (medias con una letra común por columna no son significativamente diferentes según LSD $p > 0.05$).

Tratamiento (mg/L)	Altura final (m)	Diámetro del tallo (mm)	Número de hojas
T.0	181.4 B	17.99 A	195.40 A
NPs Se 10	177.40 B	16.99 AB	189.10 A
NPs Se 50	173.80 B	17.33 A	195.70 A
NPs Si 200	184.10 AB	18.27 A	198.20 A
NPs Si 1000	153.80 C	15.77 B	171.40 B
NPs Cu 100	181.60 AB	18.38 A	200.80 A
NPs Cu 500	190.50 A	18.02 A	194.10 A
	CV (%) 7.8	CV (%) 9.93	CV (%) 7.70

T.0: Testigo NPs Se 10:10 mg/L de NPs de selenio. NPs Se 50:50 mg/L de NPs de selenio. NPs Si 200:200 mg/L de NPs de silicio. NPs Si 1000:1000 mg/L de NPs de silicio. NPs Cu 100:100mg/L NPs de Cobre. NPs Cu 500:500 mg/L de NPs de cobre.

Peso fresco: tallo, hojas del cultivo

En la Tabla 3, se muestra el peso fresco de la hoja donde estadísticamente no se presentan diferencias significativas, es importante destacar que el mayor peso fresco de hoja fue con nanopartículas de cobre a dosis de $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ con un peso de 678.20 kg y una diferencia mayor de 18.24% sobre el testigo absoluto.

De igual manera no se presentaron diferencias significativas en el peso fresco del tallo, es importante mencionar que el tratamiento de nanopartículas de cobre a dosis de $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ con un peso de 741.76 g fue mayor al testigo absoluto con un 5.9% .

Arredondo-Quijada (2016), evaluó nanopartículas de cobre en pimiento, obtuvo diferencias significativas entre los tratamientos en altura final, obteniéndose la media mayor con la aplicación de $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de nanopartículas de cobre en forma directa a la raíz, mientras que la aplicación foliar de $25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de nanopartículas de cobre fue la que tuvo menor altura. En cuanto a peso fresco de hojas y peso fresco de tallo los valores más altos se encontraron con la aplicación de nanopartículas de cobre en dosis de $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de manera foliar.

En la variable peso de la raíz no hay diferencias estadísticas en ningún tratamiento, de igual manera el tratamiento con mayor peso en raíz fue con nanopartículas de cobre con dosis de $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ con un peso de 302.74 g y una diferencia mayor de 11.75% sobre el testigo absoluto y el tratamiento con el cual se obtuvo el menor peso fue con nanopartículas de silicio en dosis de $200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ con una diferencia menor de 30.54% sobre el testigo absoluto.

Haghighi *et al.* (2013), realizaron un experimento con nanopartículas de silicio en plantas de tomate bajo estrés salino, el tratamiento con nanopartículas de silicio con dosis de 1 mM bajo NaCl 50 mM aumentó la longitud de la raíz en aproximadamente un 9% , sin embargo, la interacción con nanopartículas de silicio

a dosis de 1 mM y 25 mM NaCl y 1 y 2 mM solo disminuyeron la velocidad de reducción. No hubo efectos significativos en el rodaje, tampoco en la longitud de plántulas de tomate.

Bao-shan *et al.* (2004), trabajaron en un experimento con dióxido de silicio nanoestructurado en el crecimiento de plántulas de albahaca Changbai (*Larix olgensis*), quienes observaron que se promovió el crecimiento y la calidad de las plántulas de Larix, las cuales se trataron con TMS a 500 $\mu\text{L/L}^{-1}$, donde se mostró la mayor cantidad de altura media, diámetro del collar de la raíz, longitud de la raíz principal y el número de raíces laterales de plántulas.

Tabla 3. Peso fresco de hoja, tallo, y raíz de la planta de pimienta (medias con una letra común por columna no son significativamente diferentes según LSD $p > 0.05$).

Tratamientos	Peso de hoja (g)	Peso del tallo (g)	Peso de raíz (g)
T.0	573.54 A	700.02 A	270.90 A
NPs Se 10	568.50 A	699.96 A	273.32 A
NPs Se 50	654.78 A	650.82 A	271.46 A
NPs Si 200	583.16 A	658.9 A	188.18 A
NPs Si 1000	503.88 A	502.30 A	240.88 A
NPs Cu 100	678.20 A	741.76 A	302.74 A
NPs Cu 500	557.88 A	671.58 A	277.88 A
	CV%:33	CV%:32.49	CV%:49.03

T.0: Testigo NPs Se 10:10 mg/L de NPs de selenio. NPs Se 50:50 mg/L de NPs de selenio. NPs Si 200:200 mg/L de NPs de silicio. NPs Si 1000:1000 mg/L de NPs de silicio. NPs Cu 100:100mg/L NPs de Cobre. NPs Cu 500:500 mg/L de NPs de cobre.

Rendimiento del cultivo

En la Tabla 4, se observa que hay diferencias significativas cuanto, al número de frutos en las plantas de pimienta, donde se destaca que el tratamiento más favorable se debe a la aplicación de nanopartículas de selenio con dosis de 10

mg·L⁻¹ obteniendo más frutos cosechados con un total de 19.30 frutos con una diferencia mayor significativa de 7.2 % sobre el tratamiento absoluto.

Es relevante mencionar que el tratamiento con el cual se obtuvieron menos frutos fue con el de Si 200 mg·L⁻¹ con un total de 14 frutos y una diferencia significativa inferior al testigo absoluto de 22.3%. Se presentan diferencias significativas en el número de abortos debido a los diferentes tratamientos que fueron aplicados a la planta. Se destaca que el tratamiento con mayor número de abortos provocados en la planta fue con dosis de Si 200 mg·L⁻¹ con un total de 29.70 abortos y una diferencia mayor con respecto al testigo absoluto de 21.22 %, observando que este tratamiento provocó más abortos que el testigo absoluto. El tratamiento con menor número de abortos se obtuvo con nanopartículas de Si 1000 mg·L⁻¹ con un total de 22.23 abortos y una diferencia significativa de 11.43% con menor valor que el testigo absoluto.

Las concentraciones bajas de selenio actúan como antioxidantes y favorecen el crecimiento de las plantas, pero en concentraciones altas actúan como prooxidante que ocasiona alteraciones metabólicas y una pérdida en el rendimiento (Hartikainen *et al.*, 2000; Hasanuzzaman *et al.*, 2014). En plantas sensibles a Se, la toxicidad del elemento en una alta concentración puede deberse a la sustitución de los átomos de azufre por selenio en aminoácidos que contienen S, como cisteína y metionina; esto puede dar como resultado cambios en la estructura y actividad de las proteínas sustituidas con Se debido a las diferencias en el tamaño y las propiedades iónicas, lo que a su vez produce una disminución en el crecimiento de las plantas (Terry *et al.*, 2000).

Haghighi *et al.* (2014), realizaron un experimento donde trabajó con selenio y nanopartículas de selenio en diferentes concentraciones en tomate, donde observó que una baja concentración de nanopartículas de selenio 1 µM y 4 µM

puede ser significativamente más efectiva que una concentración más alta de Se en concentraciones de 2.5, 5, y 8 μM . Esto puede deberse a la función antioxidante de Se en bajas concentraciones en lugar de la función prooxidante de Se en altas concentraciones, lo que resulta en una disminución en el rendimiento del cultivo (Djanaguiraman *et al.*, 2010).

De igual manera, se muestran diferencias significativas en el peso total de todas las cosechas de frutos por cada tratamiento en donde el peso total máximo fue con nanopartículas de selenio en dosis de 10 $\text{ml}\cdot\text{L}^{-1}$ con un peso de 3.173 kg con una diferencia mayor sobre el testigo absoluto de 7.59%, y el peso mínimo fue con nanopartículas de cobre 100 $\text{ml}\cdot\text{L}^{-1}$ con un peso de 2.058 kg con una diferencia inferior de 30.21% al testigo absoluto.

Pinedo-Guerrero *et al.* (2017), realizaron un experimento donde trabajaron con nanopartículas de cobre en hidrogeles de quitosán-PVA en cultivo de chile jalapeño donde obtuvieron diferencias significativas en el peso promedio y el peso total de las frutas, los de mayor peso total de frutas cosechadas se obtuvo con el tratamiento Cs-PVA y Cs-PVA + 0.2 mg nCu, mientras que el peso total más bajo se observó para el tratamiento con Cs-PVA + 2.0 mg nCu. Por peso promedio de la fruta, el tratamiento con Cs-PVA fue el mejor, y el peso más bajo se observó en el Cs-PVA + 10 mg nCu tratamiento. La aplicación a NPs afecta el crecimiento y el desarrollo en varias especies de plantas. Esto puede implicar que el quitosano puede ser atribuido en el peso del cultivo de tomate.

Tabla 4. Número de abortos, número de frutos y peso total de cosechas (medias con una letra común por columna no son significativamente diferentes según LSD $p > 0.05$).

Tratamiento (mg/L)	Número de abortos	Número de frutos	Peso total de cosechas (kg)
T.0	24.50 BCD	18.00 AB	2.949 AB
NPs Se 10	21.70 D	19.30 A	3.173 A
NPs Se 50	23.40 CD	19.30 A	2.687ABC
NPs Si 200	29.70 A	14.00 C	2.323 CD
NPs Si 1000	21.60 D	15.40 BC	2.417 BCD
NPs Cu 100	29.30 AB	14.70 C	2.058 D
NPs Cu 500	27.40 BC	14.80 BC	2.265 CD
	CV (%) 22.05	CV (%) 21.87	CV: 50.27

T.0: Testigo NPs Se 10:10 mg/L de NPs de selenio. NPs Se 50:50 mg/L de NPs de selenio. NPs Si 200:200 mg/L de NPs de silicio. NPs Si 1000:1000 mg/L de NPs de silicio. NPs Cu 100:100mg/L NPs de Cobre. NPs Cu 500:500 mg/L de NPs de cobre.

Calidad del fruto

En la Tabla 5, se muestra que no existe diferencias estadísticas en calidad de fruto, sin embargo de manera numérica es relevante observar que el tratamiento con mejor firmeza se obtuvo con nanopartículas de silicio en dosis de 200 mg·L⁻¹ con una diferencia superior de 41.01% al testigo absoluto, mientras el tratamiento con menor firmeza fue con nanopartículas de selenio con dosis de 10 mg·L⁻¹ con una diferencia inferior del 15.96% a comparación del testigo absoluto, el contenido de grados Brix mejoró con nanopartículas de cobre en cantidad de 100 mg·L⁻¹ con una diferencia mayor de 7.02% respecto al testigo absoluto, mientras el tratamiento con menor contenido de grados brix fue con nanopartículas de silicio

en dosis de $200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ con una diferencia menor del 9.73% al testigo absoluto. La conductividad eléctrica mejoro con nanopartículas de selenio en concentraciones de $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ con diferencia mayor de 30.86% sobre el testigo absoluto, la menor cantidad de conductividad eléctrica se expresó con nanopartículas de cobre en dosis de $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ con un 16.62 % inferior al testigo cero. El tratamiento con mayor pH se obtuvo con el testigo absoluto demostrando que los de más tratamientos tienen un pH más ácido. El tratamiento con mejor contenido de ORP se obtuvo con las NPs de cobre a dosis de $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ el cual se expresó en números negativos (-16.17) mejorando un 21.30% sobre el testigo absoluto, estos números negativos expresan en los frutos que hay una reducción, según Juárez-Maldonado *et al.* (2016), una reducción en los valores redox potenciales denota un mayor potencial de antioxidantes, lo que indica una mayor calidad nutritiva en la fruta.

Juárez Maldonado *et al.* (2016), realizaron un experimento donde se trabajó con plantas de tomate en dos etapas, la primera se determinó la concentración de nCu más apropiada para el crecimiento de la planta, aplicando un hidrogel de quitosán con nCu absorbido en una concentración de $100 \text{ mg}\cdot\text{kg}$, en 5 diferentes tratamientos: 0.03, 0.015, 0.006, 0.003, 0.0015, y 0 mg nanopartículas de Cu. En segunda etapa se realizó una comparación con la misma concentración de quitosán pero sin ningún contenido de nCu y el control sin hidrogel de quitosán o nCu, en el cual obtuvieron diferencias (LSD, $P \leq 0.05$) en la firmeza de la fruta, el pH, la acidez titulable en la cosecha por otra parte no observaron diferencias en la firmeza y en los sólidos solubles medios, sin embargo, el tratamiento del hidrogel de quitosano sin nanopartículas de Cu tuvo un efecto positivo en la firmeza de la fruta en el momento de la cosecha, siendo un 16% mayor que el control, también se observó que los tratamientos con hidrogel de quitosán e hidrogel de nanopartículas de Cu-quitosano disminuyeron el ORP en comparación con el control.

Tabla 5. Calidad del fruto de pimiento (medias con una letra común por columna no son significativamente diferentes según LSD $p > 0.05$).

Tratamientos	Firmeza	°Brix	CE	pH	ORP
T.0	5.34 BC	7.40 AB	3.37 AB	5.37 A	13.33 A
NPs Se 10	4.49 C	6.9 AB	4.41 A	5.34 A	6.00 AB
NPs Se 50	5.86 BC	7.17 AB	4.10 A	5.28 A	2.17 B
NPs Si 200	7.53 A	6.68 B	3.46 AB	5.30 A	-1.00 B
NPs Si 1000	6.03 ABC	7.58 AB	3.62 AB	5.17 AB	-2.17 B
NPs Cu 100	6.81 AB	7.92 A	2.81 B	5.26 AB	-12.67 C
NPs Cu 500	6.39ABC	7.42 AB	3.97 AB	4.93 B	-16.17 C
	CV%:28.11	CV%:12.23	CV%:27.06	CV%:5.62	CV%:510.37

T.0: Testigo NPs Se 10:10 mg/L de NPs de selenio. NPs Se 50: 50 mg/L de NPs de selenio. NPs Si 200:200 mg/L de NPs de silicio. NPs Si 1000:1000 mg/L de NPs de silicio. NPs Cu 100:100mg/L NPs de Cobre. NPs Cu 500:500 mg/L de NPs de cobre. brix: grado de dulzor en frutos. CE: conductividad eléctrica. pH: potencial de hidrogeno. ORP: potencial REDOX.

Acidez titulable y vitamina C

En la Tabla 6, se muestran diferencias en la acidez titulable del fruto ya que la menor concentración de acidez se observó en el testigo absoluto, observando que los tratamientos empleados pueden ser más ácidos que el testigo cero.

Por otra parte, se muestra diferencias significativas en el contenido de vitamina C en el fruto, observándose que los frutos con mayor contenido de vitamina fueron con el testigo absoluto, resaltando que la aplicación de dichos tratamientos no contribuyó en el contenido.

Por otra parte, López-Vargas *et al.* (2018), empleo nanopartículas de cobre vía foliar en el cultivo de tomate con diferentes concentraciones de nanopartículas de Cu 50, 125, 250, 500 mg L⁻¹, obtuvo efectos significativos en vitamina C y acidez titulable. Se observó una disminución en la acidez titulable (TA) en el tratamiento de 125 mg de Cu, con respecto al Control, disminuyó un 16.33%, el contenido de vitamina C en frutos de tomate aumentó significativamente en todos los tratamientos. El valor más alto de vitamina C se encontró en las frutas de plantas tratadas con 250 mg de Cu NP, lo que resultó en un aumento del 121.97%, los resultados obtenidos mostraron que la aplicación de Cu NPs aumentó significativamente el contenido de vitamina C, lo que a su vez aumentó la calidad nutracéutica de los frutos de tomate.

Tabla 6. Acidez titulable y vitamina C en el pimiento morrón (medias con una letra común por columna no son significativamente diferentes según LSD $p > 0.05$).

Tratamientos	Acidez titulable	Vitamina C
<i>T.0</i>	0.02 D	115.10 A
<i>NPs Se 10</i>	0.03 CD	87.65 BC
<i>NPs Se 50</i>	0.04 BC	85.71 C
<i>NPs Si 200</i>	0.04 AB	88.00 BC
<i>NPs Si 1000</i>	0.04 BC	109.30 B
<i>NPs Cu 100</i>	0.05 A	101.02 BC
<i>NPs Cu 500</i>	0.04 BC	88.18 BC
	CV: 17.41	CV: 18.17

T.0: Testigo NPs Se 10:10 mg/L de NPs de selenio. NPs Se 50: 50 mg/L de NPs de selenio. NPs Si 200:200 mg/L de NPs de silicio. NPs Si 1000:1000 mg/L de NPs de silicio. NPs Cu 100:100mg/L NPs de Cobre. NPs Cu 500:500 mg/L de NPs de cobre.

CONCLUSIONES

En el crecimiento y desarrollo del cultivo de pimiento dependiendo del elemento y las diversas dosis empleadas, mostró resultados favorables en algunos parámetros importantes evaluados.

La aplicación de nanopartículas de cobre a dosis de $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ aumento la altura de la planta, mejoro el diámetro del tallo, se obtuvo un peso mayor en la raíz, y aumento el contenido de hojas en la planta. La altura aumento con nanopartículas de cobre a dosis de $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

El número de frutos fue favorecido con el tratamiento de nanopartículas de selenio a dosis de $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ el cual también tuvo un efecto positivo en el peso total de cosecha.

En calidad de fruto en cuanto a la firmeza el mejor tratamiento fue con nanopartículas de silicio a dosis de $200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Es importante destacar que en cuanto a mejor grados Brix se obtuvo con nanopartículas de cobre en dosis de $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, pero en cuestión de conductividad eléctrica el mejor fue el tratamiento con nanopartículas de selenio a dosis de $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

En el contenido de ORP mejoro con la aplicación de nanopartículas de cobre a dosis de $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ el cual se expresó en números negativos que indica una reducción lo cual indica un potencial mayor contenido de antioxidantes.

Hubo parámetros como el peso del tallo, pH, ORP, acidez titulable y vitamina C donde el uso de nanopartículas en los diferentes tratamientos no tuvo efecto benéfico ya que se obtuvieron valores más bajos al tratamiento absoluto.

GLOSARIO

Ácido indolacético: es una auxina (hormona vegetal) que actúa a nivel de los ápices, en los que hay tejido meristemático, el cual es indeferenciado.

Ácido salicílico: se trata de un sólido incoloro que se suele cristalizar en forma de agujas. Tiene una buena solubilidad en etanol y éter. Este producto sirve como materia prima para la obtención del ácido acetilsalicílico, comercialmente conocido como Aspirina.

Acuaporina: las acuaporinas son canales transmembrana pertenecientes a la familia MIP. Estas proteínas forman poros en las membranas biológicas por los que transportan principalmente agua, aunque algunos miembros de esta familia también pueden transportar solutos pequeños como urea, glicerol, amonio o gases, arsénico o silicio e incluso iones.

Alerce: es el nombre con el que se conoce a diversas especies de árboles pertenecientes a la familia de las pináceas que alcanzan hasta 35 m de altura, muy resistentes al frío, de ramas abiertas y hojas blandas y caducas en forma de aguja, y cuyo fruto son unas piñas pequeñas, persistentes y de maduración anual.

Antioxidante: el término antioxidante se le da a un grupo de moléculas que son capaces de retardar o impedir el efecto del oxígeno en otras lo cual recibe el nombre de oxidación la cual consiste en la transferencia de electrones de una sustancia a otras a partir de un agente oxidante lo que incurre en la liberación de radicales que ocasiona la muerte celular.

Asbesto: el asbesto o amianto es el nombre de un grupo de minerales fibrosos que están presentes en la naturaleza y son resistentes al calor y la corrosión.

Dulcamara: dulcamara significa planta sarmentosa, de la familia de las Solanáceas, con tallos ramosos que crecen hasta dos o tres metros, hojas pecioladas, enteras, acorazonadas, agudas y generalmente con dos orejetas en la

base, flores pequeñas, violadas, en ramilletes, sobre pecíolos axilares, y por frutos bayas rojas del tamaño del guisante.

Ecotoxicología: la ecotoxicología estudia el destino y los efectos de los contaminantes en los ecosistemas, intentando explicar las causas y prever los riesgos probables. La ecotoxicología prospectiva evalúa la toxicidad de las sustancias antes de su producción y uso. La ecotoxicología retrospectiva se ocupa de confirmar si la sustancia produce daños en el ecosistema.

Elongación: la elongación hace referencia a un movimiento o situación en donde se produce un aumento de la masa longitudinalmente de una estructura, es decir, un material, objeto o elemento conformante de un sistema sufre proceso de estiramiento constate, este término puede ser utilizado en distintas áreas.

Endógena: que se origina o nace en el interior, como la célula que se forma dentro de otra.

Nanofibras: son fibras con un diámetro inferior a 500 nanómetros. Se usan técnicas especiales para obtener las fibras, que son reconocidas por ser ultrafinas, de propiedades muy particulares y de muy diversos usos.

Nanopartícula: partícula que es más pequeña que 100 nanómetros (milmillonésima parte de un metro). En el campo de la medicina, se pueden usar nanopartículas para transportar anticuerpos, medicamentos, elementos para las pruebas con imágenes y otras sustancias hasta ciertas partes del cuerpo.

Prolina: la prolina (o L-prolina) forma parte de los 20 aminoácidos no esenciales del código genético. Permite la síntesis de colágeno, una proteína que le da resistencia a la piel, a las articulaciones y a los tendones.

Pungencia: la pungencia es la sensación “picante”, “ardiente” o “irritante” en lengua, boca y nariz provocada por ciertos alimentos, como cebollas, pimientos y chiles.

Quitano: es un biopolímero natural que se obtiene de la Quitina por métodos químicos, electroquímicos o enzimáticos. Químicamente es una Poli (D-

glucosamina), por ello se considera un polisacárido Biodegradable. El tamaño molecular depende de la especie y de la edad de los individuos dado que se obtienen desde un polímero biosintético.

ROS: el conjunto de radicales libres que tienen la capacidad de producir daños oxidativos se les denomina especies reactivas del oxígeno, son generalmente moléculas muy pequeñas altamente reactivas debido a la presencia de una capa de electrones de valencia no apareada.

LITERATURA CITADA

- Amemiya Y. Tanaka T. Yoza B. Matsunaga T. 2005. Novel detection system for biomolecules using nano-sized bacterial magnetic particles and magnetic force microscopy. *Journal of Biotechnology*. 120: 308-314.
- Arora S. Sharma P. Kumar S. Nayan R. Khanna PK. Zaidi H. 2012. Gold-nanoparticle induced enhancement in growth and seed yield of *Brassica juncea*. *Plant Growth Regulation*. 66:303–310.
- Arredondo-Quijada J.A. 2016. Nanopartículas de cobre como promotoras de germinación de semillas y crecimiento de plantas de *capsicum annum* y *lycopersycum esculentum*. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Pag 51.
- Bao-shan L. Shao-qi D. Chun-hui L. Li-jun F. Shu-chun Q. Min Y. 2004. Effect of TMS (nanostructured silicon dioxide) on growth of Changbai larch seedlings. *Journal of Forest Research*. 15:138–140
- Capaldi A.S. Diniz S.A. Moretto G.R. Antunes A.R. Zezzi A.M. 2015. Nanoparticles applied to plant science. A Review *Talanta*. 13: 693-705.
- Castellanos Z.J. Borbón C.M. 2009. Panorama de la horticultura protegida en México. Manual de producción de tomate en invernadero. *Intagri*. 1-18.
- Chang Y. Zhang M. Xia L. Zhang J. Xing G. 2012. The toxic effects and mechanisms of CuO and ZnO nanoparticles. *Materials*. 5: 2850-2871.
- Cruzat C. Cárdenas G. 2010. Síntesis y caracterización de nanopartículas metálicas soportadas en quitosano”. Tesis de licenciatura. Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias Químicas.
- Dimkpa C.O. McLean J.E. David W. Britt D.W. Anderson A.J. 2015. Nano CuO and interaction with nano-ZnO or soil bacterium provide evidence for the interference of nanoparticles in metal nutrition of plants. *Ecotoxicology*. 24: 119-129.
- Dimkpa C.O. McLean J.E. David W. Britt D.W. Anderson A.J. 2015. Nano CuO and interaction with nano-ZnO or soil bacterium provide evidence for the

- interference of nanoparticles in metal nutrition of plants. *Ecotoxicology*. 24: 119-129.
- Ditta A. Arshad M. Ibrahim M. 2015. Nanoparticles in sustainable agricultural crop production: applications and perspectives. In *nanotechnology and plant sciences*. Springer international publishing. 55-75.
- Ditta Allah. 2012. How helpful is nanotechnology in agriculture. *Advances in Natural Sciences*.1-11.
- Djanaguiraman M. Prasad P.V. Seppanen M. 2010. Selenium protects sorghumleaves from oxidative damage under high temperature stress by enhancing antioxidant defense system. *Plant Physiol. Biochem.* 48, 999–1007.
- Fang T. Watson J.L. Goodman J. Dimkpa C.O. Martineau N. Mclean S.J. Britt D.W. Anderson A.J. 2013. Does doping with aluminum alter the effects of ZnO nanoparticles on the metabolism of soil Pseudomonads. *Microbiological Research*. 168: 91-98.
- Foladori G. Invernizzi N. 2012. Implicaciones sociales y ambientales del desarrollo de las nanotecnologías en América Latina y el Caribe. *Red Latinoamericana de Nanotecnología y Sociedad*. 15-17.
- García Gonzales C. Llanos M. Mazón-Olivo B. Dávila K. Cun J. 2016. Determinación de vitamina c en pimiento *Capsicum annum* por voltametría de barrido lineal. *Universidad Técnica de Machala*.1-9.
- Grillo R. Abhilash P.C. Fraceto L.F. 2016. Nanotechnology applied to bio-encapsulation of pesticides. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. 16: 1231-1234.
- Haghighi M. Afifipour Z. Mozafarian M. 2012. The effect of N-Si on tomato seed germination under salinity levels. *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences*. 6:87–90.
- Haghighia M. Abolghasemia R. Jaime A. Teixeira da Silva. 2014. Low and high temperature stress affect the growth characteristics of tomato in hydroponic culture with Se and nano-Se amendment. *Scientia Horticulturae*. 236-239.

- Haghighia M. Pessaraki M. 2013. Influence of silicon and nano-silicon on salinity tolerance of cherrytomatoes (*Solanum lycopersicum* L.) at early growth stage. *Scientia Horticulturae*. 111-117.
- Hartikainen H. Xue T. Piironen V. 2000. Selenium as an anti-oxidant and pro-oxidant in ryegrass. *Plant Soil* 225, 193–200.
- Hasanuzzaman M. Hossain MA. Fujita M. 2012. Selenio exógena tratamiento previo protege las plantas de semillero de colza de estrés oxidativo inducida por cadmio hasta la regulación de defensa antioxidante y sistemas de desintoxicación metilglioxal. *Biological Trace Element Research*. 149: 248-261.
- Hasanuzzaman M. Nahar K. Fujita M. 2014. Silicon and selenium: two vital traceelements that confer abiotic stress tolerance to plants. In: *Emerging Technologies and Management of Crop Stress Tolerance*. Elsevier, The Netherlands, pp.377–422.
- Hasanuzzaman M. Mohammad A.H. Masayuki F. 2012. Exogenous selenium pretreatment protects rapeseed seedlings from cadmium. Induced oxidative stress by upregulating antioxidant defense and methyglyxal detoxification systems. *Springer Link*. (149): 248-261.
- Hawkesford M.J. Kopriva S. De Kok L.J. 2014. Eficiencia de uso de nutrientes en plantas conceptos y enfoques. *Springer*. 273-279.
- Jaiswal M. Chauhan D. Sankararama-krishnan N. 2012. Copper chitosan nanocomposite: synthesis, characterization, and application in removal of organophosphorous pesticide from agricultural runoff. *Science and Pollution Research* 19: 2055-2062.
- Jaramillo-Noreña J. Aguilar-Aguilar P.A. Espitia-Malagón E.M. Tamayo- Molano P.J. Arroyave-Corpoica M.G. 2014. Modelo productivo de pimentón bajo condiciones protegidas en el oriente antioqueño. *Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria*.15-19.
- Juárez-Maldonado A. Ortega-Ortiz H. Pérez-Labrada F. 2016. Cu Nanoparticles absorbed on chitosan hydrogels positively alter morphological, production,

- and quality characteristics of tomato. *Journal of Applied Botany and Food Quality*. 89:183-189.
- Kalteh M. Taj-Alipour Z. Ashraf S. Marashi-Aliabadi M. Falah-Nosratabadi A. 2014. Effect of silica Nanoparticles on Basil (*Ocimum basilicum*) Under Salinity Stress. *Journal of Chemical Health Risks*. 4(3): 49 –55.
- Kashyapa P. Xiang X. Heiden P. 2015. Chitosan nanoparticlebased delivery systems for sustainable agricultura. *International Journal of Biological Macromolecules*. 77:36-51.
- Khadekar S. Leisner S. 2011. Soluble silicon modulates expresión of Arabidosis thaliana genes involven in copper strees. *Plant Physiol*. 168:699-705.
- Khodakovskaya M.V. de Silva K. Nedosekin D.A. Dervishi E. Biris A.S. Shashkov E.V. Zharov V.P. 2011. Complex genetic, photothermal, and photoacoustic analysis of nanoparticle-plant interactions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 108: 1028-1033.
- Kirkby E.A. Romheld.V. 2007. Mlcronutrients in plant physiology: functions, uptake and mobility.proceedings. *The International Fertilizer Societ*. 543.
- Li B. Tao G. Xie Y. Cai X. 2012. Physiological effects under the condition of spraying nanoSiO₂ onto the Indocalamus barbatus McClure leaves. *Natural Science*. 36:161–164.
- Lira-Saldivar R. H. Méndez-Arguello B. y Vera-Reyes I. 2017. Potencial de la Nanotecnología Para el Desarrollo de la Agricultura Sustentable. *Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología*. 20-25.
- Liu R. Q. Lal R. 2015. Potentials of engineered nanoparticles as fertilizers for increasing agronomic productions. *Science of the Total Environment*. 514: 131-139.
- López-Vargas E.R. Ortega-Ortíz H, Cadenas-Pliego G, De Alba K.R, Cabrera de la Fuente M. Benavides-Mendoza A. Juárez-Maldonado, A. 2018. Foliar application of copper nanoparticles increases he fruit quality and the content of bioactive compounds in tomatoes. *Departamento de Horticultura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro*. 1-15.

- Lu CM. Zhang CY. Wen JQ. Wu GR. Tao M.X. 2002. Research on the effect of nanometer materials on germination and growth enhancement of Glycine max and its mechanism. *Soybean Science*. 21:68–172.
- Maine E. Thomas V.J. Bliemel M. Murira A. Utterback J. 2013. The emergence of the nanobiotechnology industry. *Nature Nanotechnology*. 2-5.
- Manavi Kapur. Kriti Soni. Kanchan Kohli. 2017. Síntesis verde de nanopartículas de selenio a partir de brócoli, caracterización, aplicación y toxicidad. *Advanced Techniques in Biology & Medicine*. 1-7.
- Mohammad Z. Rabia J. Aliyu M. Buhara Y. Ekrem G. Rukhsana K. 2017. CuO nanoparticles significantly influence in vitro culture, steviol glycosides, and antioxidant activities of *Stevia rebaudiana* Bertoni. *Springer Science*. 131:611–620.
- Namesny-Vallespir A. 2009. El pimiento en el mundo. *Horticom*. Págs. 20:1.
- Nhan L. Rui Y.G. Xin L. Xuguang L. Shutong H. Y. 2014. Uptake transport, distribution and Bio-effects of SiO₂ nanoparticles in Bttransgenic cotton. *Journal of nanobiotechnology*. 12: 2-12.
- Nuruzzaman M. Rahman M.M. Liu Y. Naidu R. 2016. Nanoencapsulation, nano-Guard for pesticides: a new window for safe application. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 64: 1447-1483.
- Olejnik M. Krajnik B. Kowalska D. Twardowska M. Czechowski N. Hofmann E. Mackowski S. 2013. Imaging of fluorescence enhancement in photosynthetic complexes coupled to silver nanowires. *Applied Physics Letters*. 102: 083-703.
- Pandey C. Sharda S. Sanjay-Raghvendra S. 2010. Application of ZnO nanoparticles in influencing the growth rate of *Cicer arietinum*. *Journal of experimental nanoscience*. 5:(6) 488-497.
- Pérez A. Rubiales D. 2009. Nanotechnology for parasitic plant control. *Pest Management Science Journal*. 65: 540-545.
- Pinedo-Guerrero H.Z. Hernández-Fuentes A.D. Ortega-Ortiz H. Benavides-Mendoza A, Cadenas-Pliego G. Juárez-Maldonado A. 2017. Cu Nanoparticles in Hydrogels of Chitosan-PVA Affects the Characteristics of

- Post-Harvest and Bioactive Compounds of Jalapeño Pepper. Departamento de Horticultura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.1-14.
- Prasad R. Kumar V. Prasad K.S. 2014. Nanotechnology in sustainable agriculture: present concerns and future aspects. *African Journal of Biotechnology*. 13: 705-713.
- Prasanna BM (2007) Nanotechnology in agriculture. ICAR National Fellow, Division of Genetics. IARI. New Delhi, pp 111–118
- Rai M. Ingle A. 2012. Role of nanotechnology in agriculture with special reference to management of insect pests. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 94:287-293.
- Rawat S. Pullagurala V. L. R., Hernandez-Molina M. Sun, Y. Niu G. Hernandez-Viezcas J. Peralta-Videa J. R. and Gardea-Torresdey J. 2017.Impacts of copper oxide nanoparticles in bell pepper (*Capsicum annum* L.) plants: A full life cycle study, *Environmental ScienceNano*.22-23.
- Rayman M.P. 2008. Food-chain selenium and human health: emphasis on intake. *British Journal of Nutrition*. 100: 254-68.
- Razzaq A. Ammara R. Jhanzab H.M. Mahmood T. Hafeez A. Hussain S. Rehman H. Aziz T. Farooq M. Wakeel A. Rengel Z. 2012. Zinc nutrition in rice production systems: a review. *Plant and Soil*. 361: 203-226.
- Rehman H. Aziz T. Farooq, M. Wakeel, A. Rengel Z. 2012. Zinc nutrition in rice production systems: a review. *Plant and soil*. 361: 203-226.
- Rico C.M. Peralta-Videa J.R. Gardea-Torresdey J.L. 2015. Chemistry, biochemistry of nanoparticles, and their role in antioxidant defense system in plants. In *Nanotechnology and Plant Sciences*. 1-17.
- Rivera – Jaramillo Y. A. 2017. Aplicación de nanopartículas de cobre y su efecto en el contenido de antioxidantes en plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.). Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. 21.
- Scott N. Chen H. 2013. Nanoscale science and engineering for agriculture and food systems. *Industrial Biotechnology*. 9: 17-18.

- Sekhon B.S. 2014. Nanotechnology in agri-food production: an overview. *Nanotechnology, science and applications*. 7: 31–53.
- Servin A.D. White J.C. 2016. Nanotechnology in agriculture: next steps for understanding engineered nanoparticle exposure and risk. *Nano Impact*. 1: 9-12.
- Shah V. Belozeroval I. 2009. Influence of metal nanoparticles on the soil microbial community and germination of lettuce seeds. *Water Air Soil Pollut*. 197:143–148
- Sharma P. Deepesh B. Zaidi M. Pardha P. Khanna P.K. Sandeep A. (2012). Silver nanoparticle-mediated enhancement in growth and antioxidant status of *Brassica juncea*. *Applied biochemistry and biotechnology*. 167: 2225-2233.
- Sharma P. Deepesh B. Zaidi M.G.H. Pardha P. Khanna P.K. Sandeep A. 2012. Silver nanoparticle-mediated enhancement in growth and antioxidant status of *Brassica juncea*. *Applied biochemistry and biotechnology*. 167: 2225-2233.
- Sharon M. Choudhary A.K. and Kumar R. 2010. Nanotechnology in agricultural diseases and food safety. *Journal of Phytology*. 2(4): 83-92.
- SIAP. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. 2010. Chile verde morrón. Monografías. 1-20.
- Siddiqui H.M. Al-Whaibi H.M. Mohammad F. 2015. Nanotechnology and plant sciences. nanoparticles and their impact on plants. Springer international publishing switzerland. 305.
- Siddiqui MH. Al-Whaibi MH. 2014. Role of nano-SiO₂ in germination of tomato (*Lycopersicon esculentum* seeds Mill). *Saudi Journal of Biological Sciences*. 21:13-17.
- Tang H. Liu Y. Gong X. Zeng G. Zheng B. 2015. Efectos de selenio y silicio en mejorar la capacidad antioxidante en ramio (*Boehmeria nivea* L. capacidad antioxidante en ramio (*Boehmeria nivea* L. Gaud.) Bajo estrés cadmio. *Environmental Science and Pollution Research*. 22: 9-10.
- Terry, N. Zayed M. de Souza M.P. Tarun A.S. 2000. Selenium in higher plants. *Ann.Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol*. 51, 401-432.

- Trepiana-Fica D.A. 2015. Síntesis de suspensiones de nanopartículas de cobre y quitosano, y evaluación de sus propiedades antimicrobianas frente a *Streptococcus Mutans*. Tesis de maestría. Universidad de Chile Facultad de Odontología.18-20.
- Wang A. Zheng Y. Peng F. 2014. Thickness-controllable silica coating of CdTe QDs by reverse microemulsion method for the application in the growth of rice. *Journal of Spectroscopy*.1-5.
- Wang S. Liu H. Zhang Y. Xin H. 2015. Effect of CuO nanoparticles on reactive oxygen species and cell cycle gene expression in roots of rice. *Environmental Toxicological Chemistry*, 34: 554-561.
- Xie Y. Li B. Zhang Q. Zhang C. 2012. Effects of nano-silicon dioxide on photosynthetic fluorescence characteristics of *Indocalamus barbatus* McClure. *Nanjing Forestry University*. 2:59-63.
- Yadollahi A. Arzani K. Khoshghalb H. 2009. The role of nanotechnology in horticultural crops postharvest management. *Faculty of Agricultural Sciences*. 875: 49-56.
- Yang Wenjuan. Cenchao Shen. Qiaoli Ji. Hongjie An. JinjuWang Qingdai Liu. Zhizhou. Zhang. 2009. Food storage material silver nanoparticles interfere with DNA replication fidelity and bind with DNA. *Nanotechnology*, 20.
- Yin Y. Guo Q. Han Y. Wang L. Wan S. 2012. Preparation, characterization and nematicidal activity of lansiumamide B nano-capsules. *Journal of Integrative Agriculture*. 11: 1151-1158.
- Zhang J.S. Gao X.Y. Zhang LD. Bao Y.P. 2001. Efectos biológicos de un rojo selenio elemental nano. *Biofactores* 15: 27-38.
- Zhu H. Han, J. Xiao J. Q. Jin Y. 2008. Uptake, translocation, and accumulation of manufactured iron oxide nanoparticles by pumpkin plants. *Journal Environmental Monitoring*. 10: 685-784.