

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO DE BOTÁNICA



Efecto de las Nanopartículas de Cu Introducidas en Quitosan Sobre el Crecimiento,
Desarrollo y Contenido de Licopeno en Tomate (*Solanum lycopersicum* L.) Bajo
Invernadero

Por:

MERARI SUJEY VÁZQUEZ LÓPEZ

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de

INGENIERO EN AGROBIOLOGÍA

Saltillo, Coahuila, México
Junio del 2016

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO DE BOTÁNICA

Efecto de las Nanopartículas de Cu Introducidas en Quitosan Sobre el Crecimiento,
Desarrollo y Contenido de Licopeno en Tomate (*Solanum lycopersicum* L.) Bajo
Invernadero

Por:

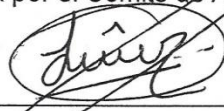
MERARI SUJEY VÁZQUEZ LÓPEZ

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. Manuel De La Rosa Ibarra

Coasesor


Dr. Marcelino Cabrera De La Fuente

Coasesor


Dr. Gabriel Gallegos Morales
Coordinador de la División de Agronomía
Coordinación
División de Agronomía

Saltillo, Coahuila, México

Junio del 2016

DEDICATORIAS

A mi Familia:

Mis padres

A mi madre la **Sra. María de Jesús López Silva** por siempre creer en mí y brindarme su plena confianza, por soplar bajo mis alas cada vez que perdía el vuelo y por estar para mí incondicionalmente. Eres mi más grande y única motivación para realizar esta y cada una de las metas que he logrado, tú y nadie más que tu mamita.

Al **Sr. Saúl Vázquez Antonio** (†) padre tengo que agradecerte la vida que me diste de verdad gracias.

Mis hermanos

Delmi por todo tu apoyo hermanita, por ayudarme a emprender el vuelo por creer en mí y estar ahí cuando más lo necesite.

Marce por que más que mi hermana es mi amiga, gracias hermanita por ser mi cómplice, por tus consejos, comprensión y todo lo que me has ayudado.

Saúl por su apoyo y por estar ahí en todo momento, por cuidarme y por compartir momentos inolvidables de nuestra vida, los quiero mucho hermanos.

A mis sobrinitos que ahora forman parte importante de mi familia **Violetita** y **Samuelito**.

A mi novio **Yobani Jiménez** por su compañía, comprensión y apoyo incondicional, por convertir cada momento en algo inolvidable, gracias por caminar la parte más importante de esta trayectoria con migo.

AGRADECIMIENTOS

A mi **UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO** por darme la oportunidad de superarme y cumplir una meta más en la vida porque sin instituciones como esta a muchos nos sería muy difícil superarnos profesionalmente, es mi más grande orgullo ser Buitre y formar parte de mi **ALMA MATER**.

Al **Dr. Antonio Juárez Maldonado** por permitirme el honor de dirigir este trabajo por su apoyo moral y profesional, por compartir sus conocimientos y experiencias, también por el tiempo dedicado y por su comprensión.

Al **Dr. Manuel De La Rosa Ibarra** por su valiosa asesoría y enseñanza, por formar parte de mi formación profesional y por el tiempo que le dedico a este proyecto.

Al **Dr. Marcelino Cabrera De La Fuente** por sus valiosas observaciones y orientaciones que enriquecieron este trabajo

Al **Bol. David Bravo Salazar** por permitirme culminar mis prácticas profesionales, por el compañerismo que siempre nos mostró, por su comprensión y sabios consejos, por sus recomendaciones y por ser una admirable persona.

A todos mis amigos y compañeros de la carrera, a la generación 2011-2016, que sin su amistad, apoyo y compañía me hubiese sido muy difícil el transcurso hacia la meta, a mis amigas Ely, Mariana, Evis, Tavis, Francely, Evelyn, Ana, Carolina, Enoc, Mario, Humberto, Efraín, etc.

A mis compañeras del internado femenino de máxima seguridad Matamoros 136 con las que compartí muchos momentos agradables gracias por su compañía Betty, Lili, Mary, Evis, Francely, Zuly y a todas las que me brindaron su amistad.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
RESUMEN	vii
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVO GENERAL	3
Objetivos específicos.....	3
HIPÓTESIS	4
REVISIÓN DE LITERATURA	5
Nanotecnología.....	5
La Nanotecnología en la agricultura.....	5
Nanopartículas de elementos metálicos.....	7
Síntesis de nanopartículas por métodos físicos, químicos y fitonanosíntesis.....	8
Propiedades de las nanopartículas.....	10
Nanopartículas de Cobre (Cu).....	11
Movimiento de las nanopartículas en la planta.....	13
Métodos para detección de nanopartículas en sistemas biológicamente activos.....	14
Aplicación de nanopartículas en cultivos.....	14
Las nanopartículas en la producción sostenible de cultivos.....	15
Características destacadas en las plantas influenciadas por diversos tipos nanopartículas metálicas.....	17
Compuestos generados por nanopartículas en base a la calidad presente en cultivos.....	19
Estrés oxidativo y Antioxidantes.....	21
Quitosan e Hidrogeles de quitosan.....	23
Aplicaciones de quitosan en la agricultura.....	25

El cultivo de Tomate.....	26
Calidad nutracéutica en frutos de tomate.....	27
METODOLOGÍA.....	29
Etapas y Localización.....	29
Tratamientos, aplicación y desarrollo del cultivo.....	29
Variables evaluadas.....	32
Metodología para la medición de las variables.....	34
Determinación de Licopeno por el método de Espectrofotometría.....	35
Análisis estadísticos.....	36
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	38
Variables de Crecimiento y Desarrollo del Cultivo.....	38
Variables en Producción de Biomasa.....	39
Variables en Rendimiento.....	41
Variable Postcosecha.....	43
CONCLUSIONES.....	46
LITERATURA CITADA.....	47

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Análisis de varianza y comparación de medias realizadas a las variables agronómicas relacionadas al desarrollo y crecimiento del cultivo de tomate aplicando nanopartículas de Cobre (nCu) + Quitosan (Q) bajo condiciones de invernadero.....	38
Tabla 2.- Análisis de varianza y comparación de medias realizadas a las variables agronómicas referentes a la biomasa del cultivo de tomate aplicando nanopartículas de Cobre (nCu) + Quitosan (Q) bajo condiciones de invernadero.....	40
Tabla 3.- Análisis de varianza y comparación de medias realizadas a las variables agronómicas relacionadas al rendimiento del cultivo de tomate aplicando diferentes concentraciones de nanopartículas de Cobre (nCu) + Quitosan (Q) bajo condiciones de invernadero.....	42
Tabla 4.- Análisis de varianza y comparación de medias realizadas al contenido de licopeno en frutos de plantas de tomate crecidas bajo diferentes concentraciones de nanopartículas de Cu + Quitosan en invernadero.....	44

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema que ilustra las diferentes aplicaciones potenciales de la nanotecnología en diversos aspectos de la agricultura moderna (CIQA, 2014).....	7
Figura 2. Dimensiones representativas de algunas formas existentes en sus varias escalas medidas en nanómetros (nm) y micrómetros (μm), para comparar el tamaño que representan las nanopartículas el cual varían entre 1 y 100 nm (Cebrián Candellera, 2011).....	11
Figura 3. Estructura molecular de Quitosan (Lárez Velásquez, 2003).....	24
Figura 4. Estructura molecular del Licopeno. (Fennema, 2000).....	28
Figura 5. Esquema de la aplicación de los tratamientos.....	31
Figura 6. Trasplante de plántulas de tomate en macetas que contenían los diferentes tratamientos de nanopartículas deCu.....	31
Figura 7. Colocación del riego dirigido y crecimiento de las plantas de tomate dentro del invernadero.....	32
Figura 8. Labores culturales realizadas al cultivo de tomate con diferentes concentraciones de nanopartículas de Cobre + Quitosan en el sustrato. a) Tutoreo y anillado. b) Poda basal de las plantas.....	33
Figura 9. Estado de maduración de las plantas de tomate. a) Crecimiento y fructificación de las plantas de tomate en condición oportuna para realizar la cosecha y cuantificar el rendimiento. b) Estado fisiológico apropiado para realizar la prueba de Licopeno mediante el método de la Espectrofotometría.....	34
Figura 10. Distribución de las macetas dentro del invernadero en un diseño experimental cuadro latino de un cultivo de tomate al cual se le aplicaron diferentes concentraciones de nanopartículas de Cobre + Quitosan en el sustrato.....	37

RESUMEN

La presente investigación se realizó en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro ubicada en Saltillo, Coahuila, se estableció un cultivo de tomate tipo bola bajo condiciones de invernadero, con el objetivo de evaluar diferentes concentraciones de nanopartículas de Cobre (nCu) introducidas en hidrogeles de Quitosan (Q) y para conocer los efectos en el rendimiento y la calidad nutracéutica en el fruto. Se aplicaron al sustrato cuatro diferentes concentraciones: 0.02, 0.2, 2.0 y 10 mg L⁻¹ nCu + Q, Q, más un testigo absoluto, se midieron las variables altura, diámetro de tallo, número de hojas, número de racimos, peso y número de frutos, peso fresco y seco de hoja y tallo, peso fresco y seco de raíz y licopeno por el método de Espectrofometría. El diseño experimental fue cuadro latino con 18 repeticiones por tratamiento. En los resultados se observó un incremento en el rendimiento con 10 mg L⁻¹ nCu + Q alcanzando un aumento del 17% más por planta en comparación con el testigo, el tratamiento a base de Quitosan generó un desempeño favorable comparado con los que contenían nCu; la variable que presentó diferencias en crecimiento fue el número de hojas que se incrementó con el tratamiento 2.0 mg L⁻¹ nCu + Q, en relación a la biomasa aérea el mayor valor se indujo con el tratamiento 0.02 mg L⁻¹ nCu + Q, en la biomasa de raíz fue con 10 mg L⁻¹ nCu + Q; en el contenido de licopeno no se presentaron diferencias significativas en entre los tratamientos que contenían nCu, sin embargo en comparación con el testigo en todos se observó un mayor incremento. Se demostró que la aplicación de nanopartículas de Cu en quitosan tiene efectos positivos en el crecimiento, rendimiento y características nutracéuticas de interés en las plantas de tomate.

Palabras clave: nanopartículas, agricultura, tomate, rendimiento, licopeno.

Correo electrónico; Merari Sujey Vazquez López, vaz.lop_1093@hotmail.com

INTRODUCCIÓN

La nanotecnología constituye una nueva revolución tecnológica que se impone rápidamente a nivel mundial. Se trata de una revolución en la forma de manipular la materia en cuanto al diseño, síntesis, caracterización y aplicación de materiales (Reisner, 2008). Las nanopartículas, son partículas ultrafinas de tamaño entre 1-100 nanómetros, por lo tanto, son similares a las moléculas biológicas tales como las proteínas; y son capaces de pasar a través de las membranas celulares en organismos (Nahler, 2009). Su interés radica en el hecho de que ese pequeño tamaño conlleva propiedades físicas y químicas que difieren significativamente de las habituales a mayor escala (OCDE, 2005).

Sillen *et al.* (2015), evaluaron el efecto de las nanopartículas de plata (AgNPs) en los microorganismos del suelo y la biomasa de maíz vinculados en la rizosfera, obteniendo como resultado que aplicar 100 mg kg^{-1} de AgNPs en el suelo aumenta la biomasa de maíz. Jo *et al.* (2015), evaluaron el uso de nanopartículas de plata (AgNP) como un agente alternativo para el tratamiento de semillas en plántulas de arroz llegando a la conclusión que las AgNP reducen la viabilidad de los hongos en un 50%, así también encontraron que mejora significativamente la emergencia de las plántulas y la altura. Rico *et al.* (2015), examinaron los impactos de las nanopartículas de óxido de cerio (nCeO_2) sobre la fisiología, la productividad y la composición macromolecular de cebada (*Hordeum vulgare* L.), las plantas se cultivaron en suelo tratado con nCeO_2 a 0, 125, 250, y 500 mg kg^{-1} . Los datos revelaron que nCeO_2 promovió el desarrollo de la planta aumentando en un 331% la biomasa aérea en comparación con el control, mejorando también la acumulación de

grano hasta en un 294%, generando un aumento notable en P, K, Ca, Mg, S, Fe. Del mismo modo, $n\text{CeO}_2$ mejoró la metionina, ácido aspártico, treonina, tirosina, arginina, y ácido linolénico en los granos.

El tomate posee altos contenidos de licopeno, vitaminas C y A, y flavonoides considerados como compuestos antioxidantes (Ramandeep y Geoffrey, 2005). Karami *et al.* (2015) evaluaron el efecto de las nanopartículas de plata (AgNP) sobre el contenido libre de aminoácidos y el sistema de defensa antioxidante de las plantas de tomate. Usaron concentraciones de 25, 50, 75 y 100 mg L^{-1} AgNP, obteniendo mayores incrementos en el contenido de aminoácidos en las concentraciones 75 y 100 mg L^{-1} , concluyendo que las enzimas antioxidantes modulan el estrés oxidativo inducido por AgNP en plantas de tomate.

La actual demanda de mayor cantidad en la producción de cultivos con una mejor calidad, aunado a la limitada disponibilidad de recursos en la producción ha generado buscar nuevas alternativas de producción basados en la nanotecnología. Por lo cual es necesario generar información sobre el efecto de las nanopartículas sobre los cultivos, ya que se ha descubierto que la aplicación de las nanopartículas metálicas induce efectos positivos en diversos cultivos. Por lo anterior, en este trabajo se evaluaron diferentes concentraciones de nanopartículas de Cu introducidas en hidrogeles de quitosán aplicadas en plantas de tomate, para conocer los efectos que presenta sobre este cultivo.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar diferentes concentraciones de nanopartículas de Cu en el cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* L.), para determinar el efecto sobre el rendimiento y la calidad nutracéutica en el fruto.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Evaluar el peso, el número de frutos y el número de racimos en promedio por tratamiento para determinar cómo influye la aplicación de las nanopartículas en el rendimiento.
- Evaluar la altura de la planta, el diámetro del tallo y el número de hojas para determinar el efecto que tiene las nanopartículas en el crecimiento y desarrollo de la planta.
- Evaluar el peso fresco y seco de hoja y tallo y peso fresco y seco de raíz para determinar cómo influyen las nanopartículas en la producción de biomasa.
- Cuantificar la concentración de licopeno en el fruto para conocer los cambios asociados a la calidad nutracéutica derivada de la aplicación de las nanopartículas de Cu.

HIPÓTESIS

La aplicación de nanopartículas de Cu en hidrogeles de quitosan al cultivo de tomate, aumentará significativamente el rendimiento y mejorará la calidad nutracéutica del fruto.

REVISIÓN DE LITERATURA

Nanotecnología

Los últimos años se ha visto un crecimiento exponencial en el desarrollo de materiales a escala nanométrica cuyas propiedades difieren considerablemente de los materiales a granel. Sistemas nanoestructurados tienen una amplia gama de usos, incluyendo el diagnóstico de las enfermedades, los dispositivos electrónicos y las aplicaciones ambientales y agrícolas (Ma *et al.*, 2012).

Hobsom (2011), conceptualiza la nanotecnología como el estudio científico, la comprensión y el control de la materia a dimensiones entre aproximadamente 1 y 100 nm. En otros ámbitos de estudios se ha implementado la utilidad de las nanopartículas a diferentes escalas y mayores dimensiones, como en la industria textil, Nangmenyi *et al.*, (2009) realizaron un estudio sobre la síntesis y caracterización de las nanopartículas de plata (Ag) impregnadas en fibra de vidrio, obteniendo como resultado que la fibra de vidrio con nanopartículas de Ag muestra un rendimiento superior sobre los sistemas de soporte a base de carbono. El contenido de nanopartículas de plata en la fibra de vidrio varió desde 0.04 hasta 4.7% en peso de Ag/g de fibra con una distribución de tamaño de 10 a 900 nm bajo condiciones de procesamiento estándar. También se ha implementado la utilidad de estos materiales en la industria electrónica, Tanabe (2007), comprobó la eficiencia de radiación óptica de nanopartículas metálicas para aplicaciones optoelectrónicas, en nanopartículas esféricas de 11 tipos de metales, Ag, Al, Au, Co, Cr, Cu, Ni, Pd, Pt, Sn y Ti, encontrando que Ag, Al, Au y Cu tienen una eficiencia de radiación óptica mucho

más alta que los otros metales para la mayoría de las longitudes de onda, también que las nanopartículas de Ag y Al presentaban diámetros de alrededor de 150 nm y más del 90% de eficiencia de radiación óptica.

En otra definición se describe a la nanotecnología como el estudio, diseño, creación, síntesis, manipulación y aplicación de materiales, aparatos y sistemas funcionales a través del control de la materia a nanoescala, y la explotación de fenómenos y propiedades de la materia (Vega, 2007).

La nanotecnología tiene relevancia para aplicaciones en todas las áreas de la agroalimentación como la agricultura, la acuicultura, la producción, elaboración, envasado, seguridad y alimentación (Handford *et al.*, 2015).

La Nanotecnología en la agricultura

La aplicación de la nanotecnología en el sector agroalimentario es uno de los campos de mayor crecimiento en nano-investigación (Dasgupta *et al.*, 2015).

Los campos de desarrollo dentro de la agricultura como se muestra en la Figura 1 incluyen el control de plagas a través de las formulaciones de pesticidas e insecticidas basados en nanomateriales, la mejora de la productividad agrícola utilizando nanopartículas, bioconjugados (encapsulación) para la liberación lenta de nutrientes y agua, la transferencia de ADN en las plantas para el desarrollo de variedades resistentes a las plagas y el uso de nanomateriales para la preparación de diferentes tipos de nanosensores (Rai *et al.*, 2012). Los sistemas de nanosensores se han desarrollado para el control de las condiciones ambientales,

así como las interacciones entre los agentes patógenos y plantas (Ghormade *et al.*, 2011).

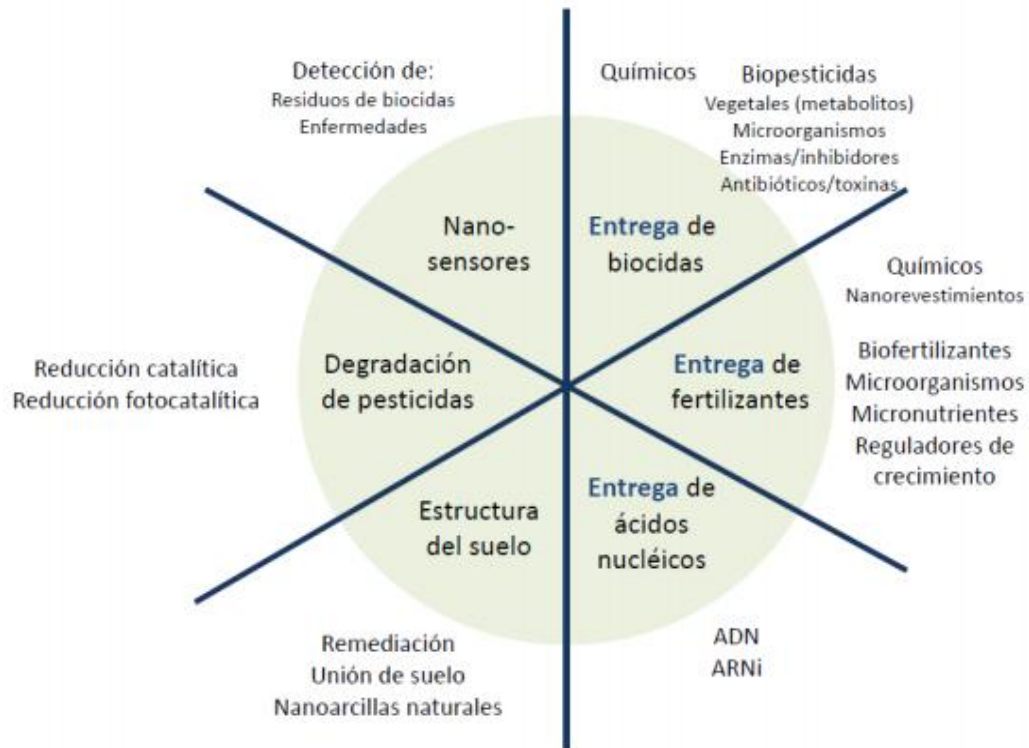


Figura 1. Esquema que ilustra las diferentes aplicaciones potenciales de la nanotecnología en diversos aspectos de la agricultura moderna (CIQA 2014).

Nanopartículas de elementos metálicos

Específicamente a las nanopartículas se les define como un material en partículas discretas generalmente menos de 100 nm, en al menos una dimensión que tiene nuevas propiedades que las diferencian de las formas de partículas del material a granel (Hobsom, 2011).

En la ingeniería, las nanopartículas se han aplicado en una amplia gama de áreas, incluyendo la producción de cultivos, la cosmética, la administración de fármacos, los

cristales fotónicos, el análisis, la comida, recubrimientos, pinturas, biorremediación, la catálisis y ciencia de los materiales (Lee *et al.*, 2015).

Las nanopartículas de plata y de oro han sido ampliamente estudiadas, sin embargo, existen otras nanopartículas metálicas tales como cadmio (Cd), cobre (Cu), hierro (Fe), paladio (Pd), platino (Pt), telurio (Te) o titanio (Ti) que están en sus etapas iniciales de investigación (Duran y Marcato, 2011).

Se han realizado diversos estudios en el ámbito agrícola y biotecnológico por diversos autores como Mandeh *et al.*, (2012). Ellos evaluaron la influencia de las nanopartículas de óxido de titanio (nano-TiO₂) en el cultivo *in vitro* de tejidos de cebada (*Hordeum vulgare* L.), los resultados mostraron que las características cualitativas tales como el color de callo, la forma, la embriogénesis, etc. eran completamente similares tanto en el control como en los tratamientos de nano-TiO₂, sin embargo encontraron que las nano-TiO₂ son un eficiente bactericida ya que inducen un efecto aséptico, esto se observó al no causar ningún cambio negativo en la calidad del callo.

Síntesis de nanopartículas por métodos físico, químicos y fitonanosíntesis

Para generar nanopartículas con formas y dimensiones particulares, se han desarrollado diversas técnicas que incluyen rutas fisicoquímicas y biológicas (Razavi *et al.*, 2015). La manipulación de las condiciones de síntesis permite el control racional del tamaño y la forma de las nanopartículas y provee los medios para adaptar las propiedades de los materiales a una aplicación específica. Los métodos físicos son: evaporación térmica, la preparación de clusters gaseosos, la implantación de iones, el depósito químico en fase vapor y la molienda o activación

mecanoquímica. Los métodos químicos son: el coloidal, la reducción fotoquímica y radiolítica, la irradiación con microondas, la utilización de dendrímeros, la síntesis solvotermal y el método sol-gel (Zanella, 2012). Los procesos físicos y químicos son típicamente caros y requieren productos químicos peligrosos (Razavi *et al.*, 2015). Sin embargo, a causa de los inconvenientes de estos métodos, los investigadores están de enfoque hacia el desarrollo de protocolos para la síntesis que ofrecen el uso de agentes biológicos (Rai *et al.*, 2011). El uso de extractos de plantas como método para la síntesis de nanopartículas, se encuentra como un método ventajoso sobre los químicos, físicos y microbiológicos (bacterias, hongos, algas). La fitonanosíntesis se define como la síntesis de nanopartículas a base de plantas ya sea a partir de extractos de órganos como hojas, frutos, raíz, etc. o por medio de la planta viva (Mittal *et al.*, 2013) por este método se tiene la ventaja de que existe una gran diversidad bioquímica en los extractos de las plantas, es de bajo costo y tiene parámetros flexibles de reacción, por lo que presenta una alta tasa de producción de nanopartículas con diferentes tamaños y formas (Boarase *et al.*, 2014). Velmurugan *et al.* (2014), evaluaron la síntesis de nanopartículas de plata (AgNPs) y oro (AuNPs) usando el extracto verde de la raíz de *Zingiber officinale*, obteniendo como resultado que la producción de nanopartículas óptima se alcanzó a pH 8 y 9, con 1 M de iones metálicos, una temperatura de reacción 50°C y tiempo de reacción de 150-180 min para AgNPs y AuNPs respectivamente. Con las imágenes de microscopía electrónica de transmisión se determinó el diámetro de las AgNPs entre 10-20 nm y AuNPs 5-20 nm. Los resultados han sido similares a los de Jha y Prasad (2011), quienes evaluaron el extracto de fruta verde del chile (*Capsicum annum* L.) para la producción de nanopartículas de plata mediante la aplicación de 20 ml a 0.25 M de

AgNO₃. Los resultados mostraron que el método de iones de plata es capaz de producir Ag NPs de forma esférica las cuales se sintetizaron en un tamaño de 2-6 nm.

Propiedades de las nanopartículas

Una de las características de las nanopartículas es que la relación entre el número de átomos superficiales y el tamaño de la partícula es de carácter exponencial. Por ello, las propiedades relacionadas con la superficie, como las eléctricas, mecánicas, magnéticas, ópticas o químicas de los nanomateriales son diferentes a las de los mismos materiales a escala no nanométrica (Erro, 2011).

Cuando se tienen materiales con dimensiones nanométricas es posible controlar algunas de sus características fundamentales como la temperatura, las propiedades magnéticas, su capacidad de carga eléctrica y su color, sin cambiar la composición química. Al utilizar esta propiedad, es factible diseñar nuevos productos de alto rendimiento, y tecnologías novedosas (Ruiz, 2006). Las nanopartículas son actualmente empleadas debido a su posibilidad de mediar la liberación del elemento que la compone, así también repercuten en la protección de los grupos lábiles de la degradación, debido a que pueden pasar a través de barreras biológicas (Duran *et al.*, 2011). Las nanopartículas podrían ser potencialmente absorbidas por las raíces de las plantas y ser transportadas a través de los sistemas vasculares dependiendo de la composición, forma y la anatomía de la planta. El tamaño que presenten es fundamental para su absorción debido a que facilita su movimiento. Su tamaño puede ser comparado con diversas formas como se muestra en la escala nanométrica en la Figura 2.

La eficiencia de absorción de las diversas nanopartículas tiene efectos sobre las funciones de crecimiento y el metabolismo de las plantas, estos efectos varían según cada tipo de especie (Ma *et al.*, 2010). Así también, la transformación de las plantas puede ser mediada por NP, ya que tienen el potencial para la modificación y la mejora genética de las plantas (Nair *et al.*, 2010).



Figura 2. Dimensiones representativas de algunas formas existentes en sus varias escalas medidas en nanómetros (nm) y micrómetros (μm), para comparar el tamaño que representan las nanopartículas el cual varían entre 1 y 100 nm (Cebrián Candelera, 2011).

Nanopartículas de Cobre (nCu)

El cobre es uno de los elementos metálicos de transición, que se produce de forma nativa en la corteza terrestre (Alder, 1981). Como se sabe, el interés de la nanotecnología se basa en que el sintetizar la materia a ese tamaño conlleva propiedades físicas y químicas que difieren significativamente de las habituales a

mayor escala (OECD, 2005). Las nanopartículas de cobre se han aplicado en diversas industrias como la agricultura, la ganadería, los electrodomésticos, la milicia y la medicina humana debido a sus propiedades antimicrobianas (Borkow y Gabbay, 2009). Por ejemplo, son eficaces en la eliminación de una amplia gama de microorganismos como: *Aspergillus carbonarius*, *Aspergillus fumigatus*, *Asppergillus niger*, *Aspergillus oryzae* y *Saccharomyces cerevisiae* (Vagabov *et al.*, 2008).

Los estudios en la agricultura sobre las nanopartículas de cobre son muy escasos, las investigaciones realizadas son dirigidas hacia fines antisépticos. Kalatehjari *et al.*, (2015) evaluaron los efectos antimicóticos de las nanopartículas de cobre (NPCu) sobre el crecimiento del hongo *Saprolegnia* sp. en los huevos de pescado blanco (*Rutilus frisii Kutum*). El estudio mostró que las nanopartículas de cobre en una concentración de 10 ppm tienen efectos antimicóticos sobre *Saprolegia* sp. Los efectos antimicóticos de las nanopartículas de cobre están correlacionados positivamente a la concentración y tiempo de exposición. La actividad antimicrobiana de nanoestructuras a base de cobre depende de la especie y el montaje experimental (Longano *et al.*, 2011). Otra investigación realizada similar fue la aplicación de nanocobre contra *Xanthomonas axonopodis* pv. *punicae* (Xap), mostrando la eficacia del nanocobre en la supresión del crecimiento a 0.2 ppm, es decir, el método fue más eficiente que el recomendado Cu-oxiclورو contra la bacteria. En la microscopía de barrido electrónico (SEM) se reveló la degradación de la pared celular en las bacterias tratadas con nanocobre, concluyendo que el nanocobre se podría emplear para una eficiente estrategia nanoantimicrobiana en diferentes procesos agrícolas (Modal y Mani, 2011).

Movimiento de las nanopáticas en la planta

A pesar de la cantidad de información disponible sobre las nanopáticas en el sistema de la planta, se han realizado pocas investigaciones sobre los mecanismos por los que las nanopáticas ejercer su efecto en el crecimiento y desarrollo de la planta (Siddiqui *et al.*, 2015). Los movimientos de translocación que presentan las nanopáticas en las plantas han sido investigados por diferentes autores. Corredor *et al.*, (2009) analizaron el ingreso y el movimiento de las nanopáticas de hierro-carbono en las células vegetales de las plantas de calabaza (*Cucurbita pepo* L.), el resultado fue que las NPs son capaces de introducirse en los tejidos vegetales vivos y de migrar a diferentes regiones de la planta, mostrando que el uso de NPs magnéticas recubiertas de carbono puede ser una aplicación factible para la entrega dirigida de sustancias en las células vegetales.

Así también Cifuentes *et al.*, (2010) investigaron la absorción y translocación de las nanopáticas revestidas de carbono magnético (bioferrofluid) a través de la raíz de diferentes plantas de cultivo, en esta investigación los resultados mostraron que las nanopáticas pueden penetrar fácilmente a través de la raíz en cuatro plantas de cultivo diferentes como lo son guisante, girasol, tomate y trigo (*Pisum sativum* L., *Helianthus annuus* L., *Solanum lycopersicum* L. y *Triticum vulgare* L.), alcanzando el cilindro vascular se mueven con el flujo de transpiración en los vasos del xilema y se extienden a través de la parte aérea de las plantas en menos de 24 horas. Se detectó además acumulación de las nanopáticas en los tricomas de las hojas de trigo, lo que sugiere una forma para la excreción/desintoxicación.

Métodos para la detección de nanopartículas en sistemas biológicamente activos

A los métodos actuales de detección e identificación de las nanopartículas fabricadas (fulerenos, nanotubos de carbono, nanopartículas de plata, oro, óxido de titanio, aluminio, cerio, zinc y silicio) en diversos sistemas como las plantas y animales se les ha dado mayor seguimiento, desarrollando una gran diversidad. Dentro de los más utilizados están los métodos de escaneado y microscopía electrónica de transmisión, microscopía de barrido láser, microscopía de fuerza atómica, túnel microscopía de barrido, cromatografía de exclusión de tamaño, fraccionamiento campo-flujo, electroforética, dispersión de luz, espectrofotometría, la espectroscopia fluorescente de rayos X espectrometría de masas y "contadores de partículas" (Hendrickson *et al.*, 2012).

Aplicaciones de nanopartículas en cultivos

Principalmente la agricultura ha sido testigo de cambios radicales desde el siglo pasado con un giro basado en la investigación, desarrollando su industrialización con monocultivos a gran escala, la mecanización, la irrigación, el uso de fertilizantes artificiales, etc. (Ingeborg y Kare, 2014). Los avances nanotecnológicos presentados en el sector agrícola se basan en fertilizantes nanoestructurados que pueden aumentar la eficiencia en el uso de nutrientes a través de mecanismos como la ejecución selectiva, lenta o de liberación controlada, liberando sus ingredientes activos en respuesta a su ambiente y demanda biológica. En recientes investigaciones a escala de laboratorio, se ha informado que los nano-fertilizantes pueden mejorar la productividad de los cultivos mediante la mejora de la tasa de

germinación de semillas, crecimiento de las plántulas, actividad fotosintética, el metabolismo del nitrógeno, y de carbohidratos y la síntesis de proteína (Solaki *et al.*, 2015). Las principales ventajas de estos sistemas agrícolas son la liberación gradual, sostenida y controlada durante un largo período de tiempo, con el objetivo de mejorar la protección del cultivo (Aouada y Moura, 2015).

También se han desarrollado una serie de trabajos por diferentes autores relacionados con el combate de plagas agrícolas. Fatima *et al.*, (2015) realizaron la síntesis de nanopartículas de plata (AgNPs) y oro (AuNPs) mediante el hongo *Bipolaris tetramera*, posteriormente las nanopartículas fueron evaluadas por su eficacia antibacteriana y antifúngica. Los resultados mostraron actividad antimicrobiana eficaz de AgNPs contra *Bacillus cereus*, *Staphylococcus aureus*, *Enterobacter aeruginosa* y *Trichoderma* sp., sin embargo, las AuNPs solo poseían eficacia antibacteriana moderada, mientras que no se encontró ninguna actividad antifúngica.

Las nanopartículas en la producción sostenible de cultivos

En la agricultura, la absorción de los nutrientes por las plantas de una manera óptima para la producción de cultivos es el área de prioridad hacia donde se dirige la investigación. En este sentido, se han presentado avances en el área de la nutrición de las plantas y la nano-nutrición es una de las zonas más interesantes de la investigación para la producción de la agricultura sostenible (Ditta *et al.*, 2015). Así también la nanotecnología ofrece una gran promesa en el área de detección de la contaminación y la prevención, mediante la explotación de nuevas propiedades de

los nanomateriales (Baruha y Dutta., 2009). Seabra *et al.*, (2015) con el objetivo de generar una agricultura sostenible, evaluaron el papel de los nanotransportadores en la entrega de óxido nítrico (NO), encontrando que las principales ventajas del uso de donantes de NO en la agricultura se han desarrollado para estimular la ecologización de la planta y la germinación, el control de la homeostasis del hierro y mejorar la tolerancia de las plantas a la toxicidad de los metales, la salinidad, la sequía y las altas temperaturas. En este contexto la combinación de los donantes de NO con los nanomateriales se perfila como un enfoque prometedor para optimizar los efectos beneficiosos de NO en las plantas. Por otro lado, los productos agroquímicos se usan deliberadamente para controlar las plagas en la agricultura. Derivado de esto, la comunidad científica también tiene como objetivo obtener matrices biodegradables (vehículos portadores biodegradable) capaces de reducir el número y frecuencia de las aplicaciones de nutrientes y pesticidas en el suelo que contribuiría a una disminución de la contaminación ambiental (Aouada y Moura, 2015). Por ejemplo, se evaluó la mineralización de los plaguicidas mediante las nanopartículas de plata (AgNP) en soportes de membrana, la síntesis se realizó utilizando glucosa y se soportaron sobre membranas de acetato de glucosa, observando que las nanopartículas de plata pueden mineralizar efectivamente los pesticidas, percibiendo que la concentración de nanopartículas aumenta la tasa de mineralización de los plaguicidas (Manimegalai *et al.*, 2014). Los avances del uso de las nanopartículas en este sector ha tenido una gran aceptación y por lo tanto cada vez se desarrollan investigaciones con el fin de obtener mejores utilidades para este tipo de compuestos.

Características destacadas en las plantas influenciadas por diversos tipos de nanopartículas metálicas.

La estructura que presentan los vegetales es muy variada y está íntimamente relacionada con el medio y las condiciones que presenta su hábitat, es claro que cuando se altera ya sea el sustrato, el riego, las dosis de fertilización, etc., las plantas experimentan cambios en su estructura tanto externa como interna. Por lo tanto al aplicar en diferentes formas las nanopartículas metálicas las plantas reaccionan a los cambios, expresándose de diferentes maneras. Lin y Xing (2007) evaluaron los efectos de diferentes tipos de nanopartículas (nanotubos de carbono, aluminio, alúmina, zinc y óxido de zinc) mediante la imbibición de semillas de seis especies de plantas superiores (rábano, ryegrass, zanahoria, lechuga, maíz y pepino) para observar los cambios durante la germinación y crecimiento de la raíz. Se obtuvo como resultado que la germinación de semillas no se vio afectada, excepto con zinc a nanoescala (nano-Zn) en raigrás y óxido de zinc (ZnO nano-) en el maíz a 2000 mgL^{-1} . Mohammadi *et al.*, (2014) evaluaron las respuestas fisiológicas y bioquímicas del efecto de nanopartículas de óxido de titanio (TiO_2) en el daño oxidativo y los sistemas de defensa antioxidantes en plántulas de garbanzo (*Cicer arietinum* L.) durante el estrés por frío. Obtuvieron como resultado que las enzimas antioxidantes fueron más eficientes en la protección celular contra el clima frío en comparación con el testigo, las NPTiO₂ causan una estabilidad de la clorofila y los carotenoides, también confieren una mayor tolerancia de las plantas de garbanzo al estrés, reduciendo el nivel de las lesiones y el aumento de la capacidad de los sistemas de defensa.

Baskar *et al.*, (2015) evaluaron los efectos inducidos en los cambios morfológicos y fisiológicos de plantas del cultivo de col china (*Brassica rapa ssp. Pekinensis*) por la aplicación de nanopartículas de plata (AgNP) a diferentes concentraciones (100, 250, y 500 mgL⁻¹). Observaron que las AgNPs a concentraciones de 100 mgL⁻¹ presentaron actividad estimulante del crecimiento, mientras que a concentraciones más altas (250 y 500 mg L⁻¹) suprimieron las actividades de crecimiento presentándose raíz reducida, menor crecimiento de brotes y biomasa fresca, así también disminuyó el contenido de clorofila presente en concentraciones más altas de AgNPs.

Suriyaprabha *et al.*, (2012) analizaron las respuestas fisiológicas y de crecimiento en maíz (*Zea mays* L.) al aplicar nanopartículas de sílice (SNPs) en suelo franco-arenoso. Las características de crecimiento fueron influenciadas con el aumento de la concentración de SNPs hasta 15 kg ha⁻¹, mientras que a 20 kg ha⁻¹, no se observaron incrementos significativos. La acumulación de sílice en las hojas fue alta a los 10 y 15 kg ha⁻¹ (0.57 y 0.82% en base a peso seco). Los cambios fisiológicos observados muestran que la expresión de compuestos orgánicos, tales como proteínas, clorofila y fenoles fue mejor en maíz tratado con nanosílice, especialmente a los 15 kg ha⁻¹ en comparación con sílice a granel y el control. Los regímenes de sílice a nanoescala aplicado en 15 kg ha⁻¹ tiene una respuesta positiva en el maíz, por lo tanto es una fuente alternativa de fertilizante de sílice que ayuda a mejorar la agricultura sostenible de este cultivo. Otros autores como Hu *et al.*, (2013) evaluaron los efectos en el crecimiento y los indicadores bioquímicos de la planta acuática (*Salvinia natans* L.) expuesta a nanopartículas de óxido de zinc (ZnO PN) con un

diámetro medio de 25 nm. Observaron que la exposición a 50 mg L⁻¹ de ZnO PN aumentó significativamente la superóxido dismutasa (SOD) y la actividad de catalasa (CAT), y los pigmentos fotosintéticos se redujeron significativamente. Sin embargo, el crecimiento de la planta no se vio afectado significativamente por las ZnO NPs, pero a una concentración mayor a 50 mg L⁻¹ puede afectar negativamente a *S. natans*.

Pavani *et al.*, (2015) evaluaron el efecto de las nanopartículas de óxido de gamma-férrico sobre tomate (*Solanum lycopersicum* L.). Como resultado observaron cambios en los contenidos de clorofila a, clorofila b, y carotenos totales, así como un aumento el rendimiento del cultivo y una menor clorosis. En otra investigación en tomate se evaluaron en diferentes sitios (nivel de laboratorio y a campo abierto) los efectos de las nanopartículas de dióxido de titanio (NP-TiO₂) sobre la germinación de tomate (*Lycopersicum esculentum* L.), cebolla (*Allium cepa* L.) y rábano (*Raphanus sativus* L.). Los resultados mostraron que a nivel de laboratorio el porcentaje de germinación más alto de tomate y cebolla fue a 100 mg L⁻¹ (100 y 30%, respectivamente) y en rábano el 100% de germinación se obtuvo con 400 mg L⁻¹. A nivel de invernadero, el porcentaje fue más alto después de la exposición a 400 y 200 mg L⁻¹ para tomate y cebolla respectivamente, y entre 400 y 100 mg L⁻¹ para rábano (Haghighi y Teixeira, 2014).

Compuestos generados por nanopartículas en base a la calidad presente en cultivos

Debido a las condiciones a las que son expuestos los cultivos tratados con nanopartículas, estos expresan diferencias en el contenido de nutrientes, por lo cual

se han realizado diversos estudios. Kole *et al.*, (2013) quienes realizaron una investigación para evaluar los efectos de las nanopartículas basadas en el carbono, fullerol [C₆O (OH)₂O], sobre las semillas de melón amargo (*Momordica charantia*), confirmaron la captación, la translocación y acumulación de las nanopartículas en la planta. Además, se generó un aumento de hasta 54% en la producción de biomasa y del 24% en el contenido de agua, un aumento hasta del 20% en la longitud del fruto, 59% en el número de frutos, y del 70% en peso de la fruta, aumentando hasta 128% en el rendimiento. En cuanto a las fitomedicinas que contiene el cultivo, la cucurbitacina-B y el licopeno, se mejoraron hasta 74% y 82% respectivamente, el charantin y la insulina se aumentaron hasta 20% y 91% respectivamente. Ellos concluyeron que con los tratamientos aplicados aumentaron el rendimiento del cultivo y la calidad mediante el uso de concentraciones adecuadas de fullerol.

Otra investigación relacionada a la calidad nutrimental fue realizada por Mousavi *et al.*, (2015) quienes evaluaron los efectos en compuestos bioquímicos, actividad enzimática y antioxidantes aplicando nanopartículas de óxido de zinc (ZnO NP) y partículas de ZnO a granel, en semilla de colza (*Brassica napus*). Después de la exposición a largo plazo, los resultados mostraron cambios significativos en la actividad enzimática antioxidante, en la clorofila total, proteínas solubles, prolina y azúcares solubles de las hojas. De acuerdo a diversos resultados obtenidos y las evaluaciones realizadas por diversos investigadores con las aplicaciones de nanopartículas, se puede aumentar la calidad en cultivos principalmente en el contenido de compuestos antioxidantes en los frutos.

Estrés oxidativo y Antioxidantes

La oxidación es un proceso bioquímico de pérdida de electrones siempre asociado a otro de captación que llamamos reducción. Esta oxidación es fundamental para la vida, pues participa en los procesos de obtención de la energía celular. Sin embargo cuando existe un exceso de oxidación aparece el estrés oxidativo, que es una realidad compleja en todos los niveles biológicos, que no se puede medir ni definir con un solo parámetro. Hay una multitud de enfermedades que se han relacionado con el estrés oxidativo y la generación de radicales libres. Por esto, terapias antioxidantes y dietas ricas o enriquecidas con antioxidantes parecen prevenir o al menos disminuir el deterioro funcional orgánico originado por un exceso de estrés oxidativo (Elejalde, 2001).

Bajo condiciones de fisiológica normal, la producción de prooxidantes se mantiene en equilibrio en la misma cantidad o exceso de antioxidantes. Un estado de estrés oxidativo se produce cuando este equilibrio es perturbado en favor del exceso de prooxidantes (Thomas, 2013).

Los antioxidantes (AA) son compuestos capaces de inhibir o retardar la oxidación, mediante la “captación” de radicales libres, también estabilizan hidroperóxidos o inactivan el oxígeno singlete (Luna-Guevara, 2014). El contenido de antioxidantes generado por nanopartículas ha sido ampliamente estudiado en diferentes autores. Da-Costa y Sharma (2015), analizaron el efecto de las nanopartículas de cobre (II) óxido (CuO NPs) en el crecimiento, la fotosíntesis y la respuesta antioxidante de arroz (*Oryza sativa* var. Jyoti). Los resultados fueron que la tasa de germinación, la longitud de la raíz y la biomasa disminuyó, mientras que la absorción de Cu en las

raíces y brotes aumentó a altas concentraciones de CuO PNs. La tasa fotosintética, la tasa de transpiración, conductancia estomática y contenido de pigmentos fotosintéticos disminuyeron a 1000 mg (CuO NP) L⁻¹, también se observó la expresión elevada de ascorbato peroxidasa y superóxido dismutasa, enzimas que forman parte de los compuestos antioxidantes.

Los frutos de tomate han sido considerados una fuente importante de AA “nutricionales” (vitaminas A, C y E) y AA “fitoquímicos no nutritivos” (licopeno, flavonoides, flavonas y compuestos fenólicos totales), cuyo consumo está relacionado con su potencial antimutagénico y propiedades anticancerígenas (Luna-Guevara, 2014).

Karami *et al.*, (2015) evaluaron el efecto de las nanopartículas de plata (AgNP) sobre el contenido libre de aminoácidos y el sistema de defensa antioxidante de las plantas de tomate, en concentraciones de 25, 50, 75 y 100 mg L⁻¹. Obtuvieron los mayores incrementos en el contenido de aminoácidos en las concentraciones de 75 y 100 mg L⁻¹, concluyendo que las enzimas antioxidantes modulan el estrés oxidativo inducido por AgNP en plantas de tomate.

En referencia a los nutrientes presentes en tomate se han desarrollado diversas investigaciones en las que evalúan los efectos que tiene el licopeno contra diferentes enfermedades. Campbell y Erdman (2005) llegaron a la conclusión de que este compuesto inhibe el cáncer de próstata, ya que los estudios *in vitro* demuestran que el licopeno y otros carotenoides disminuyen la proliferación de células de cáncer en varias líneas y se encuentra en los tejidos humanos, además de ser el principal

carotenoide que se encuentra en la próstata humana. Sin embargo, no descartan las interacciones de otros fotoquímicos presentes en el tomate además del licopeno.

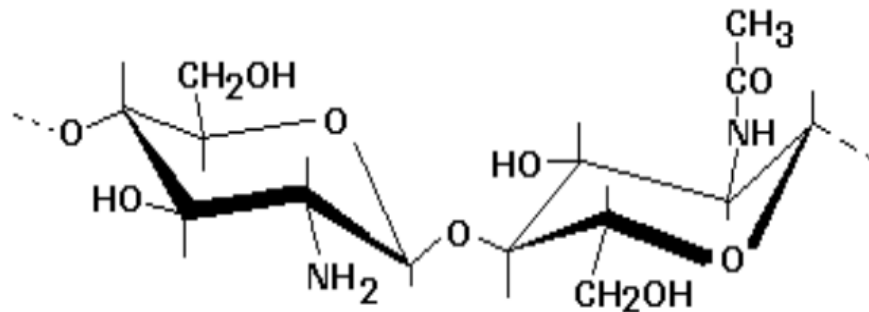
El licopeno está presente en el plasma y los tejidos con gran variación en su distribución. La presencia de carotinoides en tejidos humanos se reporta desde 1990; Se sabe que estos carotenoides y sus metabolitos están presentes en el suero o se acumulan en tejidos tales como el del hígado, de pulmón, de mama, de cuello uterino y la piel. Entre los carotenoides, licopeno es uno de los más abundantes en el cuerpo humano, con su alta concentración principalmente debido al consumo de alimentos (Khachik *et al.*, 2002).

Quitosan e Hidrogeles de Quitosan

El quitosan es el más abundante polisacárido amino natural y está junto a la celulosa en abundancia en el planeta (Chawla *et al.*, 2015). Ha recibido mucho interés por su gran potencial de aplicación en la agricultura debido a su excelente biocompatibilidad, biodegradabilidad y bioactividad (Katyar *et al.*, 2015). Es un polisacárido obtenido por desacetilación parcial de la quitina de las conchas de crustáceos, es uno de los biopolímeros naturales lo más estudiados, debido a que tiene potencial para numerosas aplicaciones industriales (Perera *et al.*, 2013). Además, el quitosán es un polisacárido lineal que tiene buena funcionalidad química en la síntesis de hidrogeles debido a la mayor capacidad de reticulación y presencia de abundantes grupos amino ($-NH_2$) (Ravi-Kumar, 2000).

Las unidades estructurales del quitosan (Figura 3), la glucosamina y la Nacetilglucosamina, están presentes en diferentes glicosaminoglicanos (GAG), los

cuales son heteropolisacáridos lineales y aniónicos presentes en las matrices extracelulares de los tejidos humanos; normalmente los GAG se encuentran unidos covalentemente a proteínas centrales y forman los proteoglicanos, los cuales tienen la función de organizar y dar funcionamiento adecuado a la matriz extracelular (Abram, 2004).



Unidad repetitiva del quitosán

Figura 3. Estructura molecular de Quitosán. (Lárez Velásquez, 2003)

El hidrogel es una red polimérica tipo gel insoluble en agua debido a su extensa reticulación, su capacidad de retención de agua es significativa y se atribuye a la presencia de varios grupos funcionales (*i.e.*, amino, carboxilo, amida, hidroxilo y ácido sulfónico) en los polímeros de la red de formación del hidrogel (Peppas y Khare, 1993).

Los hidrogeles presentan numerosas aplicaciones biológicas, médicas y tecnológicas. Dentro de las aplicaciones más importantes se encuentran liberación controlada de drogas y la ingeniería de tejidos, esta última mantiene una tendencia a la utilización de soportes a partir de hidrogeles poliméricos para la reparación y

regeneración de una gran variedad de tejidos y órganos (Rojas *et al.*, 2004). Son estructuras tridimensionales hinchadas en presencia de agua o de fluidos biológicos (Berger *et al.*, 2004). Algunos materiales cuando se colocan en medios líquidos, tienen la capacidad de hincharse y retener cierto volumen del medio acuoso absorbido en su red tridimensional. Actualmente se utilizan materiales tanto de origen natural (de plantas y animales) así como materiales sintéticos (Swami, 2004).

Específicamente, los hidrogeles obtenidos a partir de quitosano presentan una buena biocompatibilidad, baja degradación y un procesamiento sumamente fácil; la capacidad de estos hidrogeles de hincharse y deshidratarse depende de la composición y medio en el cual se obtuvo el gel (Sánchez *et al.*, 2007).

Aplicaciones de quitosán en la agricultura

El quitosán afecta a varias respuestas fisiológicas como la inmunidad de la planta, los mecanismos de defensa que implican diversas enzimas tales como: liasa de amonio fenilalanina, polifenol oxidasa, liasa de amoniaco tirosina y enzimas antioxidantes (Katyar *et al.*, 2015). Ben-Shalom y Fallik (2003) evaluaron la supresión de *Botrytis cinerea* en las plantas de pepino (*Cucumis sativus* L.) por el complejo de quitosán-cobre (QCu) en comparación con quitosán solo (Q), obteniendo que QCu en comparación con Q mejoró la supresión de *Botrytis cinérea*. Las concentraciones óptimas para la represión más eficaz de *Botrytis* fue 0,2 g⁻¹ de quitosano y 1,6 mmol de cobre, después de la incubación de 12 días, se mejoró significativamente la supresión de la enfermedad con el complejo de quitosán-cobre (75% de supresión) más que con el quitosán solo, concluyendo que complejo de quitosán-Cu podría ser

un agente de control de enfermedades para su uso tanto en la agricultura convencional y orgánica.

Lizárraga-Paulin *et al.*, (2013) evaluaron el efecto del quitosan y peróxido de hidrógeno (H₂O₂) en recubrimientos de semillas y aspersiones de plántulas en dos variedades de maíz (*Zea mays* L.) diferentes. Midieron su fenología y la cantidad de proteína presentando como resultados que el recubrimiento de semillas aumentó la tasa de germinación y el aumento de las plántulas, la longitud del tallo y la calidad proteínica. Las aplicaciones por aspersión de quitosan y H₂O₂ no generaron ningún efecto sobre la fenología de las plántulas.

Otro trabajo relacionado lo realizaron Mansilla *et al.*, (2013) quienes evaluaron las propiedades antimicrobianas y el modo de acción del quitosan contra *Pseudomonas syringae* (Pto) en el cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) obteniendo como resultado que la aplicación de quitosan inhibió el crecimiento bacteriano de Pto esto en base a la concentración, en un mediano pH, y la presencia de iones metálicos. Los cambios bioquímicos y celulares y el crecimiento bacteriano deteriorado fueron notables, por lo tanto se causó daños en las superficies bacterianas y la incidencia de la enfermedad en el tomate se redujo significativamente en plántulas pretratadas con quitosán, revelando una acción prometedora de éste como biopesticida no tóxico en plantas de tomate.

El cultivo de Tomate

El tomate pertenece a la familia de las solanáceas, junto con otros cultivos de importancia económica como el pimiento, berenjena y la patata. Fue clasificado por Miller (1754) como *Lycopersicon esculentum* y renombrado por Child (1990) y Peralta

y Spooner (2006) como *Solanum lycopersicum* (Diez y Nuez, 2008). El tomate cultivado ha alcanzado gran popularidad gracias por su versatilidad en formas frescas o procesadas (Antignus, 2003). Es la segunda hortaliza más consumida después de la papa y se encuentra en varios usos directos e indirectos en la dieta humana, proporcionando fuentes importantes de vitaminas A y C, minerales esenciales, antioxidantes fenólicos y otros varios nutrientes (Kalia y Palanisamy, 2013)

Calidad nutraceutica en frutos de tomate

La calidad del fruto del tomate se determina por su apariencia (color, tamaño, forma, ausencia de desórdenes fisiológicos y descomposición), firmeza, textura y materia seca, sus propiedades sensoriales (sabor) y nutraceuticas (beneficios para la salud). La calidad sensorial del tomate se atribuye principalmente a la concentración de compuestos volátiles responsables del aroma de ácidos y de azúcares; su calidad nutraceutica se define por su contenido de minerales, vitaminas, carotenos y flavonoides (Papadopoulos, 2004).

En general, los altos contenidos de azúcar, enrojecimiento del color y textura firme se asocian al sabor (Salunkhe *et al.*, 1974). El tomate contiene una excelente fuente de compuestos nutraceuticos, tales como diversos nutrientes, metabolitos secundarios, β -caroteno, licopeno, vitaminas C y E, flavonoides y diversos compuestos fenólicos. La ingesta dietética de tomate y productos derivados contienen licopeno, y se ha demostrado que este compuesto se asocia con la disminución del riesgo de enfermedades cardiovasculares y ciertos tipos de cáncer (Ghorbani *et al.*, 2012).

El licopeno es un carotenoide lipófilo que es responsable del color rojo en diversas frutas y verduras y se encuentra comúnmente en los tomates, es uno de los antioxidantes más potentes entre los carotenoides de la dieta, debido principalmente a sus numerosos enlaces dobles conjugados (Figura 4), y también tiene la capacidad de bloquear la acción del oxígeno en el estrés oxidativo en comparación con otros carotenoides (Ferreira y Correa, 2013).

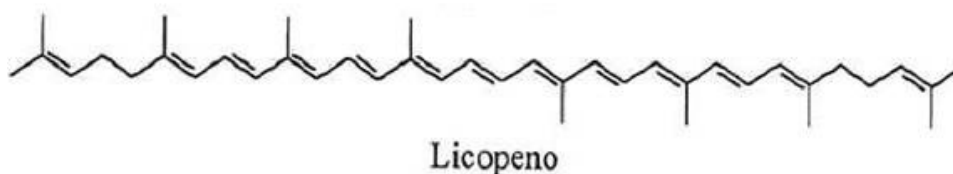


Figura 4. Estructura molecular del Licopeno. (Fennema, 2000)

La calidad de la nutrición y las propiedades nutracéuticas de los frutos de tomate las cuales son relacionadas con la salud humana, especialmente carotenoides, flavonoides, fenoles y compuestos antioxidantes, se ven afectados por la luz, la temperatura, el CO₂ contenido en el aire, los contaminantes del aire, la velocidad y disponibilidad del agua, régimen de riego, la salinidad y la otros aspectos de la calidad de agua, la estructura del suelo, física del suelo y las características químicas, fertilizantes minerales y orgánicos y la materia orgánica del suelo (Ghorbani *et al.*, 2012).

METODOLOGÍA

Etapas y Localización

La presente investigación consta de dos etapas la primera se inició con la germinación de la semilla y el respectivo transplante, el invernadero se localiza en las coordenadas 25°21'21.50 latitud Norte y 101° 2'10.82 longitud Oeste, a un altitud de 1763 msnm, ubicado en el departamento de Horticultura en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Buenavista Saltillo, Coahuila. El invernadero fue de tipo multitunel, orientación Sur-Norte, con un cubierta de Polietileno, presentando temperaturas de 37°C en el día y en la noche alcanzaba hasta 15°C, con una humedad relativa del 70%.

La etapa 2 contemplo la fase de laboratorio, la fase postcosecha significada por los análisis efectuados al contenido licopeno en el fruto de tomate, se realizó en el laboratorio de Fisiología Vegetal del Departamento de Horticultura dentro de la misma institución.

Tratamientos, aplicación y desarrollo del cultivo

El nanocobre (nCu) utilizado en el estudio fue sintetizado en el Departamento de Materiales Avanzados del Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA) ubicado en Blvd. Enrique Reyna No. 140, Col. San José de los Cerritos, Saltillo, Coahuila, usando la metodología de Cadenas-Pliego *et al.* (2013). Por su parte, los hidrogeles de quitosán usados fueron de la marca Marine Chemicals (PM=200,000). El estudio se realizó en el ciclo primavera-verano del año 2016. Se usaron semillas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) tipo bola, de crecimiento indeterminado, la

semilla fue el híbrido Caiman de Enza Saden. La siembra se realizó en una charola de polietileno de 200 cavidades y se desarrolló por 30 días. Las plántulas se nutrieron con la solución Steiner (Steiner, 1961) al 20% todos los días hasta el día del trasplante.

Los tratamientos utilizados consistieron en la aplicación de diferentes concentraciones de nCu en hidrogeles de quitosán como se describe a continuación:

Tratamiento 1) 0.02 mg nCu + Q,

Tratamiento 2) 0.2 mg nCu + Q,

Tratamiento 3) 2.0 mg nCu + Q,

Tratamiento 4) 10.0 mg nCu + Q,

Tratamiento 5) 0.0 mg nCu + Q (solo quitosán),

Tratamiento 6) Testigo Absoluto

Los tratamientos se aplicaron al sustrato previamente al trasplante colocado 1 g de hidrogel por cada planta. Este se colocó en la parte media de la maceta la cual se dividió en tres diferentes estratos como se muestra en la Figura 5. El sustrato se colocó en bolsas negras (40 x 40) de polietileno con capacidad de 12 L. Se usó una mezcla de sustrato de peat moss y perlita 50:50 (v:v). Posteriormente se realizó el trasplante cuando las plantas tenían cuatro hojas verdaderas (Figura 6).

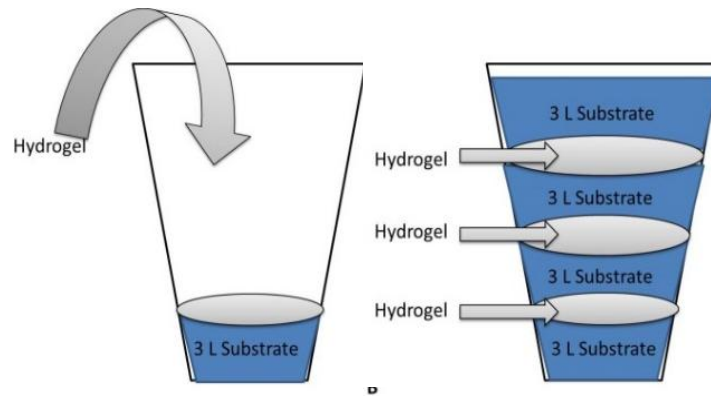


Figura 5. Esquema de la aplicación de los tratamientos.

Se colocó un sistema de riego dirigido, y se usó un timer marca TAYLOR modelo 5806 para la aplicación de cuatro riegos por día cada 6 horas. Para la nutrición del cultivo se usó la solución nutritiva Steiner (Steiner, 1961), aplicando concentraciones de 25% las primeras 2 semanas después del trasplante, 50% las semanas 3 y 4, 75% las semanas 5 y 6, y 100% a partir de la semana 7 (Figura 7).



Figura 6. Trasplante de plántulas de tomate en macetas que contenían los diferentes tratamientos de nanopartículas de Cu.



Figura 7. Colocación del riego dirigido y crecimiento de las plantas de tomate dentro del invernadero.

Durante el desarrollo del cultivo se realizaron las labores culturales correspondientes como la poda, tutoreo, anillado, etc (Figura 8). También se efectuó el raleo de frutos para obtener el desarrollo de cinco tomates por racimo. Finalmente, cuando las plantas alcanzaron una altura promedio de 167 cm, se eliminó el ápice central para evitar su crecimiento y esperar la maduración de los frutos amarrados.

Variables evaluadas

El diámetro del tallo en cada plata, la altura de la planta, número de hojas por plata, número de racimos y número de frutos amarrados.

El rendimiento se evaluó en la cosecha obteniendo en número de frutos por plantas y el peso promedio de frutos. También se contabilizó el número de racimos florales para determinar si hubo diferencias en el desarrollo de inflorescencias producidas por las plantas.

La biomasa fresca de cada órgano se obtuvo al momento de eliminar las plantas, y después de su deshidratación en un horno de secado marca Linderberg/blue modelo GO1350C-1 a 80°C por 72 horas se obtuvo la biomasa seca.

Para obtener la cantidad de licopeno en fruto, se tomaron muestras de frutos que presentaran características similares como tiempo de maduración, tamaño, color, etc como se muestra en la Figura 9 la prueba de laboratorio se realizó por medio de la técnica de Espectrofotometría (Fish *et al.* 2002).

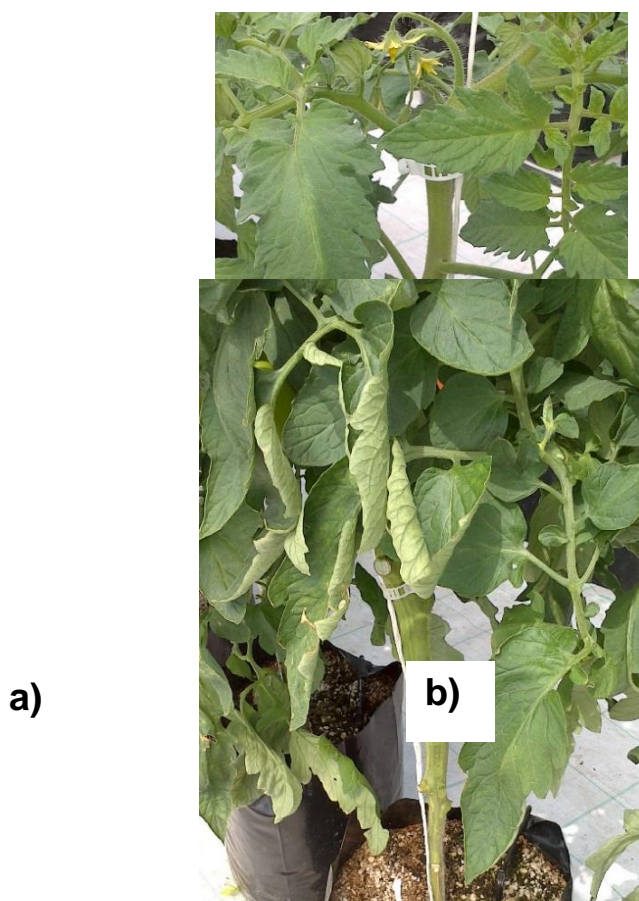


Figura 8. Labores culturales realizadas al cultivo de tomate con diferentes concentraciones de nanopartículas de Cobre (nCu) + Quitosan (Q) en el sustrato. a)Tutoreo y anillado. b) Poda basal de las plantas.

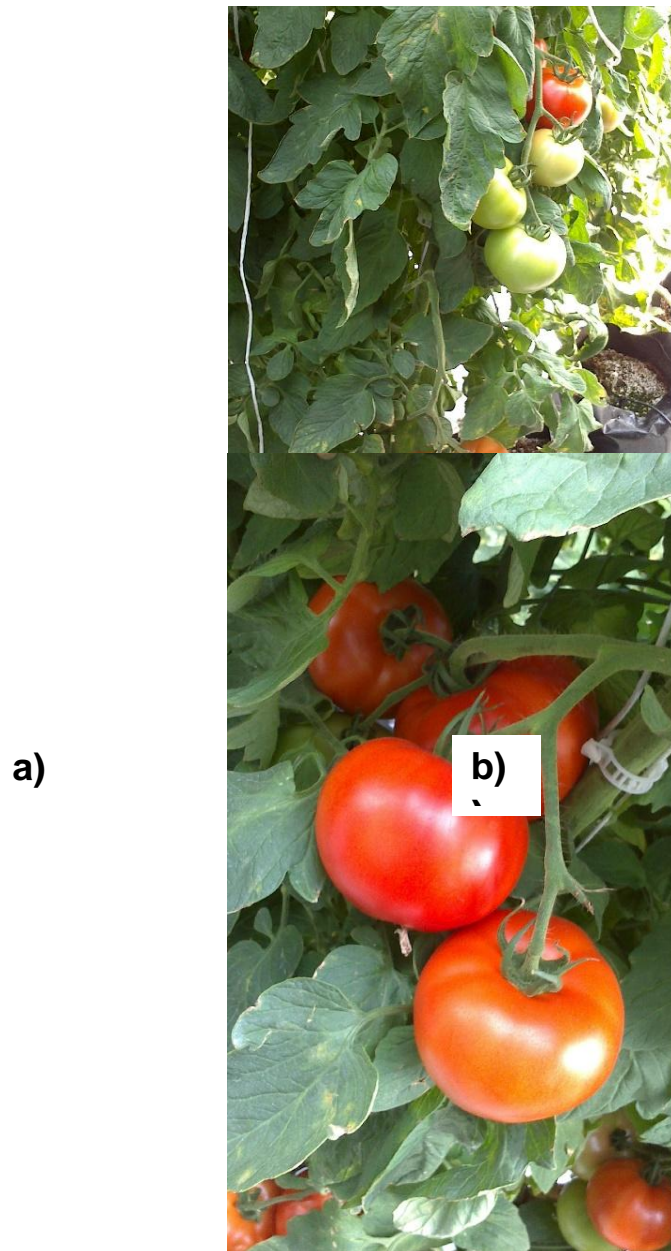


Figura 9. Estado de maduración de las plantas de tomate. a) Crecimiento y fructificación de las plantas de tomate en condición oportuna para realizar la cosecha y cuantificar el rendimiento. b) Estado fisiológico apropiado para realizar la prueba de Licopeno mediante el método de la Espectrofotometría.

Metodología para la evaluación de las variables

El diámetro del tallo se midió cada 15 días entre la tercera y cuarta hoja presente en la planta de suelo hacia arriba, con un vernier marca KD-TOOLS modelo KDT3756.

La altura con una cinta métrica marca Stanley modelo 30-615.

Se realizó el conteo manual del número de hojas, racimos desarrollados y frutos amarrados.

El rendimiento se obtuvo cuando los frutos estuvieron en la etapa de maduración, se cosecho y se pesó cada fruto por planta en una balanza analítica marca PIONEER modelo PA1502, esto se realizó cada 15 días o cuando los frutos estuvieran en estado maduro.

Los datos de peso fresco de la planta se obtuvieron al final del cultivo al disectar y separar las hojas y el tallo, colocándolos en bolsas de papel marcadas y pesando en una balanza analítica marca PIONEER modelo PA1502.

La raíz se extrajo separando el sustrato de la maceta manualmente y se retiró el exceso de sustrato con agua, por último se pesaron en la balanza marca PIONEER modelo PA1502. Para obtener el peso seco se colocaron las bolsa de papel donde se encontraba la planta disectada en dos estufas de secado marca Linderberg/blue modelo GO1350C-1 por 72 horas aproximadamente, con temperatura de 80 °C, por último se pesaron en la balanza, para comparación entre tratamientos.

Determinación de Licopeno por el método de Espectrofotometría

Para la determinación de licopeno se utilizó el método descrito por Fish *et al.* (2002) con algunas modificaciones.

La cuantificación de licopeno se realizó cuando el fruto se encontraba en una etapa de maduración, se extrajeron muestras similares de cada tratamiento, se llevaron al laboratorio de Fisiología Vegetal en el departamento de Horticultura, se guardaron en el ultracongelador marca SANYO modelo U53VA a -80 °C, para los análisis se

descongelaron las muestras y se pesaron 3 g de pericarpio del fruto colocándolos en un mortero frío, se agregaron 3 ml de buffer de fosfatos con pH de 7, después se maceraron las muestras y con una micropipeta marca Science Med modelo MI0380 se depositaron 4 ml de esta mezcla en tubos de 15 ml, al tubo se le agregaron 8 ml de hexano:cetona (3:4), se agitó en un vortex marca GENIE-1 modelo SI-0136 hasta homogenizar la mezcla para separar y disolver los pigmentos de las membranas (Davis *et al.* 2003).

Posteriormente se centrifugó a 3000 rpm por 10 min. después con una micropipeta se extrajo el sobrenadante, se colocó en tubos eppendorf de 2 ml. Por último se leyó la absorbancia comparando con un blanco el cual fue agua destilada, colocó cada muestra en una celdilla del espectrofotómetro marca Thermo Cientific modelo G10S UV-Vis leyéndose una longitud de onda de 502 nanómetros.

La cantidad de Licopeno se obtuvo aplicando la fórmula:

$$\text{Licopeno } (\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}) = A_{502} [1/320] \cdot 4$$

Dónde:

A = Absorbancia obtenida en el espectrofotómetro

502 = es la longitud de onda expresada en nanómetros, la cual se estableció para minimizar la interferencia con otros carotenoides.

$[1/320] \cdot 4$ = es una constante

Se sustituyó el valor de la absorbancia en la fórmula y se obtuvo la cantidad de licopeno en microgramos por gramo de muestra.

Análisis estadístico

En la investigación se estableció un diseño experimental cuadro latino como se muestra en la Figura 10. Se establecieron 6 tratamientos con 18 repeticiones considerando una maceta con una planta como una unidad experimental.

Para detectar la existencia de diferencias estadísticas entre tratamientos se realizó un análisis de varianza (ANOVA), adicionalmente se efectuó una prueba de separación de medias según LSD ($p < 0.05$). Todos los análisis estadísticos se trabajaron en el software estadístico R.

0.2 mg +Q	0.2 mg +Q	0.2 mg +Q	T0	T0	T0	10 mg +Q	10 mg +Q	10 mg +Q	0.02 mg +Q	0.02 mg +Q	0.02 mg +Q	Q	Q	Q	2.0 mg +Q	2.0 mg +Q	2.0 mg +Q
Q	Q	Q	2.0 mg +Q	2.0 mg +Q	2.0 mg +Q	0.02 mg +Q	0.02 mg +Q	0.02 mg +Q	0.2 mg +Q	0.2 mg +Q	0.2 mg +Q	10 mg +Q	10 mg +Q	10 mg +Q	T0	T0	T0
T0	T0	T0	0.02 mg +Q	0.02 mg +Q	0.02 mg +Q	0.2 mg +Q	0.2 mg +Q	0.2 mg +Q	10 mg +Q	10 mg +Q	10 mg +Q	2.0 mg +Q	2.0 mg +Q	2.0 mg +Q	Q	Q	Q
0.02 mg +Q	0.02 mg +Q	0.02 mg +Q	0.2 mg +Q	0.2 mg +Q	0.2 mg +Q	2.0 mg +Q	2.0 mg +Q	2.0 mg +Q	Q	Q	Q	T0	T0	T0	10 mg +Q	10 mg +Q	10 mg +Q
10 mg +Q	10 mg +Q	10 mg +Q	Q	Q	Q	T0	T0	T0	2.0 mg +Q	2.0 mg +Q	2.0 mg +Q	0.02 mg +Q	0.02 mg +Q	0.02 mg +Q	0.2 mg +Q	0.2 mg +Q	0.2 mg +Q
2.0 mg +Q	2.0 mg +Q	2.0 mg +Q	10 mg +Q	10 mg +Q	10 mg +Q	Q	Q	Q	T0	T0	T0	0.2 mg +Q	0.2 mg +Q	0.2 mg +Q	0.02 mg +Q	0.02 mg +Q	0.02 mg +Q

Figura 10. Distribución de las macetas dentro del invernadero en un diseño experimental cuadro latino de un cultivo de tomate al cual se le aplicaron diferentes concentraciones de nanopartículas de Cobre (nCu) + Quitosan (Q) en el sustrato. T0= testigo, Q= quitosan.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

VARIABLES DE CRECIMIENTO Y DESARROLLO DEL CULTIVO

Los resultados de la evaluación de las variables agronómicas relacionadas al crecimiento del cultivo de tomate son presentados en la Tabla 1. Las variables diámetro de tallo y número de hojas presentaron diferencias significativas, mientras que en la altura de planta no las hubo.

En la variable diámetro del tallo el mayor valor se obtuvo con el tratamiento de 10 mg L⁻¹ nCu + Q con 22.49 mm, sin embargo este no fue superior al testigo.

Tabla 1.- Comparación de medias realizadas a las variables agronómicas relacionadas al desarrollo y crecimiento del cultivo de tomate aplicando nanopartículas de Cobre (nCu) + Quitosan (Q) bajo condiciones de invernadero:

TRAT	AP (cm)	DT (mm)	No. Hojas
0.02 mg L ⁻¹ nCu + Q	169.55 a »	21.39 b	20.27 ab
0.2 mg L ⁻¹ nCu + Q	166.81 a	22.07 ab	19.64 bc
2.0 mg L ⁻¹ nCu + Q	168.72 a	21.63 ab	20.43 a
10 mg L ⁻¹ nCu + Q	168.62 a	22.49 a	20.00 abc
Q	167.83 a	21.74 ab	19.83 abc
T0	167.25 a	22.26 a	19.43 c

CV (%)	3.83	5.87	5.44
P	NS	*	*

AP=altura de la planta, DT=diámetro del tallo, »=Letras diferentes por columna indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq 0.05$), CV= Coeficiente de variación, *=Diferencia Significativa, NS= Diferencia no Significativa.

En el número de hojas se presentaron diferencias significativas, donde la mayor cantidad de estas se presentó en el tratamiento de $2.0 \text{ mg L}^{-1} \text{ nCu} + \text{Q}$ siendo superior al testigo ya que este fue el que presentó la menor cantidad. Estos resultado coinciden con los obtenidos por a Qi *et al.*, (2013) quienes realizaron una investigación donde analizaron los efectos de las nanopartículas de óxido de titanio (nano-TiO₂), en la fotosíntesis de la hojas de tomate bajo estrés térmico suave, los resultados mostraron que la tasa de fotosíntesis neta, la conductancia, y la tasa de transpiración de las hojas aumentó después de la aplicación de una concentración apropiada de nano-TiO₂, concluyendo que las nanopartículas juega un papel positivo en la fotosíntesis de las hojas de tomate, por lo tanto si se presenta un aumento en fotosíntesis de la planta se podrá inducir un mayor crecimiento en los órganos de la misma.

Variables en Producción de Biomasa

Los resultados de las variables de biomasa son presentados en la Tabla 2. Se observó que las variables peso seco de hoja-tallo, peso fresco y seco de raíz presentaron diferencias estadísticas, solo en la variable peso fresco de hoja-tallo no hubo diferencias.

El peso seco de hoja-tallo mostro diferencias significativas, aquí la concentración $0.02 \text{ mg L}^{-1} \text{ nC} + \text{Q}$ indujo el mayor valor. Por su parte, el peso fresco de la raíz

también mostro diferencias significativas siendo el tratamiento de 10 mg L⁻¹ nCu + Q el de mejor resultado. Estos resultados concuerdan con De la Rosa *et al.*, (2013) quienes reportan un aumento del 35% en la producción de biomasa respecto a los controles en las plántulas de tomate al aplicar 800 mg L⁻¹ de nanopartículas de óxido de zinc (ZnO PN). Coincidiendo con esto Wang (2014) realizo una investigación para conocer la fitotoxicidad de las nanopartículas de óxido de cerio (CeO₂-NPs) en el crecimiento de las plantas de tomate, obtuvieron en los resultados que la aplicación en el riego de las CeO₂-NPs a concentraciones de hasta 10 mg L⁻¹ estimuló el crecimiento de plantas de tomate, pero que la exposición a las CeO₂-NPs lo largo de un ciclo de vida perjudica el crecimiento de plantas.

Tabla 2.- Comparación de medias realizadas a las variables agronómicas referentes a la biomasa del cultivo de tomate aplicando nanopartículas de Cobre (nCu) + Quitosan (Q) bajo condiciones de invernadero:

TRAT	PFHT (g)	PSHT (g)	PFR (g)	PSR (g)
0.02 mg L ⁻¹ nCu + Q	2323.73 a »	234.65 a	78.46 ab	9.71 b
0.2 mg L ⁻¹ nCu + Q	2204.17 a	212.57 ab	77.12 ab	10.23 ab
2.0 mg L ⁻¹ nCu + Q	2207.87 a	201.62 b	95.77 a	12.14 ab
10 mg L ⁻¹ nCu + Q	2314.75 a	216.39 ab	95.94 a	12.56 a
Q	2308.88 a	199.75 b	86.62 ab	10.65 ab
T0	2192.16 a	196.80 b	79.01 ab	9.95 b
CV (%)	16.96	19.50	32.08	33.74
<i>p</i>	NS	*	*	*

PFHT=peso fresco de hojas y tallo, PSHT=peso seco de hoja y tallo, PFR=peso fresco de raíz, PSR=peso seco de raíz, »=Letras diferentes por columna indican diferencias

significativas (Tukey $p \leq 0.05$), CV= Coeficiente de variación, *=Diferencia Significativa, NS= Diferencia no Significativa.

También Vittori *et al.*, (2014) evaluaron la influencia de la exposición a las nanopartículas modificadas (NP) con óxidos metálicos (CeO_2 , Fe_3O_4 , SnO_2 , TiO_2) y NP metálicas (Ag, Co, Ni) en las plantas de tomate, obtuvieron como resultado que las NP óxido metálicas de Fe_3O_4 , promovieron el crecimiento de la raíz. Sin embargo, estos mismos autores reportan que la aplicación de NP de dióxido de estaño (SnO_2) redujo en un 63.1% la materia seca de este cultivo.

En el peso seco de raíz se presentaron diferencias significativas, el tratamiento de $10 \text{ mg L}^{-1} \text{ nCu} + \text{Q}$ fue el mejor con 95.94 g. Karami *et al.*, (2015) reportaron una disminución drástica en el índice de vigor y la longitud de raíz de plántulas de tomate tratadas con nanopartículas de plata (AgNPs) con un tamaño 50 nm en cinco concentraciones diferentes, 0, 25, 50, 75 y 100 mg L^{-1} aplicadas a la semilla. En los resultados obtenidos aquí se observó el mismo efecto en algunos tratamientos, sobre todo el de $0.02 \text{ mg L}^{-1} \text{ nCu} + \text{Q}$ que generó el menor peso seco de raíz.

Variables en Rendimiento

Los resultados obtenidos en las variables agronómicas relacionadas al rendimiento del cultivo de tomate, son presentados en la Tabla 3.

El aumento de rendimiento es uno de los objetivos de la siembra más importantes para todos los cultivos (Ikeda *et al.*, 2013). En los resultados obtenidos en este trabajo el tratamiento de $10 \text{ mg L}^{-1} \text{ nCu} + \text{Q}$ alcanzó los mayores valores, siendo estos resultados estadísticamente significativos, alcanzando un aumento del 17% más por planta (1064.61 gr.) en comparación con el testigo, en el número racimos se

presentaron diferencias significativas, superando ligeramente al testigo con un promedio de 6.31 racimos por planta, en la variable número de frutos se existieron por igual diferencias significativas presentándose un valor superior de 28.50 g en la concentración. Estos resultados coinciden con Wang *et al.*, (2012) quienes determinaron que las nanopartículas de óxido de cerio (CeO_2 -NPs) a diferentes concentraciones (0.1 a 10 mg L⁻¹) tuvieron efectos positivos sobre el rendimiento de tomate, específicamente en el crecimiento de la planta y la producción de frutos.

Tabla 3.- Comparación de medias realizadas a las variables agronómicas relacionadas al rendimiento del cultivo de tomate aplicando diferentes concentraciones de nanopartículas de Cobre (nCu) + Quitosan (Q) bajo condiciones de invernadero:

TRAT	No. Racimo	No. Frutos	REN (g/Planta)
0.02 mg L ⁻¹ nCu + Q	6.00 b »	27.11 ab	6966.65 ab
0.2 mg L ⁻¹ nCu + Q	6.00 b	26.22 b	6515.65 b
2.0 mg L ⁻¹ nCu + Q	6.00 b	26.44 ab	6586.40 b
10 mg L ⁻¹ nCu + Q	6.31 a	28.50 a	7348.99 a
Q	6.00 b	26.61 ab	6921.88 ab
T0	6.00 b	26.58 ab	6284.38 b
CV (%)	3.42	12.28	16.49
<i>p</i>	*	*	*

REN=rendimiento, »=Letras diferentes por columna indican diferencias significativas (Tukey $p \leq 0.05$), CV= Coeficiente de variación, *=Diferencia Significativa, NS= Diferencia no Significativa.

El tratamiento a base de Quitosan (Q) presento diferencias en las variables: Numero de Frutos, Numero de Racimos, peso fresco de hoja-tallo, peso fresco de raíz y

rendimiento, alcanzando valores favorables que fueron superiores en referencia al testigo, cabe resaltar que estos valores también fueron mayores a los conseguidos por los tratamientos $2.0 \text{ mg L}^{-1} \text{ nCu} + \text{Q}$ y $0.2 \text{ mg L}^{-1} \text{ nCu} + \text{Q}$ los cuales contenía nanopartículas de Cu, mostrando un incremento superior en las cantidades de las variables medidas, pero no rebasando al tratamiento con los mayores resultados. Esto coincide con Bautista *et al.*, (2006) quienes concluyen que el quitosano induce barreras estructurales, por ejemplo la síntesis de materiales como la lignina y el aumento en el rendimiento del cultivo de tomate cosechado. También Saharan *et al.*, (2015) evaluaron el efecto de la combinación de nanopartículas de quitosano (nQ) + Cu (Cobre) en el crecimiento de tomate (*Solanum lycopersicum* Mill), aquí los resultados mostraron un efecto promotor en la germinación de semillas de tomate, la longitud de las plántulas y en el peso fresco y peso seco.

Variables de Postcosecha

El contenido de licopeno como parte de las variables postcosecha y el principal compuesto antioxidante en el cultivo de tomate presenta una diferencia significativa entre cada uno de los tratamientos como se muestra en la Tabla 4.

En esta variable aunque los datos son similares entre si estadísticamente, en referencia con el testigo los resultados muestran a todos los tratamientos que contenían nCu con una mayor cantidad de licopeno en el fruto. Estos resultados se mostraron similares a Uhram *et al.*, (2013) quienes aplicaron al cultivo de tomate nanopartículas de óxido de titanio (nano-TiO₂) en forma de aerosol, lo cual dio como resultado una mayor actividad antioxidante en frutos a una concentración de 5000 mg / kg. Por su parte Mohammad *et al.*, (2013) realizaron la aplicación en el riego de

Nanopartículas de óxido de níquel (NiO-PN) en un intervalo de concentración de 0.025 a 2.0 mg / ml en plántulas de tomate, concluyo que en comparación con el control el tratamiento de 2.0 mg / ml de NiO-NPs mostró mayor actividad de enzimas antioxidantes.

Tabla 4.- Comparación de medias realizadas al contenido de licopeno en frutos de plantas de tomate crecidas bajo diferentes concentraciones de nanopartículas de Cu + Quitosan en invernadero:

TRAT	LICOPENO ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)
0.02 mg nCu + Q	4.81 a »
0.2 mg nCu + Q	4.17 ab
2.0 mg nCu + Q	3.62 ab
10 mg nCu + Q	4.47 ab
Q-PVA	3.52 b
T0	3.42 b
C.V. (%)	23.62 *

»=Letras diferentes por columna indican diferencias significativas (Tukey $p \leq 0.05$), CV= Coeficiente de variación, *=Diferencia Significativa, NS= Diferencia no Significativa.

Wang (2014) investigo la fitotoxicidad de las nanopartículas de óxido de cerio (CeO_2 -NPs) y de las nanopartículas de óxido de titanio (TiO_2 -NPs) en el crecimiento de las plantas de tomate por separado, así como los efectos causado por la exposición a la combinación de los dos tipos de nanopartículas, obtuvieron en los resultados que la aplicación de las nanopartículas de óxido de cerio (CeO_2 -NPs) colocadas en el suelo seco previo a la exposición del cultivo a concentraciones de 4

y 40 mg / kg, seguido de la incorporación al sistema de riego de 1000 mg / L de nanopartículas de óxido de titanio (TiO_2 -NPs), esto en postratamiento aumentaron las actividades de proteínas antioxidantes en comparación con los tratamientos de CEO_2 -NPs y TiO_2 -NPs por separado. Así también Saeed, *et al.*, (2015) señalan un aumento significativo de enzimas antioxidantes en brotes y raíces de plantas de tomate tratadas con nanopartículas de Plata (AgNPs) por otro lado especifica que la actividad de superperóxido dismutasa (SOD) disminuyó significativamente en las raíces a 100 mg L^{-1} .

Entre el tratamiento basado en Quitosan y el testigo no se presentaron diferencias significativas, estos resultados no coinciden con varios estudios que comprueban los efectos benéficos del quitosan sobre este cultivo como Katiyar y Singh (2015) quienes establecen que el quitosan afecta a varias respuestas fisiológicas como la inmunidad de la planta, los mecanismos de defensa que implican diversas enzimas tales como, liasa de amonio fenilalanina, polifenol oxidasa, liasa de amoniaco tirosina, mayor actividad de enzimas antioxidantes y que ayuda en la formación de barreras que mejora la productividad de la planta. Deepmala y Hemantaranjan (2015) concluyen que el quitosan debido a su biocompatibilidad y biodegradabilidad puede ser aplicado en la agricultura, indicando que reduce el efecto perjudicial de las plantas en estrés, afecta las respuestas fisiológicas e incrementa los mecanismos de defensa en las plantas como los antioxidantes.

CONCLUSIONES

La aplicación de hidrogeles de quitosán con y sin nCu tuvo un efecto positivo en casi todas las variables agronómicas relacionadas al vigor de las plantas de tomate.

En referencia a la calidad nutracéutica se encontró que con la aplicación de nanopartículas de Cu en quitosán aumentó la cantidad de licopeno en el fruto.

Al realizar la aplicación de quitosán se obtuvieron resultados favorables en las etapas de crecimiento y en el desarrollo del cultivo.

Se demostró que la aplicación de nanopartículas de Cu en hidrogeles de quitosán tiene efectos positivos en el crecimiento, rendimiento y características nutracéuticas de interés en las plantas de tomate.

LITERATURA CITADA

- Abram, A. P. 2004. Quitina y quitosano: obtención, caracterización y aplicaciones. Programa Cytod 2004, Pontificia Universidad Católica del Perú /Fondo Editorial: Lima, cap. 1.
- Alder, W. N., 1981. Cobre. Efecto de la contaminación en las plantas con metales pesados 111-143.
- Antignus, Y. 2003. Tomato. Virus and Virus-like Diseases of Crops in Developing Countries 641-663.
- Aouada, F.A. and M.R. Moura. 2015. Nanotechnology applied in agriculture: controlled release of agrochemicals. Nanotechnologies in Food and Agriculture 102-118.
- Baruah, S. and J. Dutta. 2009. Nanotechnology applications in pollution sensing and degradation in agriculture: a review. Environmental Chemistry Letters 3(7): 191-204.
- Baskar, V., J. Venkatesh and S.W. Park. 2015. Impact of biologically synthesized silver nanoparticles on the growth and physiological responses in *Brassica rapa* ssp. *pekinensis*. Environmental Science and Pollution Research 1-11.

- Bautista-Bañosa S., A.N. Hernández-Lauzardo, M.G. Velázquez-del Vallea, M. Hernández-López y E. Bosquez-Molina. 2006. Chitosan as a potential natural compound to control pre and postharvest diseases of horticultural commodities (25):10.
- Ben-Shalom, N. and F. Fallik. 2003. Further suppression of *Botrytis cinérea* disease in cucumber seedlings by chitosan-copper complex as compared with chitosan alone. *Phytoparasitica* 1(31):99-102.
- Berger, J., M. Reist, J.M. Mayer, O. Fielro, N.A. Peppas, R. Gurny. 2004. Structure and interactions in covalently and ionically crosslinked chitosan hydrogels for biomedical applications. *Eur J Pharm Biopharm* 1(57):19-34.
- Borase, H.P., B.K. Salunke, R.B. Salunkhe, C.D. Patil, J.E. Hallsworth, B.S. Kim, S.V. Patil. 2014. Plant Extract: A Promising Biomatrix for Ecofriendly, Controlled Synthesis of Silver Nanoparticles. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 1(173): 1-129.
- Borkow, G., J. Gabbay. 2009. Copper, an ancient remedy returning to fight microbial, fungal and viral infection *Curr. Chemistry Biology* 3(3): 272–278.
- Campbell, J.K. and J.W. Erdman. 2005. Tomato, lycopene, and prostate cancer. *Preventive Nutrition* 157-170.
- Cebrián, J.I. 2011. Síntesis de Bionanomateriales basados en Nanotubos de Carbono y su aplicación en Nanomedicina. Maestría de estudios avanzados en Química 21.
- Chawla, S.P., S.R. Kanatt, A.K. Sharma. 2015. Chitosan. *Polysaccharides* 219-246.

- Cifuentes, Z., L. Custardoy, J. De la Fuente, C. Marrquina, M.R. Ibarra, D. Rubiales and A. Perez-de-Luque. 2010. Absorption and traslocation to the aerial part of magnetic carbón-coated nanoparticles through the rood of different crop plants. *Journal of Nanobiotechnology* 8-26.
- Corredor, E., P.S. Testillano, M.J. Coronado, P. Gonzalez-Melendi, R. Fernandez-Pacheco, C. Marquina, M.R. Ibarra, J.M. De la Fuente, D. Rubiales. 2009. Nanoparticle penetration and transport in living pumpkin plants: in situ subcellular identification. *BMC Plant Biology* 9-45.
- Da Costa, M.V.J. and P.K. Sharma. 2015. Effect of copper oxide nanoparticles on growth, morphology, photosynthesis, and antioxidant response in *Oryza sativa*. *Phytosynthetica* 1-11.
- Dasgupta N., S. Ranjan, D. Mundekkaad, C. Ramalingam, R. Sharker y A. Kumar. 2015. Nanotechnology in agro-food: From field to plate. *Food Research International* (69): 381-400.
- Davis, A.R., W. Fish, P. Perkins .2003. A rapid hexane - free for analyzing lycopene content in watermelon. *Journal Food Science* 1(68): 328-332.
- De la rosa J.E., R. Peralta-Videa, H. Catillo y S. Majumdar.2013.La exposición de las nanopartículas de óxido de zinc y los mecanismos de defensa en plantas de tomate 273-287.
- Deepmala K. y A. Hemantaranjan. 2015. Chitosan as a promising natural compound to enhance potential physiological responses in plant: a review. *Indian Journal of Plant Physiology* 1(20): 1-9.
- Diez, J.M., F. Nuez. 2008. Tomato. *Vegetables II* (2): 249-323.

- Ditta, A., M. Arshad and M. Ibrahim. 2015. Nanoparticles in sustainable agricultural crop production: applications and perspectives. *Nanotechnology and Plant Sciences* 55-75.
- Duran, N. and P. Marcato. 2011. Biotechnological routes to metallic nanoparticles producción: mechanistic aspects, antimicrobial activity, toxicity and industrial applications. *Nano-Antimicrobials* 337-374.
- Duran, N., Z. Teixeira, P.D. Marcato. 2011. Topical application of nanostructures: Soil lipid, polymeric and metallic nanoparticles. *Nanocosmetics and Nanomedicines* 69-99.
- Elejalde, J.I. 2001. Estrés oxidativo, enfermedades y tratamientos antioxidantes. *Anales de Medicina Interna* 6(18): 10.
- Erro, J. 2011. La seguridad y la salud en la exposición a nanoparticulas. 1er Edicion. Instituto Riojano de Salud Laboral. España 50.
- Fatima, F., P. Bajpai, N. Pathak, S. Singh, S. Priya, S. Rastogi. Eficacia antimicrobiana e inmunomodulador de las nanoparticulas de plata y oro extracelularmente sintetizados por un hongo solubilizado (*Bipolaris tetramera*). *BMC Microbiology* 15-52.
- Fennema, O., 2000. Química de los Alimentos. Editorial Acribia. Segunda edición 1280.
- Ferreira, A.L. and C.R. Correa. 2013. Lycopene bioavailability and its effects on health. *Food Quality Safety and Technology* 63-76.

- Fish W. W., P. Perkins-Veazie and J. K. Collins. 2002. A Quantitative Assay for Lycopene That Utilizes Reduced Volumes of Organic Solvents. *Journal of Food Composition and Analysis* 3(15): 309-317.
- Ghorbani, R., V. Poozesh and S. Khorramdel. 2012. Tomato production for human health, not only for food. *Organic Fertilisation, Soil Quality and Human Health* (9): 187-225.
- Ghormade, V., M. V. Deshpande and K.M. Paknikar. 2011. Perspectives for nanotechnology enabled protection and nutrition of plants. *Biotechnology Advances* 6(29): 972-803.
- Gruere, G.P. 2012. Implications of nanotechnology growth in food and agriculture in OECD countries. *Food Policy* 2(37): 191-198.
- Haghighi, M. and J. Teixeira. 2014. The effects of N-TiO₂ on tomato, onion, and radish seed germination. *Journal of Crop Science and Biotechnology* 4(17): 221-227.
- Handford, C.E., M. Dean, M. Spence, M. Henchion, C. Elliott, K. Campbell. Awareness and attitudes towards the emerging use of nanotechnology in the agri-food sector. *Food Control* (57): 24-34.
- Hendrickson, O.D., I.V. Safenkova, A.V. Zherdev, B.B. Dzantiev and V.O. Popov. 2012. Methods of detection and identification of manufactured nanoparticles. *Biophysics* 6(56): 961-986.
- Hobson, D.W. 2011. Nanotechnology. *Biotechnologia Integral* (3): 683-697.

- Hu, C., X. Liu y Y. Zhao. 2013. Evaluation of growth and biochemical indicators of *Salvinia natans* exposed to zinc oxide nanoparticles and zinc accumulation in plants. *Environmental Science and Pollution Research* 1(21): 732-739.
- Ikeda, M., H. Kitano and M. Matsuoka. 2013. Yield. *Genetics and Genomics of Rice* (5): 227-235.
- Ingeborg, A. and B. Kare. 2014. Nanotechnology in agriculture. *Encyclopedia of Food and Agricultural Ethics* 1417-1423.
- Jha, A. and K. Prasad. 2011. Greed fruit of chilli (*Capsicum annum* L.) synthesizes nanosilver. *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures* 4(6): 1717-1723.
- Jo, Y., W. Cromwell, H.K. Jeong, J. Thorkelson, J.H. Roh, D.B. Shin. 2015. Use of silver nanoparticles for managing *Gibberella fujikuroi* on rice seedling. *Crop Protection* (74): 65-69.
- Kalatehjari, P., M. Yousefian y M. A. Khalilzadeh. 2015. Evaluación de los efectos antimicóticos de las nanoparticulas de cobre sobre el crecimiento del hongo *Saprolegnia* sp. en los huevos del pescado blanco (*Rutilus frisii Kutum*). *El egipcio Revista de Investigación Acuática* 81.
- Kalia, P. and M. Palanisamy. 2013. Tomato. *Alien Gene Transfer in Crop Plants* (2): 347-380.
- Karami, S., R. Heidari, F. Rahmani. 2015. Effect of silver nanoparticles on free amino acids content and antioxidant defense system of tomato plants. *Indian Journal of Physiology Plant* 3(20): 257-263.

- Katiyar, D., A. Hemantaranjan and B. Singh. 2015. Chitosan as a promising natural compound to enhance potential physiological responses in plant: a review. *Indian Journal of Plant Physiology* 1(20): 1-9.
- Khachik, F., L. Carvalho, P.S. Bernstein, G.J. Muir, D.Y. Zhao, N.B. Katz. 2002. Chemistry, distribution, and metabolism of tomato carotenoids and their impact on human health. *Exp Biol Med* 10(227): 845-851.
- Kole, C., P. Kole, K.M. Choudhary, R. Podilla, P.C. Ke, A.M. Rao, R.K. Marcus. 2013. Nanobiotechnology can boost crop production and quality: first evidence from increased plant biomass, fruit yield and phytomedicine content in bitter melón (*Momrdica charantia*). *BMC Biotechnology* 13-37.
- Lárez, V. C. 2003. Algunos usos del Quitosano en sistemas acuosos. *Revista Iberoamericana de Polímeros. Venezuela* 4(2): 1-19.
- Lee, Y.C., K. Lee, Y.K. Oh. 2015. Recent nanoparticle engineering advances in microalgal cultivation and harvesting processes of biodiesel production: A review. *Bioresource Technology* (184): 63-72.
- Lin, D. and B. Xing. 2007. Phytotoxicity of nanoparticles: inhibition of seed germination and root growth. *Enviromental Pollution* 2(150): 243-250.
- Lira, H. R., M. Hernández y J. Corrales. 2014. *Nanotecnología en agricultura sustentable*. 1er Edición. Fundación Produce. Saltillo, Coahuila 44.
- Lizarraga-Paulin, E.G., S.P. Miranda-Castro, E. Moreno-Martinez, A.V. Lara-Sagahon, I. Torres-Pacheco. 2013. Maize seed coatings and seedling sprayings with chitosan and hydrogen peroxide: their influence on some

phenological and biochemical behaviors. Journal of Zhejiang University SCIENCE B 2(14): 87-96.

Longano, D., N. Ditaranto, L. Sabbatini, L. Torsi, N. Cioffi. 2011. Synthesis and antimicrobial activity of copper nanopaterials. Nano-Antimicrobials 85-117.

Luna-Gevara, M.L. and A. Delgado. 2014. Importance, Contribution and stability of antioxidants in fruits and products of tomato (*Solanum lycopersicum* L.). Avances en la Invetigacion Agropecuaria (18): 51-66.

Ma, H., P.L. Williams and S. Diamond. 2013. Ecotoxicity of manufactured ZnO nanoparticles: A review. Enviromental Pollution (172): 76-85.

Ma, X., J. Geiser-Lee, Y. Deng, A. Komakov. 2010. Interactions between engineered nanoparticles (ENPs) and plants: Phytotoxicity, uptake and accumulation. Science of Total Environment. 16(408): 3053-3061.

Mandeh, M., M. Omidi and M. In Vitro Influences of TiO₂ Nanoparticles on Barley (*Hordeum vulgare* L.) Tissue Culture. Biological Trace Element Research (150): 376-380.

Manimegalai, G., S. Shanthakumar, C. Sharma. 2014. Silver nanoparticles: synthesis and application in mineralization of pesticides using membrane support. International Nano-Letters 4-105.

Mansilla, A.Y., L. Albertego, M.S. Rodriguez, A. Debbaudt, A. Ziñiga, C.A. Casalongue. 2013. Evidence on antimicrobial properties and mode of action of a chitosan obtained from crustacean exoskeletons on *Pseudomonas syringae* pv. Tomato DC3000. Applied Microbiology and Biotechnology 97(15): 6957-6966.

- Mittal, A., Y. Cristi and U. Chand. 2013. Synthesis of metallic nanoparticles using plant extracts. *Biotechnology Advances* 2(31): 346-356.
- Mohammad F. Q. Saquibb, A. Abdulrahman, A. Alatar, A. Al-khedhairy, A.K. Hegazy and J. Musarratd. 2013. Phytotoxic hazards of NiO-nanoparticles in tomato: A study on mechanism of cell death. *Journal of Hazardous Materials* (250): 318-332.
- Mohammadi, R., R. Maali-Amiri, M.L. Mantri. 2014. Effect of TiO₂ nanoparticles on oxidative damage and antioxidant defense systems in chickpea seedlings during cold stress. *Russian Journal of Plant Physioilogy* 6(61): 768-775.
- Mondal, K.K. and C. Mani. 2011. Investigation of the antibacterial properties of nanocopper against *Xanthomonas axonopodis* pv. *Punicae*, the incitant of pomegranate bacterial blight. *Annals of Microbiology* 2(62): 889-893.
- Mousavi, S.M., M. Lahouti, A. Ganjeali, M.H. Entezari. 2015. Comparative effects of ZnO nanoparticles, ZnO bulk particles, and Zn²⁺ on *Brassica napus* after long-term exposure: changes in growth, biochemical compounds, antioxidant enzyme activities, and Zn bioaccumulation. *Water, Air & Soil Pollution* 226-364.
- Nair, R., S.H. Varghese, B.G. Nair, T. Maekawa, Y. Yoshida, D.S. Kumar. Nanoparticule material delivery to plants. *Plant Science* 2(179): 154-163.
- Nangmenyi, G., Z. Yue, S. Mehrabi and E. Mintz. 2009. Synthesis and characterization of silver-nanoparticle-impregnated fiberglass and utility in water disinfection. *Nanotechnology* 49(20): 13.

- OCDE. 2008. Manufactured nanomaterials: Work programme 2006-2008. In OECD Environment, Health and Safety Publications. Series on the safety of manufactured nanoparticles. N° 4. París, OCDE. 1-17.
- Papadopoulos, T. 2004. Manejo del ambiente y los factores nutricionales para la producción de tomate de alta calidad en invernaderos. Memorias del Congreso Internacional de Hidroponía 2004. Universidad Autónoma de Chihuahua. Chihuahua, México.
- Pavani, T., K. Venkateswara, C.S. Chakra y Y. T. Prabhu. 2015. Síntesis y caracterización de nanopartículas de óxido de gamma-ferrico y su efecto sobre *Solanum lycopersicum*. Environmental Science and Pollution Research 1-8.
- Peppas, N.A. and Khare, A.R. 1993. Preparation, structure and diffusional behavior of hydrogels in controlled release. Advanced Drug Delivery Reviews 2(11): 1–35.
- Perera, U.S.M. and N. Rajapakse. 2013. Nanopartículas de quitosano: preparación, caracterización y aplicaciones. Seafood Processing By-products 371-387.
- Qi, M., Y. Liu and T. Li. 2013. Nano-TiO₂ improve the photosynthesis of tomato leaves under mild heat stress. Biological Trace Element Research 1(156): 323-328.
- Rai, M. y A. Ingle. 2012. Role of nanotechnology in agriculture with special reference to management of insect pests. Applied Microbiology and Biotechnology 2(94): 287-293.

- Rai, M., A. Gade, A. Yadav. 2011. Biogenic nanoparticles: introducción to what they are, how they are synthesized and they applications. *Metal Nanoparticles in Microbiology* 1-14.
- Ramandeep, K. T. y P.S. Geoffrey. 2005. Antioxidant activity in different fraction of tomatoes. *Nanotechnologies in Food and Agriculture* 5(38): 487-494.
- Ravi-Kumar, M. N. V. 2000. A review of chitin and chitosan applications. *Reactive and Functional Polymers* (46): 1-27.
- Razavi, M., E. Salahinejad, M. Fahmy, M. Yazdimamaghani, D. Vashae, L. Tayebi. 2015. Green chemical and biological synthesis of nanoparticles and their biomedical applications. *Green Processes for Nanotechnology* 207-235.
- Rico, C.M., A.C. Barrios, W. Tan, R. Rubenecia, S.C. Lee, A. Valera-Ramirez, J.R. Peralta-Videa y J.L. Gardea-Torresdey. 2015. Physiological and biochemical response of soil-grown barley (*Hordeum vulgare* L.) to cerium oxide nanoparticles. *Environmental Science and Pollution Research* 14(22): 10551-10558.
- Rico, C.M., J.R. Peralta-Videa, J.L. Gardea-Torresdey. 2015. Chemistry, Biochemistry of nanoparticles, and their role in antioxidant defense system in plants. *Nanotechnology and Plant Sciences* 1-17.
- Rojas, O., M. Moya, M. Sibaja, C. Ruepert, JR. Vega-Baudrit. 2004. Hidrogeles de Quitosan. *Revista Iberoamericana de Polímeros*. 5(3): 133.
- Ruiz, F. 2006. Nanoparticulas metálicas. *Ciencia y Desarrollo*. CONACYT 5: 4-18.

- Saeed, K.M., R. Heidari and F. Rahmani. 2015. Effect of silver nanoparticles on free amino acids content and antioxidant defense system of tomato plants. *Indian Journal of Plant Physiology* 20(3): 257-263.
- Saharan, V., G. Sharma, M. Yadav, M.K. Choudhary, S.S. Sharma, A.P. Ramesh and P. Biswas. 2015. Synthesis and in vitro antifungal efficacy of Cu-chitosan nanoparticles against pathogenic fungi of tomato. *International Journal of Biological Macromolecules* (75): 346-353.
- Salunkhe, D.K., S.J. Jadhav and M.H. Yu. 1974. Quality and nutritional composition of tomato fruits as influenced by certain biochemical and physiological changes. *Plants Foods Human Nutrition* 1(24): 85-113.
- Sánchez, A., M. Sibaja, J. Vega-Baudrit, M. Rojas. 2007. Utilización de soportes de hidrogel de quitosano obtenidos a partir de desechos del camarón langostino (*pleuroncodes planipes*) para el crecimiento "in vitro" de fibroblastos en humano. *Revista Iberoamericana de Polímeros* 8(5): 347-363.
- Seabra, A.B., M. Rai, N. Duran. 2015. Emerging role of nanocarriers in delivery of nitric oxide for sustainable agriculture. *Nanotechnologies in Food and Agriculture* 183-207.
- Siddiqui, M. H., M. Al-Whaibi, M. Firoz and M. Y. Al-Khashany. 2015. Role of nanoparticles in plants. *Nanotechnology and Plant Sciences* 19-35.
- Sillen, M.A., S. Thijs, G.R. Abbamondi, J. Janssen, N. Weyens, J.C. White, J. Vangronsveld. 2015. Effects of silver nanoparticles on soli microorganisms and maize biomass are linked in the rhizosphere. *Soil Biology Biochemistry* (91): 14-22.

- Solanki, P., A. Bhargava, H. Chhipa, N. Jain, J. Panwar. 2015. Nano-fertilizers and their Smart delivery system. *Nanotechnologies in Food and Agriculture* 81-101.
- Somasundaran, P., X. Fang., S. Ponnurangam and B. Li. 2010. Nanoparticles: Characteristics, Mechanisms and Modulation of Biototoxicity. *KONA Powder and Particle Journal* (28): 38-49.
- Steiner, A.A. 1961. A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. *Plant Soil* 15: 134-154.
- Suriyaprabha, R., G. Karunakaran, R. Yuvakkumar, P. Prabu, V. Rajendran and N. Kannan. 2012. Growth and physiological responses of maize (*Zea mays* L.) to porous silica nanoparticles in soil. *Journal of Nanoparticle Research* 14-1294.
- Tanabe, K. 2007. Optical radiation efficiencies of metal nanoparticles for optoelectronic applications. *Materials Letter* 23(61): 4573-4575.
- Thomas, D.D. 2015. Oxidative Stress. *Encyclopedia of Biophysics* 1813-1818.
- Uhram, C., E. Junio, B. Waldman, J. Roh, Y. Kim, J. Yi and E. Ju Lee. 2013. Functional analyses of nanoparticle toxicity: A comparative study of the effects of TiO₂ and Ag on tomatoes (*Lycopersicon esculentum*) (93): 60-67.
- Vagabov, V.M., A.Y. Ivanov, T.V. Kulakovskaya, E.V. Kulakovskaya, V.V. Petrov, I.S. Kulaev. 2008. Efflux of potassium ions from cells and spheroplasts of *Saccharomyces cerevisiae* yeast treated with silver and copper ions. *Biochemistry* 73(11): 1224–1227.
- Vega, J.R. 2007. La nanotecnología en Costa Rica: la experiencia en el LANOTEC. IX Congreso Nacional de Ciencias. Cartago, Costa Rica 16.

- Velmurugan, P., K. Anbalagan, M. Manosathyadevan, K.J. Lee, M. Cho, S.M. Lee, J.H. Park, S. Gang. 2014. Green synthesis of silver and gold nanoparticles using *Zingiber officinale* root extract and antibacterial activity of silver nanoparticles against food pathogens. *Bioprocess and Biosystems Engineering* 10(37): 1935-1943.
- Vittori, L., S. Carbone, A. Gatti, G. Vianello and P. Nannipieri. 2014. Uptake and Traslocation of metals and nutrients in tomato grown in soil polluted with metal oxide (CeO_2 , Fe_3O_4 , SnO_2 , TiO_2) or metallic (Ag, Co, Ni) engineered nanoparticles 3(22): 1842-1853.
- Wang, Q. 2014. Cronic impact of cerium oxide nanoparticles on *Solanum lycopersicum* L. and *Brassica rapa* L. Environmental engineering. Southern Illinois University Carbondale 242.
- Wang, Q., X. Ma, W. Zhang, H. Pei and Y. Chen. 2012. The impact of cerium oxide nanoparticles on tomato (*Solanum lycopersicum* L.) and its implications for food safety. *Metallomics* 10: 8.
- Zanella, R. 2012. Metodologías para la síntesis de nanoparticulas: Controlando forma y tamaño. *Mundo Nano UNAM* 5(1): 14.