

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO



Respuestas Fisiológicas de Germinación, Vigor y Desarrollo de Plántulas de Tomate (*Lycopersicon esculentum*), Debido a Tratamientos con Nanopartículas de Óxido de Zinc

Por:

DIANER YOVANI VELÁZQUEZ RAMÍREZ

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN

Saltillo, Coahuila, México.

Marzo, 2018

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO

Respuestas Fisiológicas de Germinación, Vigor y Desarrollo de Plántulas de Tomate (*Lycopersicon esculentum*), Debido a Tratamientos con Nanopartículas de Óxido de Zinc

Por:

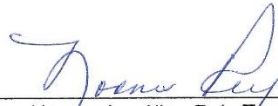
DIANER YOVANI VELÁZQUEZ RAMÍREZ

TESIS

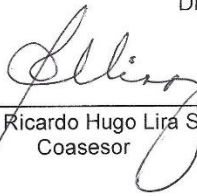
Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN

Aprobada por el Comité de Asesoría:



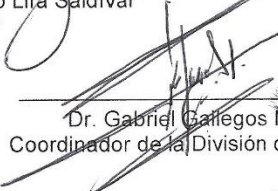
Dra. Norma Angélica Ruiz Torres
Asesora Principal



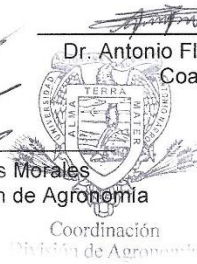
Dr. Ricardo Hugo Lira Saldivar
Coasesor



Dr. Antonio Flores Naveda
Coasesor



Dr. Gabriel Garregos Morales
Coordinador de la División de Agronomía



Coordinación
División de Agronomía

Saltillo, Coahuila, México.

Marzo, 2018

DEDICATORIAS

A Dios

Porque de él, y por él y para él son todas las cosas. Por haberme brindado la vida en este mundo espectacular y por haberme regalado una familia maravillosa, por darme la sabiduría necesaria para cumplir mis metas y sobretodo forjarme la humildad, el amor y el respeto hacia cada una de las personas que me rodean.

A mis padres

Por darme la vida y saberla vivir en este planeta. Este título se lo dedico orgullosamente a ustedes por sus esfuerzos, preocupaciones y sobre todo por su apoyo. Gracias por sus consejos he llegado a realizar una de mis grandes metas, la cual constituye la herencia más valiosa que pudiera recibir, y porque nunca duraron de mí. Además, quiero que sepan y sientan que el objetivo logrado también es de ustedes, ya que sin su aliento y sin su apoyo no lo hubiese logrado. Al ejemplo a seguir, mi padre el, Sr. **Euvinio Isaías Velázquez Morales** que siempre supo sacarnos adelante, muchas gracias papá por darme comida, techo, educación y sobre todas las cosas siempre te amare a pesar de que ya no estas con nosotros; lamentablemente el destino se te nos arrebató muy temprano, una vez dijo que sería alguien en la vida y sabe que su palabra se ha cumplido. A mi mamá la Sra. **Reyna Ramírez Pérez**, la flor de la casa gracias por tus palabras, consejos, enseñanzas, cariño, amor, humildad y educación, sabe es la mejor mamá del mundo y por eso la amo. Gracias a ustedes papás soy Ingeniero Agrónomo en Producción y siempre le pediré a dios que les siga bendiciendo en donde se encuentren.

A mis abuelos

Gracias por su apoyo incondicional a **Cirilo Velázquez Pérez y Felicita Morales Pérez**. Ya que ustedes fueron y son el pilar de mi vida, a mi abuelo ya que él me instruyo y forjo de consejos, conocimientos y sabiduría abuelo usted es “único”.

A mi abuela porque siempre se preocupa por mí y me da sabios consejos en cada momento. Les tengo mucho afecto, cariño y amor.

A mis hermanos

Roseli Velázquez Ramírez, Brendi Velázquez Ramírez Y Osmar Velázquez Santizo. Les agradezco el apoyo que me han brindado, es una bendición tenerlos a mi lado ya que son los mejores, siempre me apoyan en cualquier circunstancia y hallan la forma de resolver esos detalles. Por siempre “Velázquez”.

A mis tíos

Francisco, Abel, Rene, Hugo, Edilio, Benjamín, Pablo, Rosa, Sandra y Dilma. Por ser parte de mi familia y por brindarme su apoyo.

AGRADECIMIENTOS

A mi Alma Mater

Por permitirme en cada una de sus instalaciones y poderme llevar conocimientos únicos de agricultura, por abrirme sus puertas durante el lapso de la carrera para proporcionarme las bases necesarias para que el día de mañana pueda formarme un futuro mejor y ser orgullosamente un profesionista egresado de la Narro. ¡Buitres por siempre!

A la Dra. Norma Angélica Ruiz Torres

Por brindarme sus conocimientos y enseñanzas durante dos semestres de la carrera, así como también sus buenos deseos. Por prestarme su tiempo, dedicación, paciencia y apoyo para la realización de este proyecto de tesis, ya que sin duda alguna es una de las mejores maestras de esta institución.

Al Dr. Ricardo Hugo Lira Saldívar

Por su aportación y participación para la realización de este proyecto de tesis, así como el proyecto 268 de Fronteras de la Ciencia-CONACYT.

Al Dr. Antonio Flores Naveda

Por su apoyo, participación y gran amistad como coasesor.

Al Maestro Josué Israel García López

Por su amistad y apoyo incondicional en los procesos dentro del laboratorio, para poder realizar el experimento.

A mis amigos

La amistad es un tesoro invaluable y los amigos, son aquellas piezas de oro que cualquier buscador de tesoros anhela encontrar, yo me siento profundamente agradecido por todos aquellos amigos que me han acompañado a lo largo de mi

carrera profesional y no solamente en ella sino también en mi vida. Gracias por estar en los mejores y malos momento de vida.

A mis maestros

Por aportarme sus conocimientos en cada una de sus materias. Gracias a todos ustedes pude recopilar información necesaria para llevar al campo laboral y aplicarlo como buen profesionista.

CONTENIDO

| | |
|---|------|
| DEDICATORIAS..... | i |
| AGRADECIMIENTOS | iii |
| ÍNDICE DE CUADROS..... | vi |
| ÍNDICE DE ANEXOS..... | vii |
| RESUMEN..... | viii |
| I. INTRODUCCIÓN | 1 |
| II. HIPÓTESIS | 2 |
| III. OBJETIVOS..... | 2 |
| IV. REVISIÓN DE LITERATURA | 3 |
| 4.1 Las semillas | 3 |
| 4.2 Nanociencia y Nanotecnología | 4 |
| 4.3 Uso y aplicación de la NT en la agricultura | 4 |
| 4.4 Efecto de las NPs en la germinación y vigor de la semilla | 5 |
| 4.5 Nanopartículas de óxido de zinc y su aplicación en la agricultura | 8 |
| V. MATERIALES Y MÉTODOS..... | 11 |
| 5.1 Ubicación del sitio experimental..... | 11 |
| 5.2 Preparación e imbibición de los tratamientos | 11 |
| 5.3 Siembra de semillas | 11 |
| 5.4 Variables evaluadas en las semillas germinadas | 12 |
| VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 14 |
| VII. CONCLUSIONES | 23 |
| VIII. RECOMENDACIÓN..... | 23 |
| IX. BIBLIOGRAFÍA | 24 |
| X. ANEXOS | 31 |

ÍNDICE DE CUADROS

| | |
|---|----|
| Cuadro 1. Tratamientos con NPs de ZnO de tipo comercial y esférica, aplicadas en semillas de tomate en condiciones de laboratorio..... | 12 |
| Cuadro 2. Cuadros medios del análisis de varianza para las variables evaluadas en bioensayo de germinación de semillas de <i>Lycopersicum esculentum</i> tratadas con nanopartículas de ZnO tipo comercial y esféricas..... | 15 |
| Cuadro 3. Comparación de medias por tipo de NPsZnO para variables evaluadas en el laboratorio en bioensayo de germinación de semillas de tomate <i>Lycopersicum esculentum</i> | 18 |
| Cuadro 4. Comparación de medias por concentración de NPsZnO, para variables evaluadas en bioensayo de germinación de semillas de tomate <i>Lycopersicum sculentum</i> | 20 |

ÍNDICE DE ANEXOS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Respuesta del vigor y la germinación a la aplicación de dos tipos de NPsZnO (comerciales y esféricas de síntesis) | 31 |
| Figura 2. Respuesta de las variables longitud de vástago y de radícula a la aplicación de dos tipos de NPs ZnO (comerciales y esféricas de síntesis) | 32 |
| Figura 3. Porcentaje de vigor de germinación por concentración en semillas de tomate, <i>Lycopersicum esculentum</i> tratadas con NPsZnO..... | 32 |
| Figura 4. Longitud media de vástago y de radícula por concentración de nanoparticulas..... | 33 |
| Figura 5. Longitud media de vástago de plántula de tomate obtenidas de semillas tratadas con NPsZnO de tipo comercial y esféricas..... | 33 |
| Figura 6. Longitud media de radícula de plántulas de tomate obtenidas de semillas tratadas con NPsZnO, de tipo comercial y esféricas..... | 34 |

RESUMEN

Respuestas Fisiológicas de Germinación, Vigor y Desarrollo de Plántulas de Tomate (*Lycopersicum esculentum*), Debido a Tratamientos con Nanopartículas de Óxido de Zinc

Hoy en día la agricultura convencional y su mala aplicación está causando serios problemas a los ecosistemas, es por ello que se busca el uso de las nanopartículas (NPs), un tema de suma importancia en el ámbito agrícola, ya que con ello se pretende encontrar materiales y dosis adecuadas para ser utilizadas como fertilizantes, solo que, a escala nano, con ello se pretende conservar el medio ambiente y los agroecosistemas, tratando de apoyar el desarrollo de la agricultura sustentable.

El presente trabajo se llevó a cabo en el Laboratorio de Fisiología y Bioquímica de Semillas del Centro de Capacitación y Desarrollo en Tecnología de semillas de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), con el objetivo de evaluar la efectividad de la aplicación de dos tipos de NPs de óxido de zinc (NPsZnO), esto como una opción para promover el vigor de germinación de semillas y el crecimiento de plántulas de tomate (*Lycopersicum esculentum*).

Se estableció un bioensayo, que constó en dos tipos de NPs (comerciales y esféricas de síntesis) y 6 dosis (0.0, 0.5, 1, 5, 10 y 50 ppm) de NPsZnO. Cada tratamiento consto de seis repeticiones de 25 semillas de cada tipo de NPs. Las semillas fueron colocadas en cajas Petri sobre papel filtro, posteriormente se añadieron 10 ml de cada concentración con NPs ZnO y se les dejó imbibir por 24 horas.

Posterior al tratamiento, las semillas fueron sembradas entre dos capas de papel Anchor con agua destilada, y enrollados en forma de “taco” para ser introducidos a una cámara bioclimática, a una temperatura de 25°C, y un fotoperiodo de 16 horas luz y 8 horas oscuridad. Las variables evaluadas fueron: vigor de

germinación, porcentaje de germinación, plántulas anormales, semillas sin germinar, longitud de vástago y de radícula y peso seco de plántula.

Los resultados obtenidos indican que las NPsZnO de tipo comercial a una concentración de 0.5 ppm, aplicadas durante el periodo de imbibición en semillas de tomate, tiene un efecto positivo en el vigor y en el incremento de la longitud de radícula, y un buen índice de germinación, por lo tanto, con base en este trabajo se puede considerar que las NPsZnO tienen potencial para ser utilizadas como promotoras de crecimiento. Asimismo, a una concentración de 10 ppm se promueve la elongación de vástago con respecto al testigo (0 ppm).

Palabras clave: nanopartículas, óxido de zinc, vigor, germinación, longitud de radícula.

I. INTRODUCCIÓN

La nanociencia (NC) y la nanotecnología (NT) son nuevas fronteras de este siglo, su aplicación en la elaboración de medicamentos y productos farmacéuticos inició años atrás, sin embargo, en la agricultura y sector alimentario es relativamente reciente. La NT da la oportunidad de liberar controladamente productos agroquímicos, utilizar de manera eficiente los nutrientes, y mejorar el desarrollo de la planta; además se puede convertir en una herramienta para el estudio de sistemas biológicos.

Las NPs son entidades muy pequeñas, generalmente de forma esférica, con dimensiones entre 1 y 100 nm, aunque se pueden sintetizar en cualquier forma. La obtención de NPs metálicas estables en solución ha sido un área muy activa de investigación, las más estudiadas son las de metales nobles: oro, plata, platino y paladio. Sin embargo, avances nanotecnológicos recientes sugieren que las NPs de óxido de metal se utilizarán en diversos campos, como en remediación ambiental, biomedicina y en la agricultura.

En el área agrícola, las NPs de óxido de metal tienen el potencial de resolver problemas de nutrición y fitosanitarios, tanto en campo como en invernadero, a un menor costo y con menos aplicaciones, disminuyendo los efectos adversos en el ambiente por el excesivo uso de insumos agrícolas.

Otra posible aplicación de las NPs, es como tratamiento para mejorar la germinación y el desarrollo de plántulas. En este sentido, las NPs se aplican durante la imbibición de la semilla, y estas son absorbidas a través de la testa o el pericarpio y se evalúa su efecto en variables relacionadas con atributos de calidad. En este trabajo, se evaluará el efecto de NPs metálicas comerciales y esféricas de síntesis de NPsZnO, en el proceso de germinación, y su efecto en el crecimiento de plántulas.

II. HIPÓTESIS

La aplicación de NPsZnO durante la etapa de imbibición de semillas, estimula la germinación y el crecimiento temprano de plántulas de *Lycopersicum esculentum*. Por lo tanto, se estimularán los caracteres asociados con el vigor de las semillas.

III. OBJETIVOS

Determinar el efecto de la aplicación de NPsZnO de tipo comercial y de síntesis (esféricas), sobre la germinación y el vigor, en semillas de tomate.

Conocer el efecto de dos tipos de NPsZnO (comercial y esféricas de síntesis), en el desarrollo de plántulas de tomate.

IV. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1 Semillas

Las semillas son las unidades de dispersión y reproducción en las plantas, permanecen inactivas hasta que se presentan las condiciones que le permitan iniciar su actividad y dar nacimiento a una planta joven (Herrera *et al.*, 2006). El mismo autor menciona que la germinación incorpora eventos que se inician con la absorción de agua por la semilla y terminan con la elongación del eje embrionario.

El CIAT (1992) indica que la semilla debe contener atributos claves, los cuales se pueden clasificar en cuatro grupos generales: genéticos, fisiológicos, fitosanitarios, y físicos, con las cuales la semilla debe mantener su pureza varietal y debe dar origen a plantas sanas, vigorosas y productivas. El componente fisiológico se ve afectado por el clima y las condiciones de manejo de la semilla durante la producción, este componente es considerado como el principal responsable de la longevidad de las semillas y del vigor de las plántulas.

CATIE (2000) menciona que el vigor de una semilla es la suma total de aquellas propiedades que determinan el nivel de actividad y desempeño de la semilla o lote de semillas durante la germinación y emergencia de plántulas. Las semillas que se desempeñan bien son catalogadas como de alto vigor y aquellas que se desempeñan en forma pobre son llamadas de bajo vigor.

Por otro lado, Navarro *et al.* (2015) indican que el vigor es la suma de aquellas propiedades que determinan la actividad y el nivel de desempeño de lotes de semillas de aceptable germinación, en un amplio rango de ambientes, y está relacionado con la tasa y uniformidad de la germinación y el crecimiento de plántulas; la habilidad para la emergencia en condiciones ambientales desfavorables y el desempeño de las semillas posterior al almacenamiento, particularmente en la retención de la capacidad germinativa.

En cuanto al vigor de germinación, el CATIE (1996) indica que es el tiempo transcurrido entre el inicio de la germinación y su terminación, puede ser corto o

largo, cuando más corto es este periodo es mayor la energía germinativa y se mide en función del tiempo.

4.2 Nanociencia y Nanotecnología

Mendoza y Rodríguez (2007) indican que la NC y la NT se presentan como un área nueva de investigación en el estudio de los materiales donde convergen diversas ramas del conocimiento que permiten estudiar fenómenos inéditos que ocurren a nivel atómico y molecular. La importancia de la NT radica en que en mundo nanométrico (0-100 nm) los materiales pueden adquirir o realzar propiedades diferentes a las que tienen a escala macroscópica.

Los últimos 20 años, términos como nanotecnología (NT), nanociencia, nanopartículas (NPs), nanomateriales o nanoestructuras, han cobrado gran auge, ya que tienen su fundamento en el estudio de los fenómenos ocurridos a escala nanométrica. Las NPs son de tamaño muy diminuto, el término deriva de la palabra griega *nano*, que quiere decir enano, y partícula parte muy pequeña de un objeto (Serena y Correia, 2003).

Las NPs pueden obtenerse del medio ambiente con sus características naturales o pueden ser generadas de forma sintética a los cuales se les atribuye características especiales. A su vez, los nanomateriales pueden ser subdivididos en nanopartículas, nanocapas y nanocompuestos (Quintili, 2012).

4.3 Uso y aplicación de la NT en la agricultura

Quispe-Challco (2010) menciona que las NPs en el campo de la agronomía, evitarían aplicar grandes cantidades de químicos a un cultivo; además, van dirigidos a las partes donde se requiere. Por otro lado, se cree que las NPs metálicas podrían ser estimulantes para fijar más los nutrientes durante la imbibición de las semillas y por ende obtener plántulas vigorosas, asegurando un alto porcentaje de germinación de las mismas. De igual forma, se pueden usar como biosensores dando un enfoque sobre la detección de plagas y enfermedades a tiempo, evitando daño al cultivo; aquí es donde las NPs pueden brindar mejores condiciones de aprovechamiento de los recursos y al mismo tiempo cuidar al medio ambiente. Por otro lado, se cree que podría traer efectos

negativos hacia la salud del ser humano. Con estos materiales, en un futuro aseguraríamos la actividad agroalimentaria y el medio ambiente.

Lira *et al.* (2014) indican que la agricultura es un área donde las nuevas tecnologías se aplican para mejorar el rendimiento de los cultivos. La nano agricultura implica el empleo de NPs, considerando que estas NPs ofrecerán algunos beneficios para los cultivos. La aparición de nuevos nanodispositivos y nanomateriales abren nuevas aplicaciones potenciales en la agricultura y la biotecnología.

Noormans (2010) dice que la NT puede ser utilizada en la agricultura y producción de alimentos en forma de nanosensores, que pueden ayudar a mejorar la producción y la seguridad alimentaria, y funcionan como dispositivos de control externo que no terminan en el mismo alimento.

Un ejemplo de las posibilidades de las NPs de penetrar las células es el de un nanoplaguicida en proceso de creación conjunta entre institutos de investigación agrícola de México e India que atacaría la película (testa) que recubre la semilla de las malezas. Se impediría la germinación, con lo que se destruiría la semilla matando al embrión, aunque estuviera profundamente enterrada, fuera del alcance del agricultor y de los plaguicidas convencionales, porque las partículas del suelo no podrán impedir la migración descendente de las minúsculas NPs plaguicidas (Molins, 2008).

4.4 Efecto de las NPs en la germinación y vigor de la semilla

Hatami (2017) menciona que los nanomateriales modificados afectan la germinación de las semillas, el crecimiento de las plantas, la estructura celular y la función. Sin embargo, se sabe poco sobre los efectos de los nanomateriales artificiales en las plantas, especialmente las plantas que son cultivos alimentarios y / o industriales. Los impactos de varios materiales de tamaño nanométrico, nanomateriales basados en carbono y NPs de metal u óxido metálico, en la fisiología de la planta son complejos; incluso el mismo tipo de estos materiales puede tener diferentes impactos biológicos en varias especies de plantas. Algunos estudios han encontrado efectos positivos de los nanomateriales en

diferentes especies de plantas; sin embargo, hay información disponible sobre la toxicidad de varios nanomateriales sobre el crecimiento y desarrollo de las plantas, en general se ha descubierto que ambos dependen fuertemente de las especies y de las propiedades de los nanomateriales utilizados.

Ruiz-Torres *et al.* (2017) mencionan que el efecto de las NPs comienza a manifestarse desde la germinación de las semillas, reflejándose en una mayor emergencia y uniformidad, que se observa en la germinación final, debido principalmente a la penetración de nanomateriales en la semilla, que permiten aumentar la imbibición de agua y micronutrientes, acelerando la degradación de reservas, y beneficiando a las primeras etapas del proceso germinativo.

Ruiz-Torres *et al.* (2016) también indican que las plantas sometidas a altas concentraciones de NPs sufren pérdida en la capacidad de la germinación, reducción en la tasa relativa de crecimiento, menor viabilidad del polen, modifica la expresión de genes y altera la generación de especies reactivas de oxígeno, la aplicación de NPs tiene diferentes efectos importantes sobre la planta, la germinación y el crecimiento temprano de la raíz.

Singh *et al.* (2013) realizaron un estudio donde compararon los efectos de partículas de óxido de zinc a granel y nanométrico (NPsZnO), encontraron que las partículas de óxido de zinc aumentaron la germinación, crecimiento de las plántulas, pigmentos, azúcar y proteínas contenidas junto con el incremento de las actividades antioxidantes en los cultivos de repollo, coliflor y tomate.

Sharma *et al.* (2012) mencionan que el peso fresco, la longitud de la raíz y el índice de vigor de las plántulas se ve afectado positivamente por el tratamiento con NPs de plata (NPsAg), donde indujo un aumento del 326% en la longitud de la raíz y un aumento del 133% en el índice de vigor de las plántulas tratadas. Se encontró que los efectos estimulantes observados de las NPs de plata son dependientes de la dosis, siendo el tratamiento de 50 ppm óptimo para provocar la respuesta al crecimiento.

Por otra parte, en un estudio realizado con semillas de cebolla (*Allium cepa*), se encontró que al aplicar NPsZnO en menor concentración, se aumentó la germinación, crecimiento temprano de las plántulas, mejoró la división celular, sin embargo, estas disminuyeron significativamente en concentraciones más altas (Raskar y Laware, 2014).

La aplicación de NPsCu a dosis bajas, promueve el vigor de germinación y el desarrollo del tallo y/o radícula en los cultivos de chile, tomate y pepino, en específico los tratamientos con 5 y 10 ppm. Lo cual se puede llevar a cabo por medio de mayor división y/o elongación celular (Ruiz-Torres *et al.*, 2016).

Arredondo (2016) menciona que, para semillas de tomate y chile ancho, la aplicación de Cu en forma nano o micropartícula (MPs) modifica la germinación y el crecimiento de plántulas, resultando cambios en vigor, longitud de radícula y longitud de plúmula obteniéndose los valores más altos en tratamientos expuestos a NPs de Cu, en especial la aplicación de 5 ppm, la cual obtuvo regularmente las mejores medias en comparación con el control y la aplicación de sulfato de cobre.

En un estudio que se hizo para examinar los efectos de las partículas de óxido de zinc a nanoescala en el crecimiento y desarrollo del cacahuate, se encontró que a una concentración de 1000 ppm promovió tanto la germinación de las semillas como el vigor de las plántulas y, a su vez, mostró un establecimiento temprano en el suelo, manifestado por floración temprana y mayor contenido de clorofila foliar (Prasad *et al.*, 2013).

Li *et al.* (2016) indican que las NPs de óxido de hierro (NPs Fe₂O₃) han surgido como un método innovador y prometedor de su aplicación en los sistemas agrícolas. Sin embargo, la posible toxicidad de las NPs de Fe₂O₃ y su absorción y translocación requieren más estudios antes de la aplicación en el campo a gran escala. Estos investigadores estudiaron la absorción y distribución de NPs Fe₂O₃ en maíz (*Zea mays* L.) y se determinaron sus impactos en la germinación de semillas, en dicho estudio se encontró que a 20 mg/l de NPs Fe₂O₃ promovieron

significativamente el alargamiento de la raíz en un 11.5%, y aumentaron el índice de germinación y el índice de vigor en un 27.2% y 39.6%, respectivamente.

4.5 Nanopartículas de óxido de zinc y su aplicación en la agricultura

El ZnO se produce naturalmente como zincita mineral y se usa principalmente como un polvo blanco. El ZnO es un óxido anfótero casi insoluble en agua y alcohol, pero es soluble en la mayoría de los ácidos, incluido el ácido clorhídrico. El zinc es un micronutriente esencial para el crecimiento y la mejora de las plantas y los seres humanos. Desempeña una posición importante en diversas técnicas metabólicas. Es esencial para activar enzimas como la superóxido dismutasa (Narendhran *et al.*, 2016).

Actualmente las NPsZnO se usan ampliamente para aplicaciones médicas. Las cuales tienen acción desodorizante y antibacteriana, y por esa razón se agregan a diversos materiales, incluidos el tejido de algodón, el caucho y el envasado de alimentos (Zak *et al.*, 2011).

Sidra *et al.* (2014) mencionan que las NPsZnO tienen notables propiedades ópticas, físicas y antimicrobianas y, por lo tanto, tienen un gran potencial para mejorar la agricultura. En cuanto al método de formación, las NPsZnO se pueden sintetizar mediante varios métodos químicos, como el método de precipitación, el transporte de vapor y mediante el proceso hidrotérmico.

Por otra parte, Méndez – Arguello *et al.* (2016) indican que las NPs metálicas de óxido de zinc, cobre y fierro, ya sean puras o mezcladas con plata, están siendo estudiadas globalmente por su potencial agrícola como promotores de crecimiento, nanofertilizantes y antimicrobiales. En este sentido, Raliya *et al.* (2015) mencionan que la concentración de 250 mg/kg de nanopartículas de TiO₂ y ZnO promovieron la altura de la planta, longitud de la raíz y biomasa de tomate.

Tapan *et al.* (2015) informan que las NPsZnO podrían mejorar y mantener el crecimiento de la planta de maíz, parámetros como la altura de la planta, la longitud de la raíz, el volumen de la raíz y el peso de la materia seca mejoraron

gracias a la aplicación de NPsZnO. Estos hallazgos indican que las raíces de las plantas pueden tener el mecanismo único de asimilación de nano-Zn y su crecimiento y desarrollo. También se estudiaron diferentes actividades enzimáticas y los resultados experimentales revelaron que las NPsZnO (<100 nm) también rigen la actividad enzimática en la planta de maíz.

En unas pruebas donde sometieron a estrés plantas de mezquite terciopelo, mostraron que las NPsZnO aumentaron la actividad de catalasa (CAT) en raíces, tallos y hojas, mientras que la actividad de ascorbato peroxidasa (APOX) aumentaba solo en tallos y hojas (Hernández *et al.*, 2011).

Desde otra perspectiva, Lin y Xing (2008) encontraron que las nanopartículas de ZnO se adhieren en gran medida a la superficie de la raíz. En donde se observaron nanopartículas individuales de ZnO presentes en el apoplasto y en el protoplasto de la endodermis y en la estela de la raíz y que las mismas pueden inhibir el crecimiento de rye grass (*Lolium perenne*).

Rodríguez-Fernández (2016) señala que diversas partículas metálicas como el Zn, Cu y Fe, pueden actuar como promotores del crecimiento de las plantas de pimiento. Debido a eso los nanofertilizantes son uno de los productos potenciales para ser una innovación importante para la agricultura; la gran área de superficie de las NPs y pequeño tamaño de los nanomateriales permiten la interacción mejorada y la absorción eficiente de los nutrientes por hojas y raíces para la fertilización de cultivos.

Pandey *et al.* (2010) investigaron el efecto de las NPs de ZnO sobre la germinación de la semilla y el crecimiento de la raíz de *C. arietinum*. También, revisaron el efecto de estas NPs de ZnO sobre la reactividad de las fitohormonas, especialmente el ácido indol acético (AIA), involucrado en las acciones fitoestimulantes. Las NPs de ZnO ricas en zinc aumentaron el nivel de AIA en las raíces (brotes), lo que a su vez indica el aumento en la tasa de crecimiento de las plantas, ya que el zinc es un nutriente esencial. También Mahajan *et al.* 2011, en su estudio demuestran el efecto de las partículas de nano-ZnO en el

crecimiento y desarrollo, donde la mejor respuesta se obtuvo a 20 ppm para el cultivo de frijol, y 1 ppm para garbanzo.

Mendez-Argüello *et al.* (2015) observaron que las plantas de chile expuestas a la aplicación foliar de 50 mg/L de NPsZnO dopadas con plata al 1.25 y 2.5%, presentaron valores superiores en altura (16.8%), área foliar (23.5%) y producción de biomasa total (37.3 %). Observó también un incremento en la longitud radicular del 19.6% en comparación con las plantas de chile no tratadas con NPsZnO. Estos resultados de promoción de crecimiento pueden ser atribuidos al efecto del Zn como precursor en la biosíntesis de auxinas involucradas en la elongación y división celular.

Finalmente, Mamta *et al.* (2011) explican que el destino ambiental y la movilidad de las NPsZnO dependen en gran medida de los cambios de tamaño, forma y química superficial de las partículas. De igual forma Janmohammadi *et al.* (2016) mencionan que depende significativamente de la concentración y el tiempo de aplicación.

De los estudios mencionados anteriormente, se intuye que las NPs tienen definitivamente un uso potencial en la agricultura, sin embargo, hay que realizar más investigación para determinar la respuesta a su aplicación en diferentes cultivos y en diferentes etapas de desarrollo, incluyendo el comportamiento del proceso germinativo posterior a la aplicación a semillas durante la imbibición.

V. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Ubicación del sitio experimental

El presente trabajo se realizó en el Laboratorio de Fisiología del Centro de Capacitación y Desarrollo en Tecnología de Semillas de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), ubicada a 6 km al sur de Saltillo, Coahuila, México. Se utilizaron semillas de tomate (*Lycopersicum esculentum*), para determinar el efecto de la aplicación de NPs en la germinación y vigor de germinación. Se estableció un bioensayo, que constó en dos tipos de NPs (Comerciales y Esféricas de síntesis) con 6 tratamientos y 6 repeticiones de 25 semillas cada uno.

5.2 Preparación e imbibición de los tratamientos

Se utilizaron seis concentraciones (0.0, 0.5, 1, 5, 10 y 50 ppm) y dos tipos de NPsZnO (comercial y esféricas de síntesis). La siembra se realizó de la siguiente manera, en primera instancia se contaron las semillas (25 por repetición) y se sembraron en cajas Petri, que contenían una capa de papel filtro, las cuales se marcaron del 1 al 12, donde del 1 al 6 correspondieron a las NPs de tipo comercial y del 7 al 12 a las de tipo esféricas. Una vez distribuidas las semillas, se dejaron imbibir por 24 horas con soluciones que contenían las NPsZNO, en una cámara de crecimiento marca Thermo Scientific, a una temperatura de 25°C y un fotoperiodo de 16 horas luz y 8 horas oscuridad.

5.3 Siembra de semillas

Al siguiente día, se procedió a sembrar las semillas en papel Anchor. Inicialmente se desinfecto el área de siembra con alcohol, al igual que los materiales a utilizar; el papel se humedeció con agua destilada contenida en una charola de plástico. En la tercera parte superior del papel se distribuyeron las semillas con el embrión hacia abajo, posteriormente se procedió a enrollar el papel Anchor en forma de “taco”, luego se marcó cada taco con lápiz tinta y se pusieron en bolsas de plástico. Las bolsas se acomodaron en una charola tipo canasta de plástico. Posteriormente, las canastas se llevaron a la cámara de

crecimiento marca Thermo Scientific, a una temperatura de 25 °C. Los cuidados subsecuentes fueron revisar la humedad de los tacos y aplicar agua, cuidando de no mover las semillas.

Cuadro 1. Tratamientos con NPs ZnO de tipo comercial y esférica de síntesis, aplicadas en semillas de tomate en condiciones de laboratorio.

| Concentraciones NPs ZnO | Concentración (ppm*) |
|------------------------------------|---------------------------------|
| Tipo comercial | 0 |
| | 0.5 |
| | 1 |
| | 5 |
| | 10 |
| | 50 |
| Tipo esférica de síntesis | 0 |
| | 0.5 |
| | 1 |
| | 5 |
| | 10 |
| | 50 |

*ppm = partes por millón; NPs = nanopartículas.

5.4 Variables evaluadas en las semillas germinadas

Vigor de germinación: es el primer conteo de plántulas normales, se realizó 5 días después de la siembra y se expresó en porciento, esta evaluación es un indicador del vigor que posee la semilla para germinar en menor tiempo y establecerse en condiciones de campo. Se entiende por plántulas normales aquellas que presentan el potencial para continuar desarrollándose en plantas completas, esto es, con todas sus estructuras, cuando crecen bajo condiciones favorables de humedad, temperatura y luz. El porciento de vigor se determinó de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Vigor} = \frac{\text{Número de semillas normales}}{\text{Total de semillas sembradas}} \times 100$$

Porcentaje de germinación: correspondió al segundo conteo al catorceavo día; al final del bioensayo se realizó un conteo de plántulas normales, considerando aquellas que constan de todas las estructuras bien desarrolladas y se expresó en porciento.

$$\% \text{ Germinación} = \frac{\text{Número de plántulas normales}}{\text{Total de semillas sembradas}} \times 100$$

Plántulas anormales: Son aquellas que no muestran potencial de desarrollo y que presentan deformaciones en el tallo o radícula.

Semillas sin germinar: Se consideran semillas sin germinar aquellas aparentemente viables que no lograron el desarrollo de sus estructuras.

Longitud media de vástago (LV) y longitud media de radícula (LR). Se midieron todas las plántulas normales, esto es, que no presentaron rasgo alguno de anormalidad y se expresó en cm.

Peso seco de plántula (PS). Se tomaron las plántulas normales de tres repeticiones por cada tratamiento y se colocaron en bolsas de papel de estraza, previamente identificadas, estas se introdujeron en una estufa de secado marca Riossa modelo H-48, a una temperatura de 72 °C por un período de 24 horas. Posteriormente se pesaron y se expresó en mg plántula⁻¹.

Los resultados fueron sometidos a un análisis de varianza para determinar diferencias estadísticas entre tratamientos (NPs y MPs), y entre concentraciones, posteriormente se realizó una comparación de medias con la Prueba de Tukey ($P \leq 0.05$), para establecer el orden de eficiencia de tratamientos (0, 5 y 10 ppm) utilizando el Paquete Estadístico SAS 9.1 (2004).

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Acorde a los resultados obtenidos en el análisis de varianza (Cuadro 2) del bioensayo de semillas de *Lycopersicum esculentum* expuestas a dos tipos de NPs a diferentes concentraciones, se encontró, diferencias altamente significativas ($P \leq 0.01$) en la fuente de variación tipo de nanopartícula para las variables porcentaje de vigor de germinación, porcentaje de semillas sin germinar y longitud de radícula; mientras que para la variable porcentaje de germinación se encontraron diferencias significativas ($P \leq 0.05$). Lo anterior indica que la forma de las NPs afecta la respuesta de estas variables, generando diferencias en el vigor de las semillas.

Por otra parte, para la fuente de variación concentración de NPs (0, 0.5, 1, 5, 10, 50 ppm) se encontraron diferencias ($P \leq 0.01$) para las variables porcentaje de vigor de germinación, porcentaje de plántulas anormales, longitud de plúmula y longitud de radícula, mostrando diferencias en respuesta al tipo de NPs.

En cuanto a la interacción tipo de NPs x concentración, se detectaron diferencias ($P \leq 0.01$) para las variables longitud de vástago y longitud de radícula. Cabe señalar que lo anterior muestra claramente que el tipo de NPs y la concentración, afectó la respuesta fisiológica de algunas de las variables en estudio.

Lo anterior indica que la aplicación de NPs metálicas influye en el comportamiento de algunas de las variables analizadas en este bioensayo, las cuales tienen una relación con los procesos de imbibición, metabolismo, así como crecimiento del vástago.

Sedghi *et al.* (2013) trabajando con soya bajo estrés de sequía, también encontraron efecto de diferentes concentraciones de nano-ZnO, sobre la tasa de germinación, el porcentaje de germinación y la longitud de la raíz fue estadísticamente significativos.

Cuadro 2. Cuadrados medios del análisis de varianza para las variables evaluadas en bioensayo de germinación de semillas de *Lycopersicum esculentum* tratadas con nanopartículas de ZnO tipo comercial y esféricas.

| FV | GL | VIGOR (%) | GERMINACIÓN (%) | PA (%) | SSG (%) | PS (mg/plántula) | GL | LP (cm) | LR (cm) |
|------------------|----|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------|--------------------|---------|
| Partícula | 1 | 1568.00** | 338.00* | 26.88 _{NS} | 162.00** | 0.016 _{NS} | 1 | 7.99 _{NS} | 46.82** |
| Concentración | 5 | 766.40** | 98.53 _{NS} | 84.13** | 2.35 _{NS} | 1.150 _{NS} | 5 | 10.82** | 35.50** |
| Partícula * Conc | 5 | 73.60 _{NS} | 67.60 _{NS} | 26.88 _{NS} | 12.66 _{NS} | 2.309 _{NS} | 5 | 35.57** | 37.13** |
| Error | 60 | 119.73 | 51.95 | 22.80 | 21.11 | 1.722 | 1601 | 2.50 | 5.81 |
| C.V. % | | 13.85 | 7.99 | 98.79 | 90.88 | 13.098 | | 23.48 | 31.30 |

*, ** = Niveles de significancia al 0.05 y 0.01 de probabilidad, respectivamente; NS= no significativo; FV= fuente de variación; CV= coeficiente de variación; GL= grados de libertad; Vigor = plántulas normales al primer conteo, vigor de germinación; Germinación = plántulas normales al segundo conteo; PA= plántulas anormales; SSG= semillas sin germinar; PS = peso seco de plántula; LP= longitud de plúmula; LR= longitud de radícula.

La comparación de medias por tipo de NPs (Cuadro 3) para las variables porcentaje de vigor de germinación y porcentaje de germinación, muestra que las NPs de tipo comercial superaron a las NPs esféricas de síntesis en 13.51 % y 4.54 %, respectivamente (Figura 1 del Anexo). Con relación a lo anterior, Manfrini (2004) indica que el vigor de la semilla no es solo una propiedad medible, sino que es un concepto que describe diversas características que determinan su nivel de actividad y el comportamiento en un amplio rango de ambientes. Por otra parte, Moreno (1984) menciona que el vigor de las semillas es la suma total de aquellas propiedades de la semilla que determinan su nivel de actividad y comportamiento durante su germinación y emergencia de la plántula.

La variable longitud de radícula (Cuadro 3) también mostró mayor crecimiento con la aplicación de NPsZnO de tipo comercial (7.87 cm) (Figura 2 del Anexo), superando estadísticamente a las NPsZnO de síntesis que obtuvieron 7.53 cm. Estos resultados coinciden con Siddiqui *et al.* (2015) quienes señalan que las NPsZnO aumentan el crecimiento y desarrollo de las plantas. Sin embargo, el efecto de las NPs en la germinación depende de las concentraciones de NPs y varía entre especies de plantas. Asimismo, Raskar and Laware (2014) trabajaron en otro cultivo e indican que la germinación de las semillas de cebolla y el crecimiento de plántulas aumenta con la aplicación de concentraciones bajas de NPs de ZnO, lo que indica que no se inhibe la división celular y el crecimiento temprano de plántulas. También Martínez (2015), encontró que la aplicación de NPs de óxido de zinc a concentraciones bajas influyen en el crecimiento y desarrollo de la planta de maíz en cuanto a peso y longitud de raíz.

Otros estudios coinciden con los resultados obtenidos en este trabajo, por ejemplo, Das *et al.* (2015) indican que en semillas de tomate tratadas con NPs de ZnO en concentraciones de 0, 2, 4, 8, 10 y 14 ppm, se encontró que, en comparación con el control, la aplicación de estas NPs mejoró de forma significativa la germinación de semillas y el crecimiento de plántulas. De la misma forma Ponce (2016), en su estudio encontró efectos similares en semillas de *L. esculentum* tratadas con NPs de ZnO, en el cual a una concentración de 5 mg L⁻¹

¹ tuvo el potencial para ser utilizadas como promotoras de crecimiento, puesto que mejoran características de las plántulas como elongación de plúmula y radícula, además de promover la germinación. También Mankad *et al.* (2017) reportan que semillas de arroz tratadas con diferentes concentraciones de partículas nano y a granel (0, 100, 200 y 400 ppm), mostraron mejor comportamiento de parámetros morfo-fisiológicos, tales como longitud de brotes y raíces, peso fresco y seco, con los tratamientos de NPs a menor concentración.

En los trabajos citados anteriormente, las NPsZnO pudieran estar actuando como nanofertilizante, al estar relacionado con la actividad que tiene en la síntesis de triptófano, el cual es precursor en la producción de auxinas fitoreguladoras del crecimiento, promoviendo elongación y división celular. A partir de la presente investigación, se puede decir que la nanopartícula tiene un inmenso potencial para su utilización como nanofertilizante, si se aplica a un nivel óptimo de concentración.

Es importante explicar que las variables que resultaron estadísticamente significativas en este estudio, están íntimamente relacionadas con el vigor de la semilla; este atributo es definido también como "la propiedad que determina el potencial para una emergencia rápida y uniforme y un desenvolvimiento normal de las plántulas bajo un amplio rango de condiciones de campo". En algunos lotes de semillas, la pérdida de vigor está relacionada con una reducción en la habilidad de la semilla para llevar a cabo sus funciones fisiológicas.

El vigor de las semillas ha sido por mucho tiempo tema de interés entre los productores y usuarios de las semillas agrícolas, ya que, si bien la calidad de las semillas está determinada principalmente por la germinación y el establecimiento de las plántulas en el campo, estas dependen en gran medida del vigor de la semilla. De ahí el interés de evaluar y conocer este parámetro como respuesta a la aplicación de NPsZnO a semillas durante la imbibición, ya que es un indicador de la velocidad con que estas germinan.

Cuadro 3. Comparación de medias por tipo de NPsZnO para variables evaluadas en el laboratorio en bioensayo de germinación de semillas de tomate *Lycopersicum esculentum*.

| TIPO DE PARTÍCULA | VIGOR (%) | GERMINACIÓN (%) | PA (%) | SSG (%) | PS (mg/plántula) | LV (cm) | LR (cm) |
|-------------------|-----------|-----------------|--------|---------|------------------|---------|---------|
| Comercial | 84 a | 92 a | 4 a | 4 b | 9.99 a | 6.80 a | 7.87 a |
| Esféricas | 74 b | 88 b | 5 a | 7 a | 10.04 a | 6.67 a | 7.53 b |
| Media | 79 | 90 | 5 | 5 | 10.01 | 6.74 | 7.70 |
| Tukey | 5.15 | 3.39 | 2.25 | 2.16 | 0.90 | 0.15 | 0.23 |

Valores con la misma letra dentro de cada columna son estadísticamente iguales (Tukey, $\alpha = 0.05$); Vigor= plántulas normales al primer conteo; Germinación = plántulas normales al segundo conteo; PA= plántulas anormales; SSG= semillas sin germinar; PS = peso seco de plántula; LV= longitud de vástago; LR= longitud de radícula.

Al comparar las medias por concentración de NPs (Cuadro 4), para las variables estudiadas, se encontró que la aplicación de NPsZnO modificó la expresión de las variables porcentaje de vigor de germinación (figura 3 del Anexo), porcentaje de plántulas anormales, longitud de radícula y longitud de vástago, existiendo diferencias estadísticas (Tukey, $\alpha = 0.05$). Se observó que tratar la semilla con NPsZnO a 0.5 ppm tiene un efecto positivo en el crecimiento del vástago (6.88 cm) (figura 4 del Anexo), en comparación al testigo que obtuvo 6.40 cm, indicando mayor elongación celular, sin presentar diferencias en peso seco de plántula (cuadro 4). Desde el punto de vista bioquímico, el vigor involucra la capacidad que tiene un organismo para la biosíntesis de energía y compuestos metabólicos, como proteínas, ácidos nucleicos, carbohidratos y lípidos. Todo ello asociado a la actividad celular, la integridad de las membranas celulares y el transporte o utilización de sustancias de reserva. El crecimiento del vástago es una variable asociada al vigor y uniformidad de germinación.

De acuerdo a los resultados en este estudio, para obtener un mayor vigor de plántula se recomienda aplicar 0.5 ppm de las NPsZnO de origen comercial, reflejando también en un mayor crecimiento de radícula, esto con respecto al resto de los tratamientos, factor importante en el establecimiento de las plantas en condiciones de campo. Sin embargo, la aplicación de 10 ppm también promueve la elongación de vástago (6.98 cm) al compararlo con el testigo (6.40 cm), pero se reduce el porcentaje de germinación, con respecto al testigo, de 88 a 80 %. La manifestación del vigor de germinación se muestra con rapidez, uniformidad e intensidad, al igual que la tolerancia de las plántulas a las condiciones ambientales desfavorables.

Cuadro 4. Comparación de medias por concentración de NPsZnO, para variables evaluadas en bioensayo de germinación de semillas de tomate *Lycopersicon esculentum*.

| CONCENTRACIÓN (ppm) | VIGOR (%) | GERMINACIÓN (%) | PA (%) | SSG (%) | PS (mg/plántula) | LV (cm) | LR (cm) |
|------------------------|--------------|--------------------|-----------|------------|---------------------|------------|------------|
| 0 | 88 a | 94 a | 1 b | 5 | 10.22 a | 6.40 b | 8.05 a |
| 0.5 | 87 a | 90 a | 5 ab | 5 | 10.66 a | 6.88 a | 8.05 a |
| 1 | 78 ab | 91 a | 5 ab | 4 | 9.72 a | 6.82 a | 7.81 ab |
| 5 | 66 b | 86 a | 9 a | 5 | 9.71 a | 6.65 ab | 7.13 c |
| 10 | 80 a | 88 a | 7 ab | 5 | 10.27 a | 6.98 a | 7.41 bc |
| 50 | 77 ab | 91 a | 4 ab | 5 | 9.51 a | 6.73 ab | 7.72 ab |
| MEDIA | 79 | 90 | 5 | 5 | 10.01 | 6.74 | 7.7 |
| TUKEY | 13.15 | 8.66 | 5.73 | 5.52 | 2.34 | 0.38 | 0.59 |

Valores con la misma letra dentro de cada columna son estadísticamente iguales (Tukey, $\alpha = 0.05$); ppm = partes por millón; Vigor= plántulas normales al primer conteo; Germinación = plántulas normales al segundo conteo; PA= plántulas anormales; SSG= semillas sin germinar; PS = peso seco de plántula; LV= longitud de vástago; LR= longitud de radícula.

Por otra parte, al revisar las Figuras en el anexo de la interacción entre factores (Tipo de NPsZnO y concentración), se observó que mayor longitud de vástago se obtiene al imbibir las semillas en suspensión con NPsZnO comerciales a 10 ppm (Figura 5 del Anexo). Por otra parte, para la variable longitud de la radícula la interacción de los 2 factores en estudio, promueve en mayor medida al imbibir con NPsZnO comerciales a 1.0 ppm. Ambas variables, relacionadas al vigor de la plántula durante la germinación (Figura 6 del Anexo).

El vigor de un lote de semillas es el resultado de la interacción de toda una serie de características de las semillas como son: constitución genética, condiciones ambientales y nutricionales a que ha estado sometida la planta madre durante el periodo de formación, grado de madurez, tamaño, peso y densidad, integridad mecánica, grado de deterioro, envejecimiento y contaminación por organismos patógenos.

Evaluar el vigor de las semillas es de gran valor para predecir el comportamiento de un lote de semillas cuando las condiciones del medio ambiente no son del todo favorables para la germinación y emergencia de las plántulas. Igualmente es de valor para comparar el potencial biológico de lotes de semillas con porcentajes de germinación similares y también para tomar decisiones sobre el tiempo de almacenamiento al que pueden ser sometidas las semillas, ya que se ha visto que el vigor y la longevidad están altamente correlacionados (Moreno, 1984).

No cabe duda que la tecnología avanza día con día, buscando alternativas para mejorar la rentabilidad sobre la producción de alimentos, un sector vital para la humanidad; ya que las NPs surgen por la necesidad de evitar contaminación y degradación de los recursos naturales, tal es el caso para su uso como biofertilizante, biopesticida y biorremediación de áreas naturales. Se dice que esta tecnología es el futuro de la agricultura. Para el caso de biofertilizante, hay estudios que sugieren su aplicación, ya que se promueve vigor y la germinación de semillas, durante la fase de imbibición, manifestándose en plántulas

vigorosas, normales en un corto lapso de tiempo. Por otro lado, no se sabe con exactitud de causas secundarias sobre el consumidor del producto.

Salinas *et al.* (2001) indica que el primer componente de la calidad que muestra señales de deterioro es el vigor de las semillas, seguido por una reducción en la germinación o de la producción de plántulas normales, y finalmente la muerte de las semillas. El vigor de las semillas se basa en el comportamiento físico o fisiológico de un lote de semillas, incluyéndose: 1) cambios en los procesos bioquímicos; 2) la tasa y uniformidad de germinación y crecimiento de las plántulas y 3) la germinación o capacidad de emergencia de las semillas al ser expuestas a condiciones de estrés.

Dado que un lote de semillas de alto vigor producirá más plántulas normales y con tasas elevadas de crecimiento, los ensayos que se utilizan para evaluar el vigor de las semillas consideran el número y las características de las plántulas obtenidas, como son su apariencia, malformaciones y velocidad de crecimiento.

En esta investigación, se utilizó semilla de alta calidad fisiológica, ya que el testigo obtuvo 94 % de germinación y 88 % de vigor, pero, aun así, se observó que las NPsZnO de origen comercial aplicadas a la semilla durante la imbibición (0.5 ppm), tuvieron la capacidad de incrementar la longitud de vástago, sin modificar otros parámetros.

VII. CONCLUSIONES

En este trabajo se observaron los efectos de dos tipos NPsZnO (comercial y esféricas) a diferentes concentraciones en pruebas de germinación de semillas y crecimiento de plántulas de *Lycopersicon esculentum*.

La aplicación de NPsZnO de origen comercial en concentración de 0.5 ppm, durante el periodo de imbibición en semillas de tomate, tiene un efecto positivo en el vigor de la plántula, tanto en el desarrollo del vástago como de la radícula. Por lo tanto, tienen potencial para ser utilizadas como promotoras de crecimiento. Así mismo a una concentración de 10 ppm promueve la elongación del vástago, con respecto al testigo.

Las NPsZnO pueden ser empleados en programas de agricultura sustentable, siempre y cuando se empleen en bajas concentraciones, ya que muchos estudios así lo mencionan, porque se dice que en altas cantidades pueden ser causa de severa toxicidad a las plantas, además estas NPs demuestran ser amigables con los agroecosistemas.

El zinc es un micronutriente esencial para el desarrollo de las plantas y su deficiencia reduce tanto el rendimiento como el valor nutricional de los cultivos. El empleo de ZnO en forma de nanopartículas pretende contribuir a dar solución a la alta demanda de alimentos que se está produciendo debido al alto crecimiento de la población mundial.

VIII. RECOMENDACIÓN

Se recomienda dar seguimiento a la aplicación de NPs metálicas en semillas de diferentes cultivos, para analizar la respuesta y así determinar las concentraciones óptimas requeridas para incrementar el desarrollo de plántulas y el establecimiento de las mismas.

IX. BIBLIOGRAFÍA

- Arredondo Quijada, J. A. 2016. Nanopartículas de cobre como promotores de germinación de semillas y crecimiento de plántulas de *Capsicum annum* y *Lycopersicum esculentum*. Tesis de Licenciatura. Ingeniero Agrícola y Ambiental. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, México. 69 pp.
- CATIE. 1996. Mejoramiento genético, selección y manejo de fuentes semilleras y de semillas forestales. Curso para profesores. Turrialba, Costa Rica. 11 p.
- CATIE. 2000. Técnicas para la germinación de semillas forestales. Serie técnica. Manuel técnico No. 39. Turrialba, Costa Rica. 4 p.
- CIAT. 1992. Tecnologías de poscosecha para pequeñas empresas de semillas: Demostración con frijol. Documento de trabajo No. 115. 3 p.
- Das, B., K. Debnath., K.K. Sarkar., B. Priya., and S. Mukherjee. 2015. Effect of different nanoparticles on germination and seedling growth in tomato. Research on crops. Vol.16. Issue 3. pp. 542-550.
- Hatami, M. 2017. Stimulatory and inhibitory effects of nanoparticles on seed germination and seedling vigor indices. Nanoscience and plant soli systems. Vol 48. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46835-8_13.
- Hernández Viescaz, J.A., H. Castillo-Michel, A.D. Servin, J.R. Peralta-Videa, J.L. Gardea-Torresdey. 2011. Spectroscopic verification of zinc absorption and distribution in the desert plant *Prosopis juliflora-velutina* (velvet mesquite) treated with ZnO nanoparticles. In Chemical Engineering Journal, Volume

170, Issues 2–3, P 346, ISSN 1385-8947,
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.12.021>.

Herrera Jorge., R. Alizaga., E. Guevara y V. Jiménez. 2006. Germinación y crecimiento de la planta. Editorial UCR. Vol. 4. San José, Costa Rica. 5 p.,18 p.

Janmohammadi M., T. Amanzadeh., N. Sabaghnia., and S. Dashti. 2016. Impact of foliar application of nano micronutrient fertilizers and titanium dioxide nanoparticles on the growth and yield components of barley under supplemental irrigation. *Acta agriculturae Slovenica*. p 265. DOI: 10.14720/aas.2016.107.2.01.

Li, J., J. Hu., C. Ma., Y. Wang., C. Wu., J. Huang and B. Xing. 2016. Uptake, translocation and physiological effects of magnetic iron oxide (γ Fe₂O₃) nanoparticles in corn (*Zea mays* L.). *Chemosphere*. Volume 159. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.05.083>.

Lin D. and B. Xing. 2008. Root Uptake and Phytotoxicity of ZnO Nanoparticles. *Environmental Science & Technology* 42 (15), 5580-5585. DOI: 10.1021/es800422x.

Lira Saldivar, R.H., Hernández Suárez, M., Corrales Flores, J. CIQA. 2014. Nanotecnología en agricultura sustentable. pp. 9-10.

Mahajan, P., S.K. Dhoke., A.S. Khanna and J.C. Tarafdar. 2011. Effect of nano-zno on growth of mung bean (*Vigna radiata*) and chickpea (*Cicer arietinum*) seedlings using plant agar method. *Applied Biological Research* 13 (2): 54-61.

Mamta, K., S. S. Khan, S. Pakrashi, A. Mukherjee, and N. Chandrasekaran. 2011. Cytogenetic and genotoxic effects of zinc oxide nanoparticles on root cells of *Allium cepa*. *Journal of Hazardous Materials*, Volume 190, p. 613 ISSN 0304-3894, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.03.095>.

- Manfrini, D. 2004. Aspectos a tener en cuenta “análisis de vigor en semillas”. Instituto Nacional de Semillas. Revista del plan agropecuario. https://www.planagropecuario.org.uy/publicaciones/revista/R111/R111_56.pdf.
- Mankad, M., R. Singh., A. Patel., P. Mankad., G. Patil and N. Subhash. 2017. Physiological and Biochemical Effects of Zinc Oxide Nanoparticles on Rice (*Oryza sativa* L.). *Advances in Bioresearch*. Vol 8 (6): 208-217.
- Martínez - Rodríguez, L. A. 2015. Micromorfología de tallo y raíz de plantas de maíz y frijol tratadas con nanopartículas de titanio, hierro y zinc, bajo invernadero. Tesis de Licenciatura. Ingeniero en Agrobiología. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, México. 74 pp.
- Méndez-Argüello, B., I. Vera-Reyes., E. Mendoza-Mendoza., L.A. García-Cerda., B. A. Puente Urbina., R. H. Lira Saldívar. 2016. Promoción del crecimiento en plantas de *Capsicum annuum* por nanopartículas de óxido de zinc. *Nova Scientia*, vol. 8, núm. 17, pp. 140-141.
- Méndez-Argüello, B., R. H. Lira-Saldívar., N. A. Ruíz -Torres., A. Cárdenas - Flores., R. Ponce - Zambrano., I. Vera - Reyes., E. Mendoza - Mendoza., L. A. García - Cerda., G. De los Santos. 2015. Influencia de Nanopartículas de Óxido de Zinc Puras y Dopadas con Plata en el Crecimiento y Producción de Biomasa en Plántulas de Chile. XVI Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería. <https://smbb.mx/congresos%20smbb/guadalajara15/PDF/XVI/trabajos/II/IIO22.pdf>.
- Mendoza Uribe, G. y J. L. Rodríguez López. 2007. La nanociencia y la nanotecnología. Una revolución en curso, vol.15, n.29. p.161.
- Molins, R. 2008. Oportunidades y amenazas de la nanotecnología para la salud, los alimentos, la agricultura y el ambiente. IICA. Año 4. pp. 38-39, 41.

- Moreno, M. E. 1984. Análisis físico y biológico de semillas agrícolas. Primera edición. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria, México D.F. pp. 222 - 223.
- Narendhran, S., P. Rajiv, R. Sivaraj. 2016. Influence of zinc oxide nanoparticles on growth of *Sesamum indicum L.* In zinc deficient soil. International journal of pharmacy and pharmaceutical sciences. Vol 8. Issue 3.
- Navarro M., G. Febles and R. S. Herrera. 2015. Vigor: essential element for seed quality. Cuban Journal of Agriculture Science. Volume 49, number 4. 448 p.
- Noormans, A. G. 2010. Impacto de la nanotecnología en la producción de alimentos. Lampasakos, ISSN: 2145-4086, No. 4. 30.
- Pandey, A. C., S. S. Sanjay., R. S. Yadav. 2010. Application of ZnO nanoparticles in influencing the growth rate of *Cicer arietinum*. Journal of Experimental Nanoscience. 5:6, 488-497, DOI: 10.1080/17458081003649648.
- Ponce, Z. R. 2016. Promoción de la germinación en semillas y crecimiento de plantas de *Lycopersicum esculentum* por nanopartículas de óxido de zinc. Tesis de Licenciatura. Ingeniero en Agrobiología. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, México. 49 pp.
- Prasad, T. N., P. Sudhakar, Y. Sreenivasulu, P. Latha, V. Munaswamy, K. Reddy, T.S. Sreeprasad, P.R. Sajanlal, and T. Pradeep. 2013. Effect of nanoscale zinc oxide particles on the germination, growth and yield of peanut. Journal of Plant Nutrition. Volume 35 p. 905.
- Quintili, M. 2012. Nanociencia y Nanotecnología. Un mundo pequeño. Cuad. Cent. Estud. Diseño Comun., Ens. [online], n.42 [citado 2017-11-27], pp. 125-155.
- Quispe-Challco, C.R. 2010. Nanotecnología en la agricultura. Revista de información, tecnología y sociedad n.5. Disponible en

:<http://www.revistasbolivianas.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1997-40442010000200020&lng=es&nrm=iso>. ISSN 1997-4044.

- Raliya, R., R. Nair., S. Chavalmane., W. N. Wang and P. Biswas. 2015. Mechanistic evaluation of translocation and physiological impact of titanium dioxide and zinc oxide nanoparticles on the tomato (*Solanum lycopersicum* L.) plant. Journal metallomics. Issue 12. DOI: 10.1039/C5MT00168D.
- Raskar, S.V. and S. L. Laware. 2014. Effect of zinc oxide nanoparticles on cytology and seed germination in onion. International Journal of Current Microbiology and Applied Science. ISSN: 2319-7706 volume 3 number 2 pp, 467-473.
- Rodríguez-Fernández, O. 2016. Desarrollo de la investigación sobre nanotecnología en el centro de investigación en química aplicada (CIQA-CONACYT). In R.H. Lira Saldívar, & B. Méndez Argüello, Agronano tecnología nueva frontera de la revolución verde. Saltillo, Coahuila, México. pp. 24-25.
- Ruiz-Torres, N. A., García López, J.I., Lira Saldívar, R. H., Vera Reyes, I., Méndez Argüello, B. 2016. Efecto de nanopartículas metálicas y derivadas del carbón en la fisiología de semillas. In R.H. Lira Saldívar, & B. Méndez Argüello, Agronano tecnología nueva frontera de la revolución verde. Saltillo, Coahuila, México. pp 75-114.
- Ruiz-Torres, N.A., L.I. Cruz Ruiz, R.H. Lira-Saldívar, J.I. García López, I. Vera Reyes. 2017. Respuesta a la aplicación de nanopartículas de óxido de zinc y fierro, en el proceso germinativo de semillas de calabaza (*Cucurbita pepo*). In R.H. Lira Saldívar., B. Méndez Argüello & I. Vera Reyes. AgroBio Nanotecnología: Nuevo Paradigma Científico en la Producción de Alimentos. Saltillo, Coahuila, México. pp 10-24.
- Salinas, A. R., A. M. Yoldjian., R. M. Craviotto y V. Bisaro. 2001. Pruebas de vigor y calidad fisiológica de semillas de soja. Pesq. agropec. bras., Brasília, v. 36, n. 2, p. 372-373.

- SAS Institute. 2004. SAS/STAT ® 9.1 User's Guide. Cary, NC: SAS Institute Inc. USA. 1521 p.
- Sedghi, M., M. Hadi., and S.G. Toluie. 2013. Effect of nano zinc oxide on the germination parameters of soybean seeds under drought stress. *Annals de West University of Timisoara: Series of Biology*, Volume 16, Number 2, pp. 73-78 (6).
- Serena, P.A. y A. Correia. 2003. Nanotecnología: el motor de la próxima revolución tecnológica. *Apuntes de ciencia y tecnología*, N° 9. pp. 32-42.
- Sharma, P., D. Bhatt., M. Zaidi., P. Pardha., P. Kumar., and S. Arora. 2012. Silver nanoparticle mediated enhancement in growth and antioxidant status of *Brassica juncea*. *Applied biochemistry and biotechnology*. 167(8):2225-33. DOI: 10.1007/s12010-012-9759-8.
- Siddiqui. M. H., M.H. Al-Whaibi., M. Firoz and M.Y. Al-Khaishany. 2015. Role of Nanoparticles in Plants. *Nanotechnology and plant sciences* p. 25. DOI 10.1007/978-3-319-14502-0_2.
- Sidra S., M. Arshad, and S. Khalil. 2014. "Zinc oxide nanoparticles for revolutionizing agriculture: Synthesis and Applications," *The Scientific World Journal*, vol. 2014, Article ID 925494, 8 pages. doi:10.1155/2014/925494.
- Singh, N. B., A. Nimisha, Y. Kavita, S. Deepti, P. Jitendra, S. Subhash. 2013. Zinc oxide nanoparticles as fertilizer for the germination, growth and metabolism of vegetable crops. *Journal of Nanoengineering and Nanomanufacturing*. Volume 3. Number 4. 353 - 354. Doi: 10.1166/jnan.2013.1156.
- Tapan A., S. Kundu, A.K. Biswas, J.C. Tarafdar and A.S. Rao. 2015. Characterization of zinc oxide nano particles and their effect on growth of maize (*Zea mays L.*) plant. *Journal of Plant Nutrition* vol. 38, Issue 10. <https://doi.org/10.1080/01904167.2014.992536>.

Zak, A. K., R. Razali., W. A. Majid., M. Darroudi M. 2011. Synthesis and characterization of a narrow size distribution of zinc oxide nanoparticles. International Journal of Nanomedicine: 6:1399-1403. doi:10.2147/IJN.S19693.

X. ANEXOS

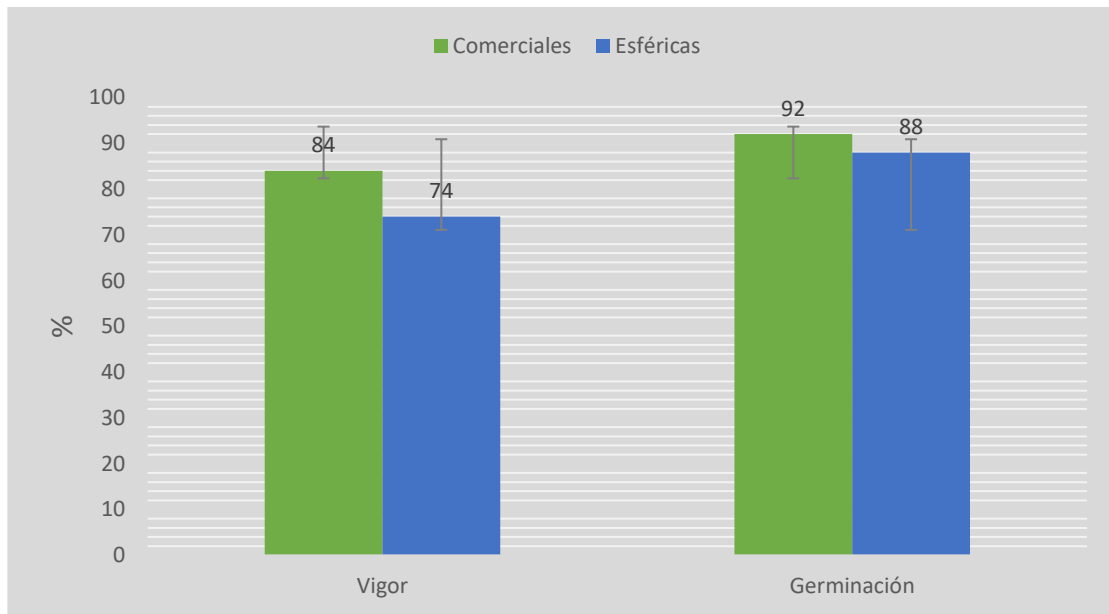


Figura 1. Respuesta del vigor y la germinación a la aplicación de dos tipos de NPsZnO (comerciales y esféricas de síntesis).

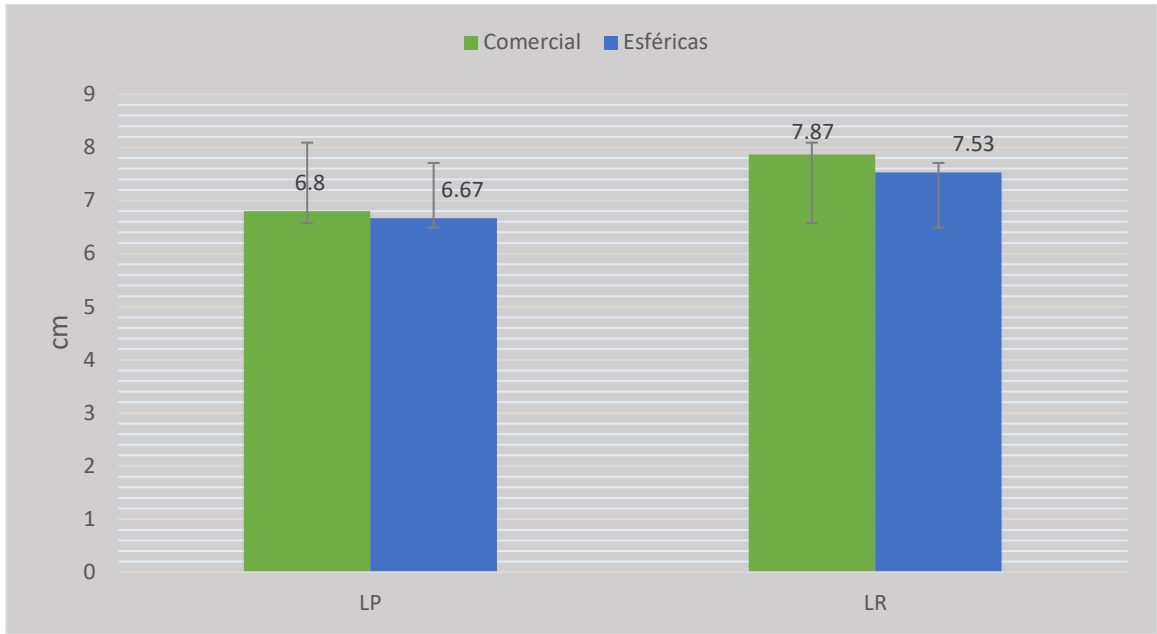


Figura 2. Respuesta de las variables longitud de vástago y de radícula a la aplicación de dos tipos de NPsZnO (comerciales y esféricas de síntesis).

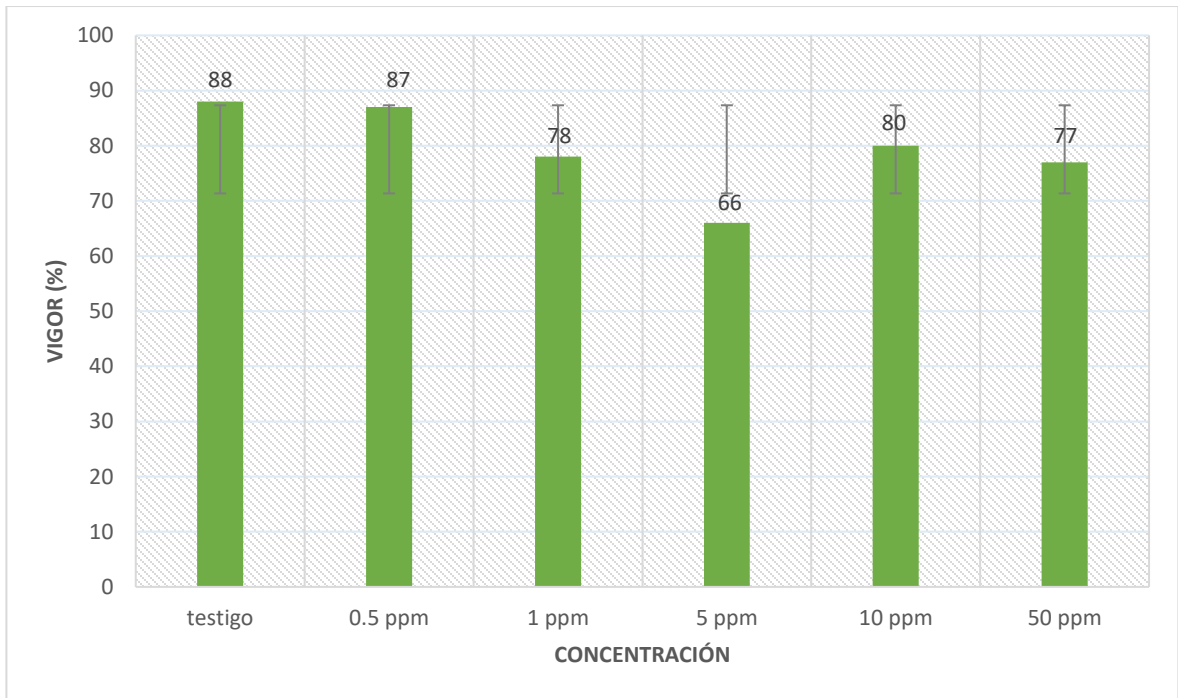


Figura 3. Porcentaje de vigor de germinación por concentración en semillas de tomate, *Lycopersicum esculentum* tratadas con NPsZnO.

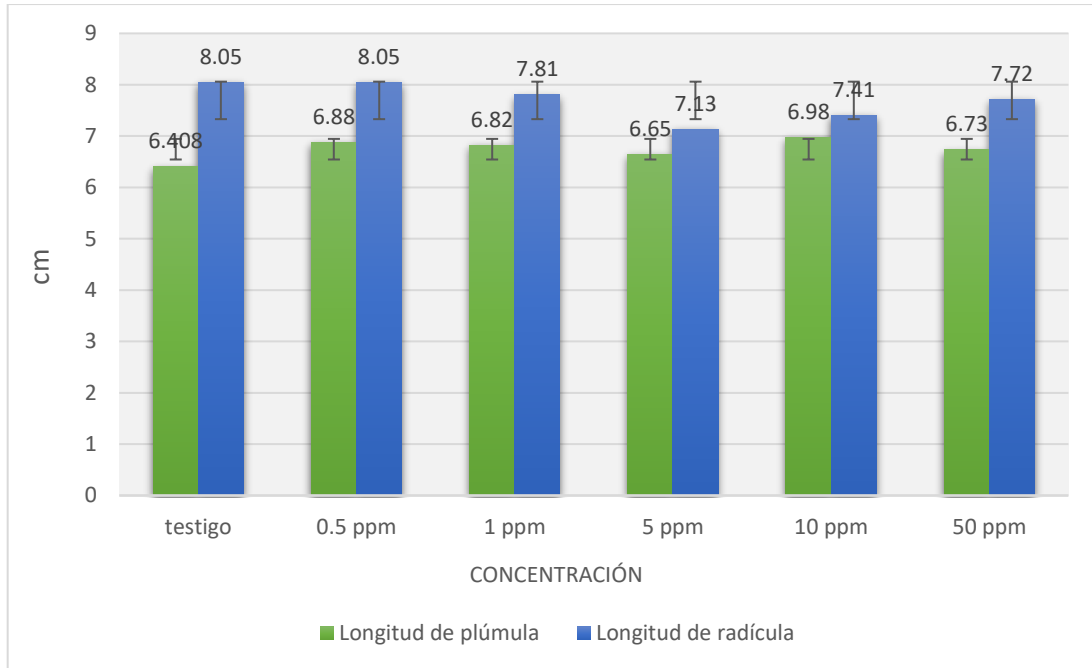


Figura 4. Longitud media de vástago y de radícula por concentración de nanopartículas

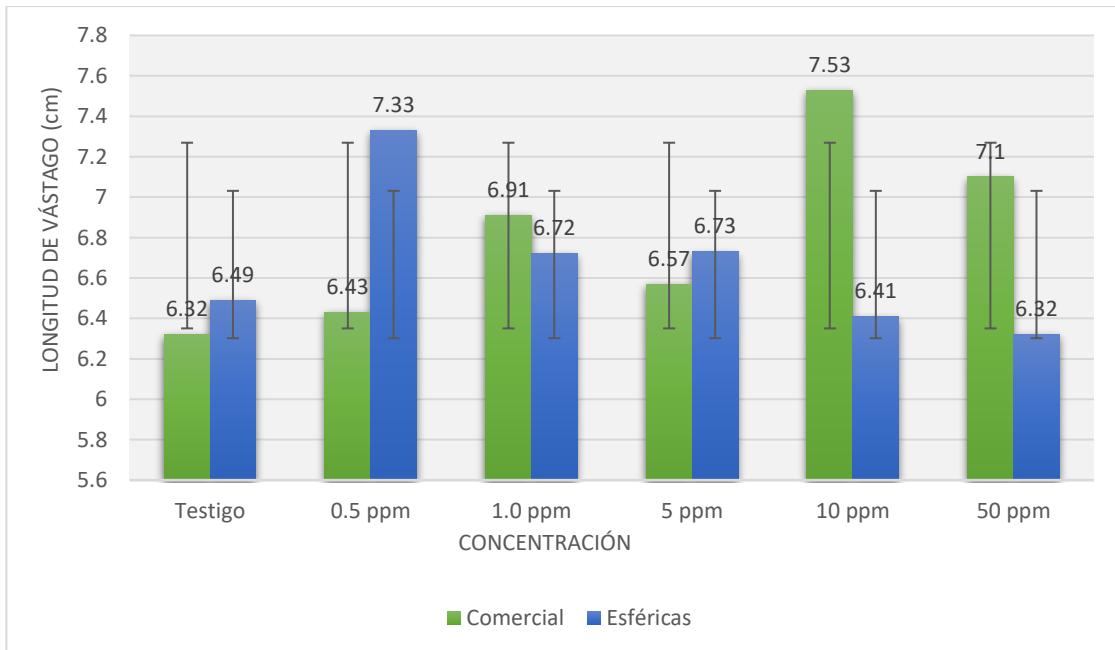


Figura 5. Longitud media de vástago de plántulas de tomate obtenidas de semillas tratadas con NPsZn, de tipo comercial y esféricas.

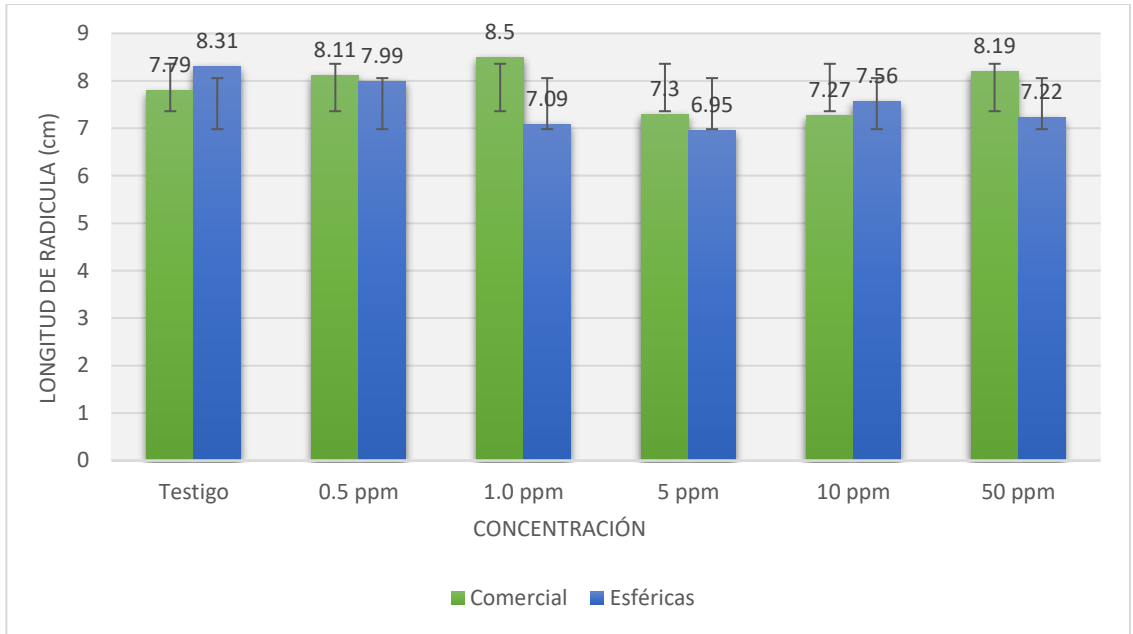


Figura 6. Longitud media de radícula de plántulas de tomate obtenidas de semillas tratadas con NPsZn, de tipo comercial y esféricas.