

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO



Actividad de Nanopartículas de Óxido de Zinc de Forma Varita y Hexagonal en la
Germinación y Crecimiento de Plántulas de Maíz (*Zea mays L.*)

Por:

ARACELI ALVA MARTÍNEZ

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN

Saltillo, Coahuila, México.

Febrero, 2018

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO

Actividad de Nanopartículas de Óxido de Zinc de Forma Varita y Hexagonal en la
Germinación y Crecimiento de Plántulas de Maíz (*Zea mays L.*)

Por:

ARACELI ALVA MARTÍNEZ

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

Asesor Principal



Dr. Ricardo Hugo Lira Saldívar
Coasesor



Mtro. Josué Israel García López
Coasesor



Dr. Gabriel Gallegos Morales
Coordinador de la División de Agronomía



Saltillo, Coahuila, México

Febrero 2018

DEDICATORIAS

A Mis Padres

Ma. Hilaria Isabel Martínez y José Jaime Alva Martínez

A quienes con amor e ilusión de su vida ha sido verme convertida en una persona de provecho, gracias a su confianza, apoyo y consejo, he llegado a realizar una de mis más grandes metas, la cual es la herencia más valiosa que me pudieron haber dado, el objetivo logrado también es para ustedes por haber depositado en un inicio esa confianza en mí, que a lo largo de mi formación académica siempre estuvieron ahí brindándome apoyo, consuelo y aliento, sin ustedes jamás lo hubiese logrado, estén seguros que haré que todos estos años que estuvimos lejos valga la pena, pondré de mi esfuerzo y trabajaré duro por ser lo que siempre soñaron que fuera, una profesionalista, una persona de bien, siempre con la frente en alto, sonriente y alegre como ustedes, les agradezco eternamente.

Con mucho amor su hija.

AGRADECIMIENTOS

A Dios le agradezco porque por él, y de él existen todas las cosas, gracias a él que siempre que siempre me mantuvo protegida e hizo que tuviera salud y fuerzas para levantarme en los momentos más difíciles, mantenerme fuerte en los momentos tristes. Gracias a él nunca estuve sola por eso y más. Amen

A mis padres Gracias por el apoyo brindado a lo largo de mi vida, por permanecer conmigo en los buenos y malos momentos, les agradezco por los valores que siempre me inculcaron desde pequeña, me enseñaron que la familia siempre está unida sin importar la distancia que nos separe, los amo con todo mi corazón.

A mis Hermanos Les agradezco por todo el apoyo moral y económico que me han brindado, Erika y Piedad gracias por sus consejos, ánimos siempre brindados durante este transcurso de mi vida, son unas hermanas extraordinarias y le agradezco a Dios y a nuestros padres por haberme brindado unas hermanas a las cuales amo y quiero, las dos han sido un claro ejemplo a seguir. Jaime, mi hermano mayor al cual aprecio él me ha enseñado que no importa la distancia, los hermanos siempre estarán para apoyarse en todo, y tú me lo has demostrado gracias hermano por el gran apoyo brindado, aunque estemos lejos siempre estaremos unidos, por último, Jacobo mi hermano menor, gracias por el apoyo, por los consejos, y las alegrías. Dios me los bendiga siempre. Los ama su hermana.

A mi Alma Mater por brindarme un espacio en esta que es mi adorada institución, gracias querida UAAAN porque en tus aulas tuve la dicha de conocer a personas extraordinarias, conocí a maestros que me brindaron sus enseñanzas, a amigos que se convirtieron en mi familia y por conocer el amor, gracias por cada experiencia que me concediste. ¡Buitres por siempre!

A la Dra. Norma Angélica Ruiz Torres por permitirme formar parte de uno de sus proyectos de investigación, por todo el apoyo brindado, ya que sin su valioso apoyo no hubiese sido posible la culminación de este trabajo.

Al Dr. Ricardo Hugo Lira Saldívar por el apoyo brindado y ser parte importante dentro de este proceso.

Al Mtro. Josué Israel García López por el apoyo brindado durante la elaboración de este trabajo y por su gran disposición para aclarar dudas en el momento en que se llevó a cabo la evaluación de dicho trabajo.

A mi amiga **Rosa María Chávez Mendoza**, hermana gracias por brindarme tus consejos, amistad, confianza, cariño, y sobre todo apoyo durante este transcurso de mi vida, le doy gracias a Dios por permitirme compartir alegrías, lágrimas y risas durante la carrera, y sobre todo compartir experiencias increíbles, eres una persona admirable. Te quiero mucho. Dios te bendiga siempre.

A mi amiga **Yazmín Cabrera Arellano** gracias por todo el apoyo, confianza, amistad brindada durante la estancia en la universidad y por permanecer en los momentos difíciles que más te necesité gracias por ser como una hermana.

A mis amigos **Héctor Alonso Hernández Meza, Luis Hernández Hernández, Roberto Hernández Tafoya** gracias por todo el apoyo brindado, por todas las alegrías, tristezas compartidas, ustedes se convirtieron en mi familia. Dios los bendiga siempre.

A **Germaín Guerrero Santes** gracias por todo el apoyo brindado durante mi formación, por brindarme tu total confianza y amor para culminar esta etapa de mi vida.

También agradezco el apoyo brindado a este trabajo a través del proyecto 268 de Fronteras de la Ciencia-CONACYT, ya que proporcionó los recursos necesarios para la síntesis de las nanopartículas de NPs ZnO, utilizadas en este trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE CUADROS.....	ii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	iii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	iv
RESUMEN.....	5
INTRODUCCIÓN.....	7
OBJETIVO GENERAL.....	8
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	8
HIPÓTESIS	8
REVISIÓN DE LITERATURA	9
La nanotecnología.....	9
Ámbitos relacionados con el uso de la nanotecnología	10
Medio ambiente	10
Cosmética.....	10
Electrónica.....	11
Farmacéutica.....	11
La Nanotecnología en la agricultura.....	12
Parámetros de calidad de las semillas.....	14
Aplicación de nanopartículas en la germinación de semillas.....	14
Efectos del uso de nanopartículas en el vigor de las semillas	16
Uso de NPs de óxido de zinc en plantas.....	19
MATERIALES Y MÉTODOS	21
Variables evaluadas en las semillas germinadas:.....	22
Primer conteo de plántulas normales.....	22
Plántulas normales (segundo conteo).....	22
Plántulas anormales (PA).....	22
Semillas sin germinar (SSG)	22
Longitud de radícula (LR) y longitud de plúmula (LP)	22
Peso seco de plántula (PS)	22
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	24
CONCLUSIONES.....	32
LITERATURA CITADA	33
ANEXOS	40

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Cuadrados medios del análisis de varianza para el ensayo de germinación en semilla de maíz (<i>Zea mays</i> L.), tratadas con NPs ZnO de forma varita y hexagonal	25
Cuadro 2. Comparación de medias para variables evaluadas en el ensayo de germinación en semillas de maíz tratadas con NPsZnO de forma varita y hexagonal.	27
Cuadro 3. Comparación de medias para variables evaluadas en el ensayo de germinación en semillas de maíz tratadas con NPsZnO de forma varita y hexagonal por concentración.....	28

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Porcentaje de germinación en semillas de maíz en respuesta a la aplicación de NPsZnO en forma varita y hexagonal.	40
Anexo 2. Peso seco (PS) (mg/plántula) en respuesta a la aplicación de NPsZnO en forma varita y hexagonal.	40
Anexo 3. Longitud de plúmula (cm) en respuesta a la aplicación de NPsZnO en forma varita y hexagonal.	41
Anexo 4. Longitud de radícula (cm) en respuesta a la aplicación de NPsZnO en forma varita y hexagonal.	41

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Representación esquemática que muestra la diferencia en el área superficial total (AST) entre partículas del mismo material pero en diferente tamaño	10
Figura 2. Los usos de la nanotecnología en la agricultura abarcan diversos agroquímicos como los nanofertilizantes, nanoplaguicidas mejoradores de suelo y también nanosensores	13

RESUMEN

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 NPsZnO, como una opción para promover el vigor de germinación de semillas y en el crecimiento de plántulas de *Zea mays L.* Se estableció un bioensayo que constó de 2 tipos de NPsZnO (forma varita y hexagonal) y 6 concentraciones (0, 0.5, 1.0, 5.0, 10.0 y 50.0 ppm). Las semillas se dejaron imbibir por 24 h en cajas Petri con las soluciones de las NPsZnO.

Posteriormente, las semillas fueron sembradas por el método denominado entre papel (Anchor), previamente humedecido con agua destilada, en cada uno se colocaron 25 semillas formando una hilera. Posteriormente el papel se enrolló en forma de “taco”, se pusieron en una bolsa de plástico y está en un contenedor dentro de una cámara bioclimática a una temperatura de $25^{\circ}\text{C} \pm 2$ por 7 días. Cada tratamiento constó de 6 repeticiones y 25 semillas cada uno.

El experimento se estableció en un diseño completamente al azar con arreglo factorial 2 x 6. Los datos de las variables fueron sometidos a un análisis de varianza para determinar diferencias estadísticas entre tipos de NPsZnO, (forma de varita y forma hexagonal) y entre concentraciones. Se realizó también una comparación de medias mediante la Prueba de Tukey ($P \leq 0.05$), para determinar diferencias estadísticas entre tipos de NPsZnO y entre concentraciones.

Los resultados obtenidos indican que las variables peso seco de plántula, longitud de plúmula y longitud de radícula muestran una respuesta positiva al utilizar concentraciones bajas de NPsZnO. Las variables vigor de germinación, germinación, plántulas anormales y semillas sin germinar, no mostraron respuestas

significativas a la aplicación de NPsZnO. Respecto a la forma de las NPs, aquellas de forma hexagonal estimularon de forma favorable el peso seco de plántula, mientras que las de forma varita originaron una respuesta favorable en las longitudes de plúmula y de radícula. Por último, se observó que al realizar la aplicación de 0.5 ppm se vio incrementado el peso seco de plántula y la longitud de radícula, sin embargo, al aplicar 50 ppm las plántulas presentaron una tendencia similar.

Palabras Clave: Nanopartículas, óxido de zinc, germinación, vigor, plúmula y radícula.

INTRODUCCIÓN

El uso de nuevas tecnologías está adquiriendo protagonismo en la vida diaria, un ejemplo es la nanotecnología (NT) o ciencia a nano escala, encargada de la manipulación y aplicación directa de materiales a través del control de la materia, es decir de átomos y moléculas. Estas tecnologías han tenido un gran desarrollo en las últimas décadas y han demostrado tener potencial en la presentación de nuevas y mejoradas soluciones a grandes retos de la sociedad, y al mismo tiempo han abierto nuevas posibilidades en el campo de la ciencia y la tecnología, que abarca desde las aplicaciones en la medicina, electrónica, biología, bioquímica y en la agricultura.

La agricultura se ha visto beneficiada a través de aplicaciones nanotecnológicas, las cuales con técnicas experimentales permiten fabricar, caracterizar y manipular partículas de tamaño pequeño, unas de ellas son las denominadas nanopartículas, las cuales se pueden utilizar en diversas aplicaciones de la agricultura moderna

Los estudios y avances de la NT están siendo utilizados en la biología y producción de alimentos para potenciar una nueva disciplina llamada agronanobiotecnología, en donde se hace uso de NPs, que tienen dimensiones entre de 1-100 nm y son de gran trascendencia en la investigación científica, por sus aplicaciones en diversos campos, como el biomédico, biológico, agronómico, óptico y electrónico (Ball, 2002; Karunaratne, 2007).

Con la finalidad de encontrar beneficios de la aplicación de la NT en la agricultura, es importante planear y realizar investigaciones amplias en diferentes áreas para la producción de cultivos y practicar una agricultura de menor impacto ambiental. La aplicación de NPs en semillas es una de las primeras áreas por analizar para conocer el efecto que tiene sobre procesos fisiológicos de la germinación y desarrollo de plántulas.

Con base en lo anterior, en el presente trabajo se presentan los resultados obtenidos de la evaluación del proceso de germinación de las semillas de maíz (*Zea mays L.*), sometida a la aplicación de NPsZnO en dos formas (varita y hexagonal), las cuales fueron sintetizadas en el Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA-CONACYT) ubicado en Saltillo, Coah., México.

OBJETIVO GENERAL

Analizar el efecto de los tratamientos de NPsZnO en forma hexagonal y varita a diferentes concentraciones, y su actividad en el vigor de germinación y crecimiento de plántulas de maíz.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Conocer el efecto derivado de la aplicación de diversas dosis de NPs ZnO en forma de varita y hexagonal, sobre la germinación de semillas y crecimiento de plántulas de maíz.

- Determinar si existe alguna diferencia en la respuesta que generan las diferentes concentraciones y formas de NPs (hexagonal y varita), sobre el vigor y desarrollo de plántulas de maíz.

HIPÓTESIS

La aplicación de NPs ZnO en forma hexagonal y de varita generará un incremento en el vigor de germinación de semillas de maíz, y estimulará el crecimiento y el desarrollo de las plántulas.

REVISIÓN DE LITERATURA

La nanotecnología

La nanotecnología (NT) es la creación, estudio, diseño, síntesis, manipulación y aplicación de los materiales y sistemas funcionales a través del control, explotación de fenómenos y propiedades de la materia a nano escala, por lo tanto, la NT a combinación de diferentes técnicas que provienen de distintas áreas de investigación para el estudio, creación y diseño de materiales a escala atómica y molecular (Serena y Correia, 2003).

Para darnos una idea de las dimensiones a las que hace referencia la NT, puede considerarse que una esfera con un diámetro de 20 nm, es mucho más grande que un átomo, una molécula, el ADN o una proteína, sin embargo, esa misma esfera es mucho más pequeña que un virus promedio, una bacteria o que el núcleo de una célula humana (Hullmann, 2006).

Las nanopartículas (NPs) se definen por su tamaño. Una NP es un cuerpo que tiene dimensión del orden de 100 nanómetros (equivale a alrededor de un millar de átomos). Este tamaño es muy pequeño, ya que 100 nanómetros corresponden a la longitud de onda de la luz ultravioleta radiante en el intervalo de 10 a 3580 nanómetros. Las NPs tienen propiedades interesantes ya que son totalmente diferentes del mismo material en escala micro, ya que, en escala nano, los atributos físicos de estas propiedades son diferentes de las del material original (Alam *et al.*, 2013), en gran parte debido a su mayor área superficial expuesta (Figura 1)

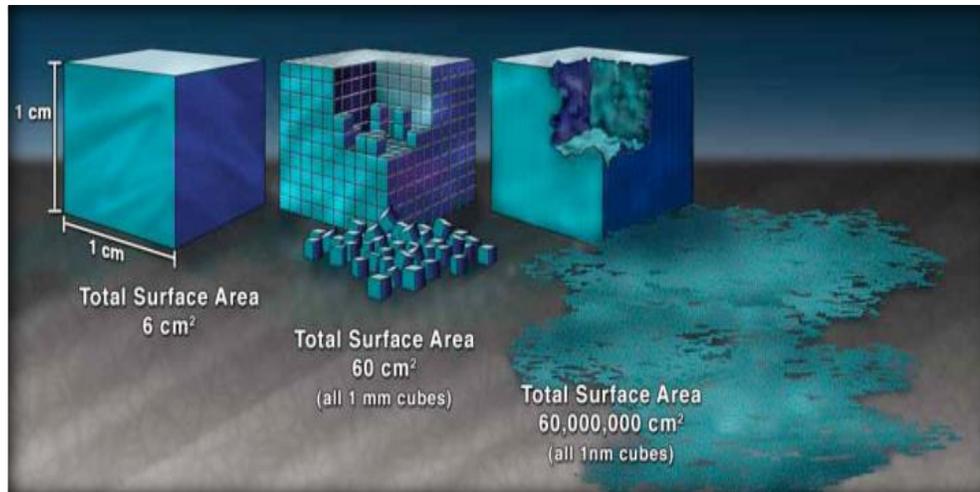


Figura 1. Representación esquemática que muestra la diferencia en el área superficial total (AST) entre partículas del mismo material pero en diferente tamaño. Un cubo formado por una partícula con un mm por lado tiene 6 cm^2 de AST; un cubo formado por partículas de 1 mm por lado tiene 60 cm^2 de AST; pero un cubo formado por nanopartículas con un nm por lado tiene $60,000,000 \text{ cm}^2$ de AST.

Ámbitos relacionados con el uso de la nanotecnología

Medio ambiente

En el ámbito del medio ambiente se ha mostrado gran interés en los últimos años por el uso de la NT para controlar la contaminación. Esta tecnología ha tenido un considerable aumento, ya que diversos materiales nanoestructurados han sido aprovechados como vehículo de transporte en la liberación controlada de productos agroquímicos, esto se debe a que presentan una mayor biodegradabilidad por su poca o nula toxicidad y por su factible elaboración (Aouada y de Moura, 2015).

Cosmética

Se han encontrado aplicaciones de la NT en el área de la cosmética, refiriéndose al uso de pequeñas partículas con principios que permiten una penetración más profunda dentro de la piel, potencializando así el producto. Los productos solares convencionales de alto nivel de protección, se elaboran a base de NPs de TiO_2 y ZnO de tamaño micro (Bayuelo, 2015).

Electrónica

El empleo de NPs metálicas para fabricar memorias para computadoras de síntesis y caracterización de materiales es una nueva tendencia que está causando impacto en los últimos tiempos, en lo que se refiere a NPs específicamente, se han montado diferentes técnicas de síntesis de NPs metálicas, la mayoría por métodos de química coloidal. Los resultados han sido favorables obteniendo NPs monodispersas y con alta pureza. Se han manipulado algunas características de las NPs como son composición y tamaño, viendo sus efectos principalmente en la absorción óptica de sus dispersiones coloidales (Gutiérrez, 2007).

Farmacéutica

La NT es considerada como un área de trabajo excitante, particularmente para la salud y para los sistemas de suministro de fármacos. El potencial que tiene para facilitar la salud es enorme, en muchos casos se considera como un paso valioso en el proceso de desarrollo de nuevos medicamentos y dispositivos para la salud. Los temas relacionados con los suministros de fármacos se vuelven cada vez más importantes, fármacos más potentes y específicos derivados del conocimiento del genoma humano (Villafuerte, 2008).

La NT para elaborar NPs inició su desarrollo como una estrategia para atacar problemas de formulación asociados con fármacos que son poco solubles en agua o en lípidos. La reducción de las partículas de los fármacos al nivel de nano escala aumenta la velocidad de disolución y el límite de saturación de la solubilidad, lo cual permite un mayor desempeño del fármaco (Jiahui, 2004).

Por otra parte la NT permite la liberación de fármacos en forma mínimamente invasiva, ya que posibilita la fabricación de dispositivos a escala nanométrica, tamaño que permite a estos dispositivos atravesar poros y membranas celulares, de igual manera tiene potencial para desempeñar un papel importante en el

diagnóstico y la proyección de imágenes de los tumores cerebrales por evolucionar tanto la detección preoperatoria, permitiendo la detección de las células precancerosas y ofrecer en tiempo real el seguimiento longitudinal no invasivo de los efectos del tratamiento (Oropesa, 2012).

La Nanotecnología en la Agricultura

El uso de nuevas tecnologías está logrando cada vez más protagonismo en la vida diaria. Los productores agrícolas a nivel mundial demandan resolver problemas como la falta de fertilizantes, incluso la pérdida de fertilidad en los suelos por el uso inadecuado de algunos productos sintéticos. Por otra parte, repercute también en el cambio climático, provocando una disminución de la superficie agrícola y un aumento en la demanda de alimento para la población. La manera de hacerle frente a estos problemas es explorar nuevas tecnologías de vanguardia, como la NT, la cual es una rama que falta por explorar para tener un conocimiento más a fondo de lo que puede generar esta nueva tecnología en la agricultura (Cheng *et al.*, 2016; Quispe, 2010).

Sabourin y Ayende (2015) señalan que la NT puede llegar a tener un impacto en los sectores del área de la industria de agronegocios en al menos unos 10 años, de esta manera la NT se puede llegar a utilizar para tener un mejor desarrollo de algunos recursos agroindustriales convencionales, los cuales tienen gran potencial en el sector agrícola. En la producción agrícola se reconoce a la NT como una herramienta en la mejora de la productividad, primordialmente en el uso de los fertilizantes (Mastronardi *et al.*, 2016).

Por su parte, Perlatti *et al.* (2013) mencionan que al hacer uso de una menor cantidad de productos químicos y un mejor aprovechamiento del uso del agua (Dasgupta *et al.*, 2017) puede generar mayor eficiencia en el uso de productos

fitosanitarios, sin embargo, aún se requiere un mayor número de investigaciones para corroborar resultados recientes.

Se ha señalado que, la NT tiene un potencial para revolucionar los sistemas agroalimentarios, según lo menciona Lira Saldívar *et al.* (2014) lo cual se puede lograr a través de la utilización apropiada del agua, la protección contra las enfermedades e insectos, proporcionando nuevas herramientas para la biología molecular y celular, originando así nuevos materiales para la protección del medio ambiente y para el desarrollo de una agricultura moderna y sustentable (Prasad *et al.*, 2014). La Figura 2 muestra las diversas aplicaciones de las NPs en el ámbito de la agricultura, las cuales son principalmente nanofertilizantes y nanoplaguicidas.

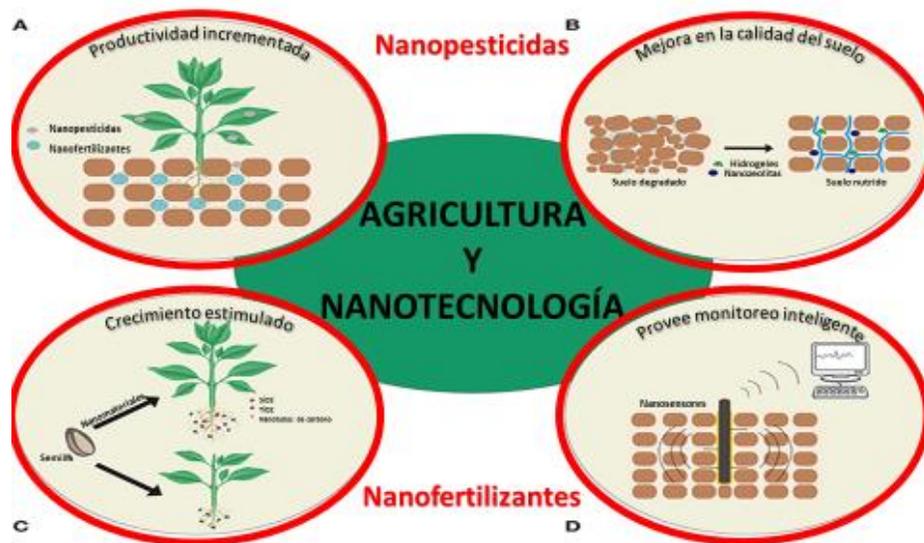


Figura 2. Los usos de la nanotecnología en la agricultura abarcan diversos agroquímicos como los nanofertilizantes, nanoplaguicidas mejoradores de suelo y también nanosensores.

La NT ofrece tener liberación controlada de productos, como es el caso de herbicidas, insecticidas, fertilizantes y fungicidas. La aplicación de NPs en la

patología de las plantas se puede dirigir a resolver problemas agrícolas específicos en la interacción planta-patógeno, y así proporcionar una nueva forma de protección para los cultivos (Nair *et al.*, 2010).

Parámetros de calidad de las semillas

La calidad de la semilla es un atributo que involucra la calidad genética, la fisiológica, la física y la sanitaria, dichas características son esenciales para un adecuado establecimiento de las plantas en condiciones de campo, favoreciendo a la par la obtención de mayores rendimientos (Basra, 1995).

La calidad fisiológica, en particular el vigor de la semilla, se relaciona con la tasa y uniformidad de la germinación. El vigor involucra la capacidad que tiene un organismo para la biosíntesis de energía y compuestos metabólicos, como proteínas, ácidos nucleicos, carbohidratos y lípidos (Luo *et al.*, 2015). Todo ello asociado a la actividad celular, la integridad de las membranas celulares y el transporte o utilización de sustancias de reserva (Bewley, 1986).

Por otra parte, la calidad de la semilla se deteriora dependiendo de las condiciones ambientales durante el almacenamiento y el tiempo en que permanecen almacenadas, el componente de la calidad fisiológica que muestra el deterioro es el vigor de las semillas, seguido de la germinación y de un mayor porcentaje de plántulas anormales (Ferguson, 1995).

Aplicación de nanopartículas en la germinación de semillas.

La NT ofrece como herramienta la aplicación de NPs, que mejoran la germinación de la semilla y los parámetros fisiológicos relacionados con vigor y

otros parámetros (Ocvirk *et al.*, 2014) para optimizar la capacidad de absorción, degradación de reservas y la división celular (Chinnamuthu y Boopathi, 2009).

Mahmoodzadeh *et al.* (2013) estudiaron los efectos de titanio a nano escala usando NPs de TiO₂; los resultados de estos autores demostraron una promoción de la germinación del 75 % con la aplicación de NPs de 20 nm de tamaño y una concentración de 2000 mg L⁻¹.

Otros autores (Ulla y Arshad, 2014) hacen referencia a que las semillas tratadas con materiales a nano escala, generan un cambio en la dinámica de la germinación, observándose un incremento en el porcentaje de germinación y en el índice de velocidad de emergencia. El período de germinación se acelera debido a una mayor disponibilidad de agua, la clave para el aumento de la tasa final de germinación de las semillas es la penetración de nanomateriales en la semilla (Khodakovskaya *et al.*, 2009).

Los resultados obtenidos por Ghavam *et al.* (2018) mostraron que las nanopartículas de plata aumentaron el porcentaje de germinación de *Thymus vulgaris* bajo condiciones de estrés por salinidad, encontrando que la tasa de germinación y la longitud de la raíz se mejoraron con la aplicación de 10 mL/L de nano-plata.

En semillas de girasol se encontró que la aplicación de NPs de silicio tiene un efecto positivo en la germinación, vigor, emergencia y crecimiento de plántulas. Es importante considerar que los tratamientos con NPs en semillas deben aplicarse antes de la siembra, para mejorar la germinación y generar un mayor fortalecimiento efectivo en plántulas (Azimi *et al.*, 2016).

Por su parte, Upadhyaya *et al.* (2017) concluyeron que las NPs Zn protegieron las plantas de arroz contra el daño de especies ROS, mejorando los niveles de actividades de enzimas antioxidantes durante la germinación. Como consecuencia, las semillas tratadas con NP Zn mostraron un mejor potencial para la germinación.

Siddiqui y Whaibi (2014) hacen mención que la aplicación de NPsSiO₂ con un tamaño de 12 nm mejoró significativamente la germinación en semillas de tomate utilizando una concentración de 8 gL⁻¹ de ese nanomaterial, lo cual generó un incremento en el porcentaje de germinación de semillas, así como en el índice de vigor y de biomasa fresca.

Por otra parte, Savithramma *et al.* (2012) consignaron que la aplicación de NPs de plata (Ag) sobre semillas del árbol medicinal *Boswellia ovalifoliolata*, endémico y amenazado en la India, mejoró la germinación de estas semillas. Los resultados obtenidos indicaron que los tratamientos con NPs Ag lograron una germinación del 95%, mientras que el testigo solamente obtuvo 70% de germinación.

La aplicación de NPs mejora el rendimiento de los cultivos aproximadamente en un 16 % con una dosis adecuada, sin embargo, el nivel de respuesta en cuanto a germinación y vigor depende del tipo de nanomaterial, de su aplicación potencial y del genotipo, por tal motivo, es recomendable no sólo evaluar la respuesta de diversos genotipos a la aplicación de NPs durante la germinación, sino ir más allá para conocer la capacidad de estos en etapas subsecuentes (Buu *et al.*, 2014).

Efectos del uso de nanopartículas en el vigor de las semillas

Afrayeem *et al.* (2017) reportan que diferentes concentraciones (0.0, 0.25, 0.50 y 0.75 g) de NPs ZnO fueron preparadas en agua destilada y se aplicaron en

semillas de chile para estudiar el efecto sobre la germinación, longitud de raíz, tallo y crecimiento de plántulas. Los resultados mostraron que el efecto de la nanopartícula de ZnO fue significativo en el porcentaje de germinación, longitud de raíz, tallo y plántula. Los datos revelan que la germinación de la semilla aumentó con las concentraciones más altas, sin embargo, se observó una disminución en los valores a concentraciones más bajas. La raíz, la longitud de los brotes y las plántulas también fue máxima en concentraciones más altas y en concentraciones más bajas mostraron valores disminuidos.

El efecto de NPs comienza a mostrarse desde la germinación de las semillas, reflejando una mayor uniformidad que se observa al final de la germinación, debido a la penetración de nanomateriales en la semilla, lo que permite la imbibición del agua, beneficiando a las primeras etapas del proceso germinativo (Hampton y Tekrony, 1995).

El estudio reportado por Anandaraj y Natarajan (2017) en el que se evaluaron semillas de cebolla tratadas con NPs ZnO en concentraciones de 750, 1000, 1250 y 1500 mg kg⁻¹, mostró que la dosis de 1000 mg kg⁻¹ mejoró la germinación (72%), la longitud del tallo (7.5 cm) y el índice de vigor (998), en comparación con el tratamiento testigo.

El vigor en las semillas es el potencial biológico que favorece el establecimiento rápido y uniforme, incluso en condiciones desfavorables de campo (González *et al.*, 2008). Por otra parte, el vigor se puede considerar como la interacción de aquellas propiedades bióticas y abióticas que influyen en las semillas y que determinan su nivel de actividad, la dormancia, la germinación y la emergencia. El vigor es parte esencial de la calidad de la semilla (Navarro, 2009).

Estudios realizados en semillas de tomate, aplicando tratamientos NPsCu y MPsCuSO₄ a concentraciones de 0, 0.5, 1, 5, 10 y 50 ppm, en cajas Petri y sobre papel filtro, por un lapso de 24 horas, indican que las NPsCu a 5 y 10 ppm promovieron el vigor de germinación en las semillas, teniendo una superación estadística con respecto al testigo en ambos tratamientos. En otro estudio similar, efectuado en semillas de chile ancho, el tratamiento correspondiente a 5 ppm NPsCu, presentó mayor vigor de germinación y longitud de radícula, que en el resto de tratamientos, superando al testigo en 45.8% en vigor de germinación (Ruiz *et al.*, 2016).

Estudios realizados por Ruiz *et al.* (2017) indican que al imbibir semillas de *Cucurbita pepo* var. *Grey zucchini* con NPs compuestas por Zn + Fe (NPs ZnFe) por 48 horas a una concentración de 10 ppm, promueve de manera positiva el vigor de germinación y la longitud de tallo, por otro lado, imbibir semillas de la variedad anteriormente mencionada a una concentración de 5 ppm, presenta un efecto similar, incrementando el vigor de germinación y la longitud de la radícula.

Estudios realizados por García *et al.* (2017) mencionan que al imbibir semillas de *Capsicum chinense* con NPsZnO por 72 horas a una concentración de (0, 100, 200, 300, 400 y 500 ppm) promueve la germinación y el vigor, así como un mayor desarrollo de la longitud de radícula. La aplicación de NPsZnO durante el proceso de germinación, en concentraciones adecuadas puede mejorar significativamente la velocidad de germinación, generando plántulas de mayor vigor para la producción.

En contraparte Hojjat y Hojjat (2016) mencionan que la aplicación de NPsAg no influyó sobre el parámetro de germinación en semillas de lenteja, pero la interacción de NPs aumentó el crecimiento de la longitud de la raíz. Por lo tanto, el efecto de las NPs en las semillas y en plantas puede ser positivo o negativo esto

depende de los tipos y las concentraciones de NPs aplicadas, ya sean metálicas o derivadas del carbono.

Uso de NPs de óxido de zinc en plantas

En el reporte de Venkatachalam *et al.* (2017) se aprecia que las plantas tratadas con NPs ZnO registraron un aumento en el crecimiento y la biomasa total en 130.6% y 131%, respectivamente, sobre el control. Los resultados demostraron un aumento significativo en el nivel de clorofila a (141.6%), clorofila b (134.7%), carotenoides (138.6%) y contenido total de proteína soluble (179.4%); al mismo tiempo, se detectó una reducción significativa (68%) en el nivel de malondialdehído (MDA) en las hojas con respecto al control.

Pruebas de germinación con NPsZnO en dosis de 250 a 2000 mg L⁻¹, promovieron incrementos significativos de clorofila y proteína en plántulas de trigo (Raliya y Tarafdar, 2013), mientras que concentraciones bajas (10 y 20 mg L⁻¹) de estas mismas NPs mejoraron la germinación de semillas de cebolla (Ramesh *et al.*, 2014). En plantas de soya la dosis de 1.0 g/L de NPsZnO promovió efectos significativos en la germinación y el crecimiento, esto significa que a concentraciones mínimas se promueve el crecimiento de las raíces y por ende el desarrollo de plántula (Sedghi *et al.*, 2013).

Diversas NPs (nanotubos de carbono de paredes múltiples, aluminio, alúmina, zinc y óxido de zinc) fueron utilizadas en especies de maíz, rábano, centeno, lechuga y pepino, obteniendo que la aplicación de las NPsZnO no genera cambios en el proceso de germinación de la mayoría de las especies, excepto en el caso del maíz donde al utilizar 2000 mg L⁻¹, dicho proceso se vio afectado (Lin y Xing 2007).

La aplicación foliar de 1.5 y 10 mg L⁻¹ de NPsZnO durante un lapso de 15 días en plantas de garbanzo (*Cicer arietinum*), promovieron mayor altura y biomasa seca. La aplicación del zinc en forma de nanofertilizante aplicado al follaje en bajas dosis es mucho más eficiente para promover el crecimiento de dichas plantas, en base a que el zinc es un microelemento requerido para la producción de biomasa, también tiene una función importante en muchas enzimas involucradas en el proceso fotosintético, así como en el mantenimiento e integridad de las membranas celulares de las plantas (Burman *et al.*, 2013).

Shyla y Natarajan (2014) hacen referencia a que existen algunos reportes que indican que la NPsZnO tiene un incremento en el nivel de AIA en raíces y en los brotes apicales, promoviendo de esta forma la velocidad de crecimiento en las plantas.

En el mismo sentido se realizaron estudios con aplicación de nanofertilizantes en plantas de cebada, los resultados obtenidos indicaron que las plantas se trataron separadamente con suspensiones de óxido de zinc (ZnO) quelato y óxido férrico (Fe₂O₃) durante la fase de formación de tallos y etapas lechosas del grano. Los resultados indicaron que los días a floración y la madurez aumentaron significativamente después de la aplicación de ambos nanofertilizantes, por otra parte, también se observó una mejora en la masa de grano, la longitud de espiga, el número de granos por espiga y el contenido de clorofila (Janmohammadi *et al.*, 2016).

MATERIALES Y MÉTODOS

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), en Saltillo, Coahuila, México.

En este estudio se utilizaron NPs de óxido de zinc (NPs ZnO), sintetizadas en los Laboratorios del Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA). Las soluciones de NPs se prepararon mediante la mezcla de agua destilada con NPs en forma de varita y hexagonal, a diferentes concentraciones (0.0, 0.5, 1, 5, 10 y 50 ppm). Posteriormente se sometieron a un proceso de sonicación, para asegurar una dispersión.

Para la ejecución del bioensayo, se utilizaron semillas de maíz de la variedad Jaguan, el experimento se estableció en un diseño completamente al azar con arreglo factorial 2x6, el cual consistió de 2 tipos de NPsZnO (varita y hexagonal) y 6 tratamientos, con 6 repeticiones cada uno. Para cada tratamiento se colocaron 150 semillas de maíz en cajas Petri, las cuales fueron asperjadas con las soluciones de NPsZnO de forma hexagonal y varita, a concentraciones de 0.0 ppm (Testigo), 0.5, 1, 5, 10 y 50 ppm respectivamente, para someterlas posteriormente a un proceso de imbibición con dichas soluciones durante 24 horas. Después de transcurrir ese lapso de tiempo, se procedió a realizar la siembra utilizando el método de germinación denominado "Entre Papel".

Para la siembra, se humedeció el papel Anchor con agua destilada, enseguida se colocaron 25 semillas, las cuales fueron cubiertas con otra hoja de

papel humedecida, enrollándolas en forma de “taco”, esto procedió para cada repetición de cada tratamiento.

Una vez realizada la siembra, los tacos fueron acomodados por tratamiento de NPs en bolsas de polietileno, las cuales se ubicaron en una canasta que fue colocada en una cámara bioclimática a 25°C, con una humedad relativa del 80 % y un fotoperiodo de 16 horas de luz y 8 horas de oscuridad. Posteriormente se procedió a realizar la estimación de las variables evaluadas en el bioensayo.

Variables evaluadas en las semillas germinadas:

Primer conteo de plántulas normales, se realizó a los 4 días después de la siembra, para estimar el vigor que posee la semilla para germinar en menor tiempo y establecerse en condiciones de campo, dicho valor se expresó en por ciento.

Plántulas normales (segundo conteo), se realizó al séptimo día, para determinar el por ciento de germinación.

Plántulas anormales (PA), para esta variable se consideraron aquellas plántulas que mostraron deformaciones en el crecimiento en alguna de sus estructuras (plúmula o radícula), el resultado fue expresado en por ciento.

Semillas sin germinar (SSG), se contabilizaron aquellas semillas muertas o duras que no mostraron capacidad de germinación, el resultado se expresó en por ciento.

Longitud de radícula (LR) y longitud de plúmula (LP), se midieron todas las plántulas normales por repetición, y el resultado se expresó en cm.

Peso seco de plántula (PS), esta variable se obtuvo una vez determinadas todas las anteriores. Se realizó después de someter a secado las plántulas normales, por 24 horas, en una estufa marca Riossa H-48 a 72°C. Pasadas las 24 horas se extrajeron, y se dejaron en un desecador, para posteriormente ser pesadas

en una balanza analítica marca Precisa BJ610C, el resultado fue expresado en mg/plántula.

Los datos de las variables evaluadas en el bioensayo se sometieron a un análisis de varianza, para determinar la posible existencia de diferencias estadísticas entre tratamientos. Posteriormente, se prosiguió a realizar una comparación de medias, utilizando la prueba de Tukey, para establecer el orden de eficiencia de los tratamientos. Se utilizó el paquete estadístico SAS (2009).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Acorde a los análisis de varianza del bioensayo de germinación de semillas de maíz, los resultados indican que para la fuente de variación forma de NPsZnO, se tienen diferencias altamente significativas ($P \leq 0.01$) para la variable peso seco de plántula y para la longitud de plúmula y radícula. En el caso de semillas sin germinar (SSG) las diferencias son significativas ($P \leq 0.05$).

Para la fuente de variación concentración, las variables peso seco de plántula, longitud de plúmula y longitud de radícula mostraron diferencias altamente significativas ($P \leq 0.01$), el resto de las variables no presentaron diferencias estadísticas (Cuadro 1).

Para el caso de la interacción forma de NPsZnO x concentración, se observan diferencias altamente significativas ($P \leq 0.01$) para las variables peso seco de plántula, y las longitudes de plúmula y de radícula, mientras que el porcentaje de germinación presentó diferencias significativas.

En la comparación de medias por concentración (Cuadro 2), las variables peso seco de plántula y longitud de radícula mostraron los mejores resultados, al aplicar 50 ppm, sin embargo, fueron estadísticamente igual que a 0.5 ppm. Mientras que, para la longitud de plúmula, el mejor tratamiento fue con 5.0 ppm, siendo esta dosis la que mostró una mayor longitud de tallo. Para la variable longitud de radícula, se observó que tanto el testigo como el tratamiento con 5.0 ppm resultaron estadísticamente iguales y con valores superiores al resto de los tratamientos. El porcentaje de germinación mostró un comportamiento estadísticamente igual al testigo con la aplicación de los diferentes tratamientos (Anexo 1).

Cuadro 1. Cuadrados medios del análisis de varianza para el ensayo de germinación en semilla de maíz (*Zea mays* L.), tratadas con NPsZnO de forma varita y hexagonal.

F.V	G.L	Vigor (%)	GER (%)	PA (%)	SSG (%)	PS (mg/plántula)	GL	LP (cm)	LR (cm)
FORMA	1	98.00NS	22.22 NS	18.00NS	8.00 *	1019.97 **	1	226.68**	282.18**
CONC	5	26.88NS	3.02 NS	1.28NS	1.95NS	424.73 **	5	78.20**	55.22**
FORMA*CONC	5	21.20NS	21.15 *	4.13NS	3.20NS	587.44 **	5	86.95**	172.51**
ERROR	60	25.28	8.26	4.66	1.86	85.88	1750	5.89	10.32
C.V (%)		5.29	2.93	155.53	307.40	11.62		16.40	17.05

*, ** = Niveles de significancia al 0.5 y 0.01, respectivamente. F.V = fuente de variación; GL= grados libertad; Vigor = plántulas normales al primer conteo; GER = 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.

En la comparación de medias por forma de NPsZnO (hexagonal y varita) (Cuadro 3) el porcentaje de semillas sin germinar, el peso seco de plántula y las longitudes de plúmula y de radícula mostraron diferencias estadísticas ($P \leq 0.05$), mientras que el porcentaje de vigor de germinación, porcentaje de germinación (Anexo 1) y de plántulas anormales no presentaron diferencias estadísticas.

Para el peso seco de plántula (Anexo 2), los mejores resultados se apreciaron al utilizar NPsZnO de forma hexagonal, mientras que la longitud de plúmula y de radícula, tuvieron una mejor expresión cuando la semilla se imbibió con NPs de forma de varita (Anexos 3 y 4).

Estos resultados indican que la aplicación de NPsZnO favorece el crecimiento y desarrollo de plántulas, ya que se observó un incremento en los valores obtenidos en las variables peso seco de plántula, longitud de plúmula (Anexo 3) y de radícula (Anexo 4), a través de la aplicación de las diferentes concentraciones de NPsZnO de ambas formas (hexagonal y varita).

Los resultados obtenidos en el presente bioensayo coinciden con lo señalado por Panwar *et al.* (2012) quienes reportaron un incremento en el crecimiento y producción de biomasa seca en plántulas de tomate cuando aplicaron 20 mg L^{-1} al follaje; además encontraron altas concentraciones de Zn en las hojas, confirmando la penetración por las estomas y su translocación basipétala vía floema.

Cuadro 2. Comparación de medias para variables evaluadas en el ensayo de germinación en semillas de maíz tratadas con NPsZnO de forma varita y hexagonal.

CONCENTRACIÓN (ppm)	VIGOR (%)	GER (%)	PA (%)	SSG (%)	PS (mg/plántula)	LP (cm)	LR (cm)
0	94 a	99 a	1 a	0 a	69.82 b	14.64 b c	19.53 a
0.5	95 a	98 a	2 a	0 a	81.23 ab	14.95 b	19.12 a b
1.0	93 a	97 a	2 a	1 a	77.08 b	14.56 b c	18.36 c
5.0	97 a	98 a	1 a	1 a	77.30 b	15.77 a	18.71 b c
10	96 a	98 a	1 a	1 a	77.77 b	14.37 c	18.47 b c
50	95 a	98 a	1 a	1 a	95.12 a	14.48 b c	18.87 a b c
X	95	98	1	1	79.72	14.80	18.84
Tukey	6.04	3.45	2.6	1.7	6.37	0.57	0.3

Valores con la misma literal en cada columna son estadísticamente iguales (Tukey, $\alpha = 0.05$); VIGOR = plántulas normales al primer conteo; GER = 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.

Cuadro 3. Comparación de medias para variables evaluadas en el ensayo de germinación en semillas de maíz tratadas con NPsZnO de forma varita y hexagonal por concentración.

FORMA	VIGOR (%)	GER (%)	PA (%)	SSG (%)	PS (mg/ plántula)	LP (cm)	LR (cm)
VARITA	96 a	98 a	1 a	1 b	74.40 b	15.16 a	19.24 a
HEXAGONAL	94 a	97 a	2 a	1 a	85.04 a	14.43 b	18.44 b
X	95	98	1.38	1	79.72	14.80	18.84
Tukey	2.37	1.35	1.01	0.64	6.37	0.57	0.30

Valores con la misma literal en cada columna son estadísticamente iguales (Tukey, $\alpha = 0.05$); VIGOR = plántulas normales al primer conteo; GER = 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.

Estudios realizados por Karunakaran *et al.* (2016) hacen mención que al evaluar el comportamiento de NPs macropartículas de óxido de metal seleccionadas en función de la germinación de semilla de maíz y alargamiento de raíz en diferentes condiciones de crecimiento (placa Petri, algodón y suelo), obtuvieron como resultado que todas las condiciones de crecimiento muestran resultados similares. Las NPs de aluminio (Al_2O_3) y titanio (TiO_2) redujeron significativamente el porcentaje de germinación, mientras que las NPs de sílice (SiO_2) y las macropartículas mejoraron la misma. Los resultados de las NPs y MPs de zirconia (ZrO_2) son similares a los anteriores. El alargamiento de la raíz se potencia mediante el tratamiento con NPs de SiO_2 y macropartículas de Al_2O_3 y TiO_2 . Los óxidos metálicos probados penetraron las semillas a nano escala en comparación con la macro escala. Este estudio destaca el impacto de las NPs en el medio ambiente y los sistemas agrícolas.

En otro estudio, se revisaron los impactos de diferentes concentraciones de TiO a granel en la germinación de la semilla y el crecimiento de plántulas de trigo. Los tratamientos experimentales incluyeron cinco concentraciones de granel (1, 2, 10, 100 y 500 ppm), cinco concentraciones de TiO a 1 nanómetro (1, 2, 10, 100 y 500 ppm) y un control (sin ningún TiO). Los resultados indicaron la longitud de los brotes, la longitud de las plántulas y las raíces secas se vieron afectadas significativamente por las concentraciones de TiO a granel y de tamaño nanométrico. Las longitudes de los brotes y las plántulas a concentraciones de 2 y 10 ppm de TiO nanométrico fueron mayores que las del control no tratado y TiO a granel a concentraciones de 2 y 10 ppm. Emplear TiO de tamaño nanométrico en una concentración adecuada podría promover la germinación de la semilla del trigo en comparación con el TiO a granel, pero en concentraciones elevadas tenía un efecto inhibitorio o de cualquier tipo sobre el trigo. Por otra parte, estudios realizados por Rajiv *et al.*, (2017) hacen mención que al aplicar NPs de Fe_2O_3 a

concentraciones de 100 mg/ml en semillas de frijol negro (*Vigna mungo*) promueve una máxima germinación a 200 ppm, la longitud de los brotes y las raíces fue baja cuando la concentración de NPs aumentó. Se demostró que esta nanopartícula de óxido de hierro sintetizado tiene buenas actividades biológicas y puede usarse para diversas aplicaciones.

En el mismo sentido, experimentos llevados a cabo muestran que las NPsAg sintetizadas generaron un efecto promotor sobre la germinación en la semilla de garbanzo que oscilan entre 20-50nm, la longitud de plántula, peso fresco, peso seco. En cuestión del pigmento mostraron un notable aumento en clorofila Sathiyarayanan y Nibiya (2016).

Otros estudios hacen referencia a que en semillas de maíz envejecida tratada con NPsAu en dosis de 5 a 15 ppm para activar la germinación y crecimiento temprano de las plántulas, las semillas imbibidas con 5 ppm mostraron incrementos de germinación en un 83 % en comparación con el testigo que mostró 43 %, por otro lado, al utilizar 10 ppm se mejoraron las propiedades fisiológicas y bioquímicas de las plántulas de maíz (Wuttipong, 2016).

Zhao *et al.* (2014) hacen mención que, en plantas de pepino cultivadas en maceta, obtuvieron incrementos significativos en longitud y biomasa seca de raíz con la incorporación al suelo de 400 y 800 mg kg⁻¹ de NPsZnO, estos investigadores indican que a concentraciones mayores no tuvieron efectos negativos en las plantas.

Por su parte Tarafdar *et al.* (2014) señalan que, mediante un trabajo experimental con NPsZnO encontraron efecto positivo en el crecimiento y biomasa seca en plantas de *Clusterbean*, indicando que las mejores respuestas obtenidas

con la aplicación de NPsZnO se deben a que intervienen en la síntesis de enzimas como la fitasa y la fosfatasa.

En contraste, estudios realizados por Siddiqui *et al.* (2015) en un trabajo establecido con *Pisum sativum*, reportan toxicidad en las plantas con aplicación de NPsZnO, mencionando que las NPs pueden actuar de manera distinta dependiendo de la forma de aplicación, ya sea vía foliar o a través del suelo.

Las NPs de Fe, Zn, Mn, y Cu, así como sus óxidos aplicados a plantas, se sugieren como fuentes de nutrientes en la producción de cultivos, ya que pueden llegar a tener potencial para aumentar el crecimiento de plantas, debido a que generan un incremento en la eficiencia del uso de micronutrientes por los cultivos, ya sea que se apliquen al sustrato o al follaje (Monreal *et al.*, 2015).

En este trabajo se observó que la aplicación de NPsZnO en forma de varita o hexagonal mejoran variables relacionadas con el vigor de la plántula, principalmente peso seco de plántula, longitud de plúmula y de radícula.

CONCLUSIONES

Acorde con los resultados obtenidos se puede concluir que la aplicación de NPsZnO estimula el crecimiento y desarrollo de plántulas durante el proceso de germinación.

Se observó que las variables peso seco de plántula, longitud de plúmula y longitud de radícula, muestran una respuesta positiva al utilizar concentraciones bajas de NPsZnO.

El porcentaje de germinación no mejoró al tratar la semilla con NPsZnO de forma varita o hexagonal, sin embargo, su efecto se observó posterior a la emergencia de la radícula, generando plántulas con raíces y tallos más largos.

Las NPsZnO de forma hexagonal estimulan de forma favorable el incremento en el peso seco de plántula, mientras que las NPsZnO de forma varita dan lugar a una respuesta propicia en las longitudes de plúmula y de radícula.

Se observó que al realizar la aplicación de 0.5 ppm se vio incrementado el peso seco de plántula y la longitud de radícula, sin embargo, al aplicar 50 ppm las plántulas presentan una tendencia similar.

En base a lo anterior se concluye que al utilizar bajas concentraciones de NPsZnO se genera un incremento notorio en las variables antes descritas, lo cual se traduce en un estímulo del crecimiento y desarrollo de plántulas durante las primeras etapas de crecimiento de los cultivos.

LITERATURA CITADA

- Afrayem, S. M. and A. K. Chaurasia. 2017. Effect of zinc oxide nanoparticles on seed germination and seed vigour in chilli (*Capsicum annuum* L.). Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry. 6(5):1564-1566.
- Alam, M. N., N. Roy, D. Mandal and N. A. Begum. 2013. Green chemistry for Nano chemistry: exploring medicinal plants for the biogenic synthesis of metal NPs with fine-tuned properties. RSC Adv., 3: 11935- 11956.
- Anandaraj, K. y N. Natarajan. 2017. Effect of Nanoparticles for Seed Quality Enhancement in Onion [*Allium cepa* (Linn) cv. CO (On)] 5. Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci. 6(11): 3714-3724.
- Aouada, F. A. and M. R. De Moura. 2015. Nanotechnology Applied in Agriculture: Controlled Release of Agrochemicals. In Nanotechnologies in Food and Agriculture. Springer International Publishing. pp. 103-118.
- Azimi, R., G. A. Heshmati and R. Kavandi. 2016. Evaluation of SiO₂ nanoparticles Effects on seed Germination in *Astragalus squarrosus*. Journal of Rangeland Science 6 (2):135-143.
- Ball, P. 2002. Natural strategies for the molecular engineer. Nanotechnology.13 (5): 15-20.
- Basra, A. S. 1995. Seed quality: basic mechanisms and agricultural implications. Basra, A. S. (ed.) Food - 106 - Products Press. Preface. New York, USA. 49 (12): 3907–3919.
- Bayuelo, A. 2015. Transcripción de la nanotecnología en la cosmética. La nanotecnología en la cosmética. pp. 142.
- Bewley, J. D. 1986. Membrane changes in seeds as related to germination and the perturbations resulting from deterioration in seed storage. In: Physiology of the seed deterioration. (M.B. McDonald Jr. & C.J. Nelson Eds.). CCSA: Madison, USA. pp. 22.

- Burman, U. and S. M. Kumar. 2013. Effect of zinc oxide nanoparticles on growth and antioxidant system of chickpea seedlings Toxicol. Environ. Chem. 95: 605-612.
- Buu, Q., T. Hien, H. Chau, X. Tin, T. Van, T. Duong and T. Ha. 2014. Effects of nano crystalline powders (Fe, Co and Cu) on the germination, growth, crop yield and product quality of soybean (Vietnamese species DT-51). Vietnam Academy of Science and Technology. 5:1-7.
- Cheng, H. N., K. T. Klasson, T. Asakura & Q. Wu. 2016. Nanotechnology in Agriculture. In Nanotechnology: Delivering on the Promise. 2:233-242. American Chemical Society.
- Chinnamuthu, C. R. and P. M. Boopathi. 2009. Nanotechnology and Agroecosystem. Tamil Madras Agric. J. 96 (6):17-31.
- Dasgupta, N., S. Ranjan y C. Ramalingam. 2017. Applications of nanotechnology in agriculture and water quality management. Environmental Chemistry Letters, 15(4), 591-605.
- Ferguson, J. 1995. An introduction to seed vigor testing. In: Seed vigor testing seminar. Zurich: International Seed Testing Association. Copenhagen Denmark. pp. 1-9.
- García López, J., F. Zavala García, E. Olivares Sáenz, N. A. Ruiz Torres, E. Ramos Cortez, I. Vera Reyes, B. Argüello Méndez, D. A. García Rodríguez y R. H. Lira Saldivar. 2017. Interacción de las nanopartículas de ZnO sobre la germinación y crecimiento temprano de plántulas de chile (*Capsicum chinense*). In: INTERNACIONAL SYMPOSIUM ON AGROBIO NANOTECHNOLOGY. Saltillo, Coah. UAAAN. pp. 306.
- Geetha, R. y S. V. Sahi. 2017. Enhanced plant growth promoting role of phycomolecules coated zinc oxide nanoparticles with P supplementation in cotton (*Gossypium hirsutum* L.). Plant Physiology and Biochemistry. 110: 118-127.

- González, G., F. M. Mendoza, J. Covarrubias, N. Morán, y J. A. Acosta. 2008. Rendimiento y calidad de semilla de frijol en dos épocas de siembra en la región del bajo. *Agricultura Técnica en México* 34 (4):421-430.
- Gutiérrez, C. E. 2007. Las nanopartículas: pequeñas estructuras con gran potencial. pp.6.
- Hampton, J. G. and D. M. Tekrony. 1995. Handbook of vigour test methods. 3rd Edition. International Seed Testing Assoc. Zürich, Switzerland. pp.117.
- Hullmann, A. 2006. The economic development of nanotechnology- An indicator based analysis, European Commission, DG Research, Unit "Nano S & T- Convergent Science and Technologies, Germany.
- Janmohammadi, M., N. Pornour, A. Javanmard, y N. Sabaghnia. 2016. Effects of bio-organic, conventional and nanofertilizers on growth, yield and quality of potato in cold steppe. *Botanica Lithuanica*. 22(2):133-134.
- Jiahui H., K. P. Johnson, and R. O. Williams. 2004. Nanoparticle engineering processes for Enhancing the Dissolution Rates of poorly water soluble drugs. *Drug Development and Industrial Pharmacy*. 30 (3): 233-245.
- Karunakaran, G., R. Suriyaprabha, V. Rajendran and N. Kannan. 2016. Influence of ZrO_2 , SiO_2 , Al_2O_3 and TiO_2 nanoparticles on maize seed germination under different growth conditions. *IET Nanobiotechnology*. 10(4):117-7.
- Karunaratne, D. N. 2007. Nanotechnology in medicine. *Journal of Natural Science*. 35 (3): 149-152.
- Khodakovskaya, M., M. E. Dervishi, M. Mahmood, Y. Xu, Z. Li, F. Watanabe and A. S. Biris. 2009. Carbon nanotubes are able to penetrate plant seed coat and dramatically affect seed germination and plant growth. *ACS nano*. 3 (10):3221- 3227.
- Lin, D. and B. Xing. 2007. Phytotoxicity of nanoparticles: inhibition of seed germination and root growth. *Environmental Pollution*. 150 (2): 247–249.

- Lira Saldívar, R. H., A. Hernández, L. A. Valdez, A. Cárdenas, L. Ibarra, M. Hernández y N. A. Ruiz Torres. 2014. *Azospirillum brasilense* and *Glomus intraradices* co-inoculation stimulates growth and yield of cherry tomato under shadehouse conditions. *Phyton International Journal of Experimental Botany*. pp. 133-138.
- Luo, Y., Y. J. Guan, Y. T. Li Huang and J. Hu 2015. Single counts of radicle emergence provides an alternative method to test seed vigour in sweet corn. *Seed Science and Technology*, 43: 519-525.
- Mahmoodzadeh, H., M. Nabavi and H. Kashef. 2013. Effect of nanoscale titanium dioxide particles on the germination and growth of canola (*Brassica napus*). *Journals of Ornamental and Horticultural Plants*. 3: 30.
- Mastronardi, E., P. Tsae, X. Zhang, C. Monreal y M. C. DeRosa. 2015. Strategic role of nanotechnology in fertilizers: potential and limitations. In *Nanotechnologies in Food and Agriculture*. pp. 25-67.
- Monreal, C. M., M. C. DeRosa, S. C. Mallubhotla, P. S. Bindraban y C. Dimkpa. 2015. Nanotechnologies for increasing the crop use efficiency of fertilizer-micronutrients. *Biology and Fertility of Solis*. 1:1-15.
- Navarro, M. 2009. Comportamiento interactivo de la germinación, la dormancia, la emergencia y el crecimiento inicial como atributos biológicos para evaluar el vigor de las semillas de *Albizia lebeck* (L.) Benth. PhD Thesis. Universidad Agraria de La Habana. Cuba. pp.101.
- Ocvirk, D., M. Spoljarevic, S. Markovic, M. R. Lisjak y T. Teklic. 2014. Seed germinability after imbibition in electrical conductivity test and relations among maize seed vigour parameters. *J. Food Agric. Environ.*12:140-145.
- Oropesa Nuñez, R. y U. J. Jáuregui Haza. 2012. Las nanopartículas como portador de fármacos: Características y perspectivas. *CENIC Ciencias Biológicas*. 43:3.
- Panwar, J., N. Jain, A. Bhargaya, M. Sayeed Akthtar and Y. Song Yuu. 2012. Positive effect of zinc oxide nanoparticles on tomato plants: A step towards

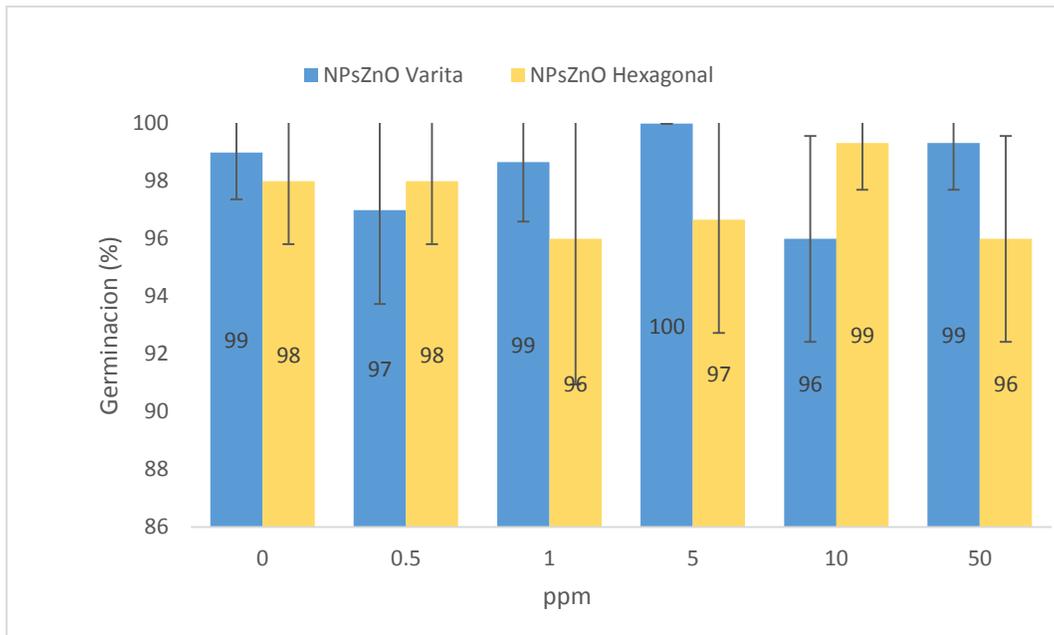
- developing nano-fertilizers. International Conference on Environmental Research and Technology (ICERT). Malaysia. pp. 8.
- Perlatti, B., P. L. de Souza Bergo, M. F. Fernandes da Silva, J. Bautista Fernades y M. R. Forim. 2013. Polymeric Nanoparticle-Based Insecticides: A Controlled Release Purpose for Agrochemicals. In Chapter from the book Insecticides-Development of Safer and More Effective. pp. 545-550.
- Prasad, R., V. Kumar y K. S. Prasad. 2014. Nanotechnology in sustainable agriculture: present concerns and future aspects. African Journal of Biotechnology. 13(6):705-713.
- Quispe Chalco, C. R. 2010. Nanotecnología en la agricultura. Revista de información, tecnología y sociedad. pp. 72-73.
- Rajiv, P., B. Bavadharani, M. Naveen Kumar and P. Vanathi. 2017. Síntesis y caracterización de nanopartículas de óxido de hierro piogénicas utilizando un enfoque de química verde y evaluando sus actividades biológicas. Bioacatálisis y Biotecnología Agrícola 2: 45-49.
- Raliya, R. and J. C. Tarafdar. 2013. ZnO nanoparticle biosynthesis and its effect on phosphorous mobilizing enzyme secretion and gum contents in cluster bean (*Cyamopsis tetragonoloba L.*). Agricultural Research. 2(1): 48-57.
- Ramesh, M., K. Palanisamy, K. Babu and N. Kumar Sharma. 2014. Effects of bulk and nano-titanium dioxide and zinc oxide on physio-morphological changes in (*Triticum aestivum Linn*). Journal of Global Biosciences. 3 (2): 415-422.
- Ruiz Torres, N. A., J. I. García López, R. H. Lira Saldívar, I. Vera Reyes y B. Méndez Argüello .2016. Efecto de Nanopartículas Metálicas y Derivadas del Carbono en la Fisiología de Semillas. In R.H. Lira Saldívar. y B. Méndez Arguello, Agronano Tecnología Nueva Frontera de la Revolución Verde, Saltillo, Coah. UAAAN. pp. 442-60.
- Ruiz Torres, N. A., L. I. Cruz Ruiz, R. H. Lira Saldívar, J. I. García López e I. Vera Reyes. 2017. Respuesta a la aplicación de nanopartículas de óxido de zinc y fierro, en el proceso germinativo de semilla de calabaza (*Cucurbita pepo*). In:

- International symposium on agrobio nanotechnology. Saltillo, Coah. UAAAN. pp. 306.
- Sabourin, V. and A. Ayende. 2015. Commercial Opportunities and Market Demand for Nanotechnologies in Agribusiness Sector. *Journal of Technology Management and innovation*.10 (1): 40-51.
- Saeid Hojjat, S. and H. Hojjat. 2016. Effects of silver nanoparticle exposure on germination of Lentil (*Lens culinaris* Medik.). *International Journal of Farming and Allied Sciences* 5 (3): 248-252.
- Sathiyarayanan, A. and K. Nibiya Banu. 2016. Las nanopartículas de plata-quintosano indujeron variaciones bioquímicas de garbanzo (*Cicer arietinum* L.). *Biocatálisis y Biotecnología Agrícola*. 8: 39-44.
- Savithramma, N., S. Ankanna and G. Bhumi. 2012. Effect of nanoparticles on seed germination and seedling growth of *Boswellia ovalifoliolata* – an endemic and endangered medicinal tree taxon. Department of botany Tirupati, Andhra Pradesh, India. pp. 63-64.
- Sedghi, M., M. Hadi, S. G. Toluie. 2013. Effect of nano zinc oxide on the germination parameters of soybean seeds under drought stress. *Annals. West. Univ. Timisoara Ser. Biol.*16 (2): 73-78.
- Serena, A. P. y A. Correia. 2003. Nanotecnología: el motor de la próxima revolución tecnológica. *Apuntes de Ciencia y Tecnología*. pp. 32-36.
- Shyla Krishna, K. and N. Natarajan. 2014. Customizing zinc oxide, silver and titanium dioxide nanoparticles for enhancing groundnut seed quality. *Indian Journal of Science and Technology*. 7:1376-1381.
- Siddiqui Manzer, H., H. Al-Whaibi Mohamed, F. Mohammad. 2015. Nanotechnology and Plant Sciences. *Nanoparticles and Their Impact on Plants*. Springer International Publishing Switzerland. pp.305.
- Siddiqui, H. M. and M. H. Al- Whaibi. 2014. Role of nano- SiO₂ in germination of tomato (*Lycopersicum esculentum* Mill). *Saudi Journal of Biological Sciences*. 21(1): 13 – 17.

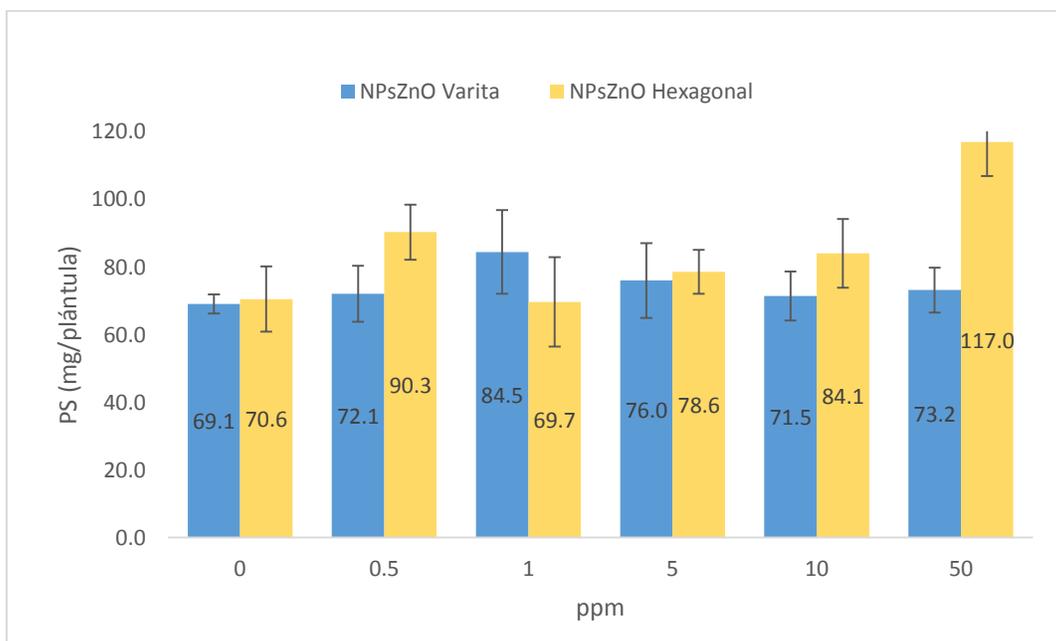
- Springer, C., R. Nair., S. H. Varghese, B. G. Nair, T. Maekawa, Y. Yoshida y D. Sakthi Kumar. 2010. Nanoparticulate material delivery to plants. *Plants Science*. 179 (3): 154-163.
- Tarafdar, J. C., R. Raliya, H. Mahawar, I. Rathore. 2014. Development of zinc nanofertilizer to enhance crop production in Pearl millet (*Pennisetum americanum*). *Agricultural Research*. 3: 257-262.
- Ulla, S. y M. Arshad. 2014. Exposure-Response of *Triticum aestivum* to titanium dioxide nanoparticles application: seedling vigor index and micronuclei formation. *Institute of Environmental Sciences and Engineering*. 20 (1): 57-61.
- Upadhyaya H., H. Roy, S. Shome, S. Tewari, M. K. Bhattacharya and S. Panda 2017. Physiological impact of Zinc nanoparticle on germination of rice (*Oryza sativa L*) seed. *Journal of Plant Science and Phytopathology*. Venkatachalam, P., N. Priyanka., K. Manikandan., I. Ganeshbabu. P. Indiraarulsevi., N.
- Villafuerte Robles, L. 2008. Nanotecnología Farmacéutica. Departamento de Farmacia de la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, Instituto Politécnico Nacional de México.
- Wittipong M., K. Ajit, P. Theerakulpisut, S. Maensiri and S. Phumying. 2016. Síntesis de nanopartículas de oro para promover la germinación de semilla de maíz. *Ciencia del medio ambiente*. 573: 89-90.
- Zhao, L., Y. Sun, V. J. Hernández., A. D. Servín, J. Hong, G. Niu, V. J. Peralta, G. M. Duarte and T. J. Garde. 2014. Influence of CeO₂ and ZnO nanoparticles on cucumber physiological markers and bioaccumulation of Ce and Zn: A Life Cycle Study. *Journal of agricultural and food chemistry*. 61:11945-11951.

ANEXOS

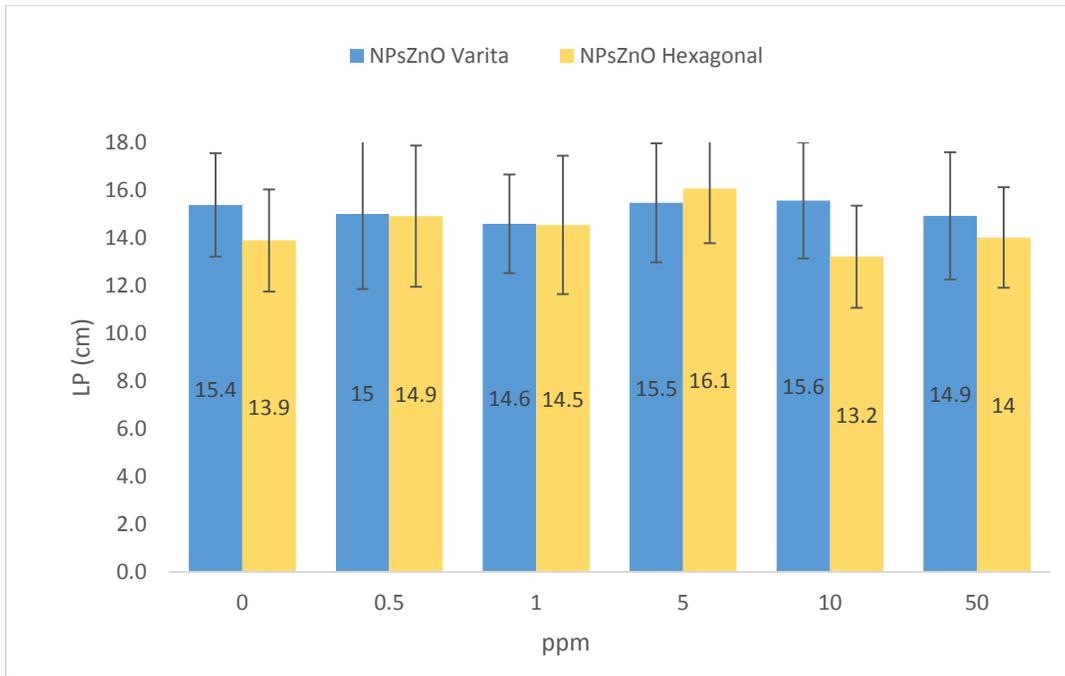
Anexo 1. Porcentaje de germinación en semillas de maíz en respuesta a la aplicación de NPsZnO en forma de varita y hexagonal.



Anexo 2. Peso seco (PS) en respuesta a la aplicación de NPsZnO en forma de varita y hexagonal.



Anexo 3. Longitud de plúmula (cm) en respuesta a la aplicación de NPsZnO en forma de varita y hexagonal.



Anexo 4. Longitud de radícula (cm) en respuesta a la aplicación de NPsZnO en forma de varita y hexagonal.

