

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO



Bioensayos de Germinación con la Aplicación de Nanopartículas de ZnO y ZnO+Fe y de Micropartículas de ZnO y QFe en Semillas de Pepino (*Cucumis sativus*)

Por:

LUIS HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ

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

Bioensayos de Germinación con la Aplicación de Nanopartículas de ZnO y ZnO+Fe y de Micropartículas de ZnO y QFe en Semillas de Pepino (*Cucumis sativus*)

Por:

LUIS HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

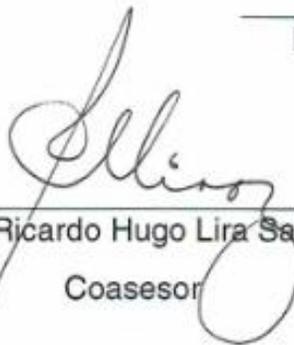
INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN

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.

Marzo, 2018.

DEDICATORIAS

A MIS PADRES

Sra. Araceli Hernández García y Sr. José Luis Hernández Bonilla. Porque gracias a ellos estoy en este mundo, y por ser los que siempre han creído en mí, brindándome su apoyo y plena confianza en cada uno de los momentos más difíciles a lo largo de mi vida, siendo mi mayor motivación para realizar cada una de mis metas planeadas, mostrándome siempre el buen camino e instruyéndome a no dejar de luchar por mis sueños, inculcándome valores, enseñanzas, consejos que a su debido tiempo llegaron a convertirme en un profesionalista de buenos principios, gracias eternamente.

A Janeth Esmeralda López Rodríguez

Gracias por el apoyo y tu amor brindado durante esta etapa de nuestras vidas, este es el principio de muchos más éxitos que nos esperan, para ello tendremos que trabajar duro y esforzarnos para cumplir nuestros sueños, cultivemos nuestro amor y cosecharemos éxitos y bendiciones en nuestras vidas.

A mis Hermanos: **Jesús Alberto Hernández Hernández y Brenda Araceli Hernández Hernández,** por todos aquellos buenos y malos momentos que hemos pasado juntos y por todo el apoyo y comprensión que me han brindado.

A mis Abuelos, Tíos y Primos. Por brindarme su apoyo y consejos en los momentos que más los necesite. Gracias por seguir unidos y por todos aquellos momentos en los que hemos convivido.

AGRADECIMIENTOS

A DIOS

Por darme la oportunidad de terminar mi carrera de forma adecuada, cuidándome e iluminando mi camino en cada momento, brindándome salud y sabiduría.

A MIS PADRES

Gracias por el apoyo brindado a lo largo de mi vida, por estar siempre en los buenos y malos momentos les agradezco infinitamente la confianza que en mi depositaron, gracias por los buenos valores que en mi inculcaron

A MI ALMA MATER

Por darme la oportunidad de formarme como profesionista, por haber recibido el apoyo necesario durante mi formación académica, gracias querida UAAAN porque en tus aulas conocí a personas extraordinarias, maestros y amigos, gracias por cada experiencia que me regalaste. ¡Buitre por siempre!

A la Dra. Norma Angelica Ruiz Torrez.

Por todo el apoyo recibido durante el transcurso de este trabajo, brindándome la confianza y dándome la oportunidad de desempeñar mis conocimientos adquiridos en mi formación, ya que sin su confianza este trabajo no hubiese sido posible.

Al Dr. Ricardo Hugo Lira Saldívar, por todo el apoyo recibido durante el transcurso de este trabajo, mostrando disposición y apoyo cuando éste ha sido requerido.

Al Mtro. Josué Israel García López, por todo el apoyo recibido en el trabajo de laboratorio.

Al Dr. Humberto de León Castillo, por brindarme y ofrecerme sus amplios conocimientos y aportaciones para mi formación académica.

A el Ing. Raúl Gándara Huitrón, quien siempre ha mostrado una disposición por aclarar mis dudas cuando estas se han presentado.

A mis Amigos. Roberto Hernández Tafoya, Marco Alberto Tapia Vázquez, Rosa María Chávez Mendoza, Araceli Alva Martínez, Héctor Alonso Hernández Meza, Rodrigo Grimaldo Santana. Sólo me queda agradecer por todos esos bellos momentos que se quedarán grabados en mi memoria donde compartimos alegrías, tristezas, aventuras, diversión y sobre todo por su compañía incondicional.

A María Isabel Cepeda Rodríguez, Alejandra Lizbeth Quintero Cepeda, Milena Arizbeth, Quintero Cepeda, Rosalinda Cepeda Rodríguez, Jesús Zavala Cepeda y Jesús Zavala Betancourt, por darme siempre ánimos en los momentos más frágiles, por sus consejos y por brindarme su apoyo, confianza y amistad.

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE CUADROS	ii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	iii
RESUMEN.....	4
I. INTRODUCCIÓN	6
HIPÓTESIS	7
OBJETIVO GENERAL.....	8
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	8
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	9
Nanotecnología (NT).....	9
Nanotecnología en la agricultura.....	10
Aplicación de las nanopartículas en la agricultura.....	11
Aplicación de NPs en semillas	11
Funciones del zinc.....	13
Nanopartículas de óxido de zinc.....	15
Aplicación de NPs y su fitotoxicidad	16
III. MATERIALES Y MÉTODOS	18
Ubicación del sitio experimental.....	18
Preparación de las soluciones con nanopartículas(NPs) y micropartículas (MPs).....	18
Imbibición de semillas de pepino (<i>Cucumis sativus</i>).....	18
Variables evaluadas en las semillas germinadas.....	19
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	21
V. CONCLUSIONES.....	30
VI. LITERATURA CITADA.....	31

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Tratamientos con NPs de ZnO, ZnO+Fe y de MPs de ZnO y QFe aplicadas en semillas de calabaza en condiciones de laboratorio.	19
Cuadro 2. Cuadros medios del análisis de varianza para las variables evaluadas en el bioensayo de germinación en semillas de pepino (<i>Cucumis sativus</i>), tratadas con nanopartículas y micropartículas de Zn y Fe.	22
Cuadro 3. Comparación de medias para las variables evaluadas en el bioensayo de germinación en semillas de pepino (<i>Cucumis sativus</i>), por tipo de partícula (Zn y Fe).....	25
Cuadro 4. Comparación de medias por concentración para las variables evaluadas en el bioensayo de germinación de semillas de pepino (<i>Cucumis sativus</i>), tratadas con NPs y MPs de Zn y Fe.....	28

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 porcentaje de vigor de germinación por tipo de partícula.....	37
Anexo 2 porcentaje de germinación por tipo de partícula	37
Anexo 3 longitud de vástago (cm) por tipo de partícula.	38
Anexo 4 longitud de radícula (cm) por tipo de partícula	38
Anexo 5 porcentaje de vigor de germinación por tipo de partícula y por concentración.	39
Anexo 6 porcentaje de germinación por tipo de partícula y por concentración.	39
Anexo 7 porcentaje de plántulas anormales por tipo de partículas y por concentración.	40
Anexo 8 longitud de vástago (cm) por tipo de partícula y por concentración.	40

RESUMEN

Bioensayos de germinación con la aplicación de Nanopartículas de ZnO y ZnO+Fe y de Micropartículas de ZnO y QFe en Semillas de Pepino (*Cucumis sativus*)

El presente trabajo se llevó a cabo en dos fases 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 nanopartículas (NPs) de ZnO y ZnO+Fe (quelato de hierro), y de micropartículas (MPs) de ZnO y QFe, como una opción para promover el vigor de germinación de semillas y el crecimiento de plántulas de *Cucumis sativus*.

Las soluciones con NPs de ZnO, ZnO+Fe y de MPs de ZnO, y QFe fueron preparadas en concentraciones de 0, 5 y 10 ppm en agua destilada, el testigo (0 ppm consistió en aplicar agua destilada). Posteriormente fueron dispersadas en cajas Petri añadiendo 20 ml de solución con la ayuda de una micropipeta, dejando imbibir por un periodo de 24 h. Posteriormente, las semillas fueron sembradas entre dos capas de papel Anchor con agua destilada, enrollando en forma de tacos para ser introducidos en una bolsa de plástico a una cámara bioclimática, a una temperatura de 25°C y un fotoperiodo de 16 horas luz y 8 horas oscuridad. El experimento se estableció en un diseño completamente al azar con arreglo factorial 4 x 3 (cuatro tipos de partícula y tres concentraciones).

Los datos fueron sometidos a un análisis de varianza para determinar diferencias estadísticas significativas 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 (2009).

Los resultados obtenidos indican que la aplicación de nanopartícula compuesta de Zn + Fe mejora notablemente la expresión de variables asociadas con los procesos de germinación y un efecto positivo en la longitud de plúmula y de radícula de plántulas de pepino (*Cucumis sativus*); a una dosis de 10 ppm genera un efecto positivo en el incremento del vigor de germinación y el porcentaje de germinación de las semillas, así mismo, se observó que las NPs ZnO, presentan una tendencia similar a lo antes mencionado, sin embargo, al aplicar 5 ppm existe un decremento en la expresión de estas variables generando un desarrollo anormal en la mayoría de las plántulas tratadas a dicha concentración, disminuyendo a la par el vigor de germinación de las semillas evaluadas en este ensayo.

Palabras clave; nanotecnología, zinc, hierro, germinación, vigor.

I. INTRODUCCIÓN

El uso de nuevas tecnologías está adquiriendo cada vez más protagonismo en la vida diaria, un ejemplo de ello es que la agricultura se está beneficiando enormemente de las aplicaciones nanotecnológicas.

La nanotecnología (NT) representa una de las más novedosas innovaciones científicas, y en muchos sentidos, la de mayor alcance en lo referente a la alta tecnología para la agricultura por su uso potencial y debido a su amplia variedad de aplicaciones potenciales, que son de gran relevancia en la investigación científica. De hecho, se ha acuñado el término nanobiotecnología, que combina numerosas disciplinas científicas, tan variadas como la biotecnología, la nanotecnología, el procesamiento químico, la ciencia de los materiales y la ingeniería de sistemas (Maine *et al.*, 2013).

Al igual que en otros sectores, la nanotecnología promete revolucionar toda la cadena alimentaria, desde la producción hasta el procesamiento, almacenamiento y desarrollo de materiales innovadores, productos y aplicaciones en la agricultura y medicina (Heath, 2008).

Las nanopartículas (NPs) se clasifican en orgánicas o inorgánicas, en función de sus características químicas, su capacidad para transportar diferentes ingredientes y para reaccionar frente a diferentes condiciones medioambientales. Muchas de las nanopartículas inorgánicas son modificaciones de aditivos alimentarios. Las nanopartículas orgánicas se emplean principalmente para mejorar el valor nutritivo de los alimentos, utilizándose como vehículo para la liberación de vitaminas y otros nutrientes que favorecen a organismos (Chalco, 2009).

Entre las más destacadas aplicaciones de NPs en la agronomía, Panwar *et al.* (2012) señalan que hacen una contribución significativa hacia la meta de

rendimiento de los cultivos. Recientemente, las nanopartículas han recibido una atención considerable por su efecto promotor y/o inhibidor en plantas, ya que sus características físico-químicas y de tamaño, les permite penetrar fácilmente a través de la membrana celular, de tal manera es importante estudiar la respuesta de organismos vivos a la aplicación de altas y bajas concentraciones de NPs.

Con la finalidad de entender cuáles son los posibles beneficios de la aplicación de la NT en la agricultura, es necesario plantearse objetivos y realizar investigaciones en diferentes etapas en la producción de cultivos, siendo así la aplicación de NPs en semillas, ya que la germinación es la primera etapa del establecimiento eficiente de los cultivos, por lo tanto, uno de los primeros objetivos a analizar para conocer el efecto que tiene sobre procesos fisiológicos.

Con base en lo antes mencionado, se presentan los resultados obtenidos de la evaluación durante el proceso germinativo de semillas de pepino (*Cucumis sativus*) mediante la aplicación de NPs ZnO y ZnO+Fe, y micropartículas (MPs) de ZnO y QFe (quelato de hierro), a diferentes concentraciones.

HIPÓTESIS

Al menos una de las NPs ZnO y ZnO+Fe, o micropartículas (MPs) de ZnO y QFe, promueve el vigor de germinación y el desarrollo de plántulas en semilla de pepino. Por lo tanto, en tratamientos con NPs se esperan obtener plántulas de mayor porte, en comparación con el testigo.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la respuesta del proceso germinativo y el comportamiento de plántulas de pepino obtenidas de semillas tratadas con NPs ZnO y de ZnO+Fe y con micropartículas de ZnO y de ZnO+Fe.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar el efecto de la aplicación de nanopartículas de ZnO y ZnO+Fe, y de micropartículas ZnO y QFe, en la germinación de semillas de pepino.
- Analizar el efecto de NPs ZnO ZnO+Fe, y las micropartículas de QFe y ZnO- en el crecimiento temprano de plántulas de pepino (*Cucumis sativus*) bajo diferentes concentraciones

II. REVISIÓN DE LITERATURA

Nanotecnología (NT)

Actualmente ya se encuentran algunas aplicaciones prácticas de la nanotecnología y se prevé que habrá muchas más, por lo cual, es necesario evaluar el impacto que tendrían; los países desarrollados ya cuentan con programas para financiar investigaciones en este campo, y recientemente, México y otros países latinoamericanos han hecho lo propio, en investigación y las aplicaciones de la nanociencia y la nanotecnología. (Mendoza y Rodríguez, 2006).

En otro sentido, la NT se refiere a estructuras de un tamaño que van de 1 a 100 nm. La nanotecnología trabaja con variedad de tamaños de estructuras (Farokhzad y Langer, 2009), sin embargo, la verdadera nanotecnología se refiere a estructuras con dimensiones menores a 100nm.

Por lo que la palabra nanotecnología se usa extensivamente para definir las ciencias y técnicas que se aplican al nivel de nano-escala, es decir, medidas extremadamente pequeñas, nanos que permiten trabajar y manipular las estructuras moleculares y sus átomos. En síntesis, esta tecnología conduciría a la posibilidad de fabricar materiales y máquinas a partir del reordenamiento de átomos y moléculas extremadamente pequeñas. Que al reducir la materia a dimensiones extremadamente pequeñas de partículas y ser manipuladas, demuestran propiedades totalmente diferentes (Castillo, 2012).

La NT promete ser la próxima revolución tecnológica. Aunque es presentada como una tecnología limpia y benéfica (Foladori y Invernizzi, 2005) ya está generando considerable debate y rápidamente han emergido controversias a propósito de sus posibles impactos sobre la salud y el medio ambiente.

Nanotecnología en la agricultura

La NT es un área nueva de investigación y elaboración de materiales industriales con base en la creación de nuevas clases de estructuras moleculares originales, muestra rápidos avances que prometen cambiar radicalmente o afectar muchas disciplinas de la ciencia y la tecnología. Además, ofrece innumerables posibilidades para el progreso humano, mediante la creación de varios tipos de nanomateriales aplicables en revolucionarios tratamientos médicos, en la investigación agrícola y métodos de diagnóstico de inocuidad alimentaria (Molins, 2008).

Las aplicaciones de la NT en los sistemas agrícolas son diversas, ofreciendo el potencial para mejorar significativamente su productividad y eficiencia, al reducir costos y cantidades de agroquímicos aplicados. Las NPs metálicas de óxido de zinc, cobre y hierro, ya sean puras o mezcladas con plata, están siendo estudiadas globalmente por su potencial agrícola como promotores de crecimiento, nano-fertilizantes y anti-microbiales (Méndez-Argüello *et al.*, 2016).

Srilatha, *et al.*, (2011) mencionan que las nanopartículas son materiales suficientemente pequeños, que les permite estar dentro del rango nanométrico, con al menos una de sus dimensiones de menos de unos pocos cientos de nanómetros. La agricultura es un área que requiere de la aplicación de nuevas tecnologías para mejorar el rendimiento de los cultivos. La agronanotecnología implica el empleo de nanopartículas en la agricultura, el surgimiento de la nanotecnología y el desarrollo de nuevos nanodispositivos y nanomateriales abren nuevas aplicaciones potenciales en la agricultura y la biotecnología.

Por lo tanto, el desarrollo y aplicación de la nanotecnología en la agricultura requiere la formación de grupos interdisciplinarios, debido a la conjunción de campos del conocimiento que son incluidos, de esta manera se buscan generar técnicas de bajo impacto ambiental, que involucren actividades como diseño, preparación, evaluación, así como, efectos y transformación. En el área agrícola y ambiental las NPs son importantes por su uso potencial en resolver problemas,

respecto a la producción agrícola, la premisa básica es reducir al mínimo las pérdidas y disminuir los efectos adversos en el ambiente por el uso excesivo de insumos agrícolas, como fertilizantes y plaguicidas (Carrillo y González-Chaves, 2009)

Aplicación de las nanopartículas en la agricultura

Las inversiones en agricultura y alimentación nanotecnológica van en aumento, debido a que sus beneficios potenciales se enfocan a mejorar la calidad, cantidad e inocuidad de los insumos agrícolas para el humano al ser utilizados en menor volumen y promoviendo mejoras en la nutrición (Razzaq *et al.*, 2016). Lo que garantizaría la seguridad alimentaria a través de impulsar la producción agrícola.

En la agricultura la aplicación de NT se ha visto con un mayor interés en partículas en el desarrollo de nuevos nano-pesticidas y nano-fertilizantes, también llamados nano-agroquímicos, Kah *et al.* (2012), con la finalidad que, al liberarlos la contaminación al medio ambiente sea de menor impacto.

Por otra parte, la aplicación de nanopartículas en una gran serie de cultivos ha mostrados una mejora en la germinación, crecimiento y calidad de plántulas, así como un cambio positivo en la expresión de genes que indican una mejora en variedad de cultivos (Kole *et al.*, 2013). Buscando un aumento en biomasa y mayor contenido nutricional reduciendo las aplicaciones de productos de síntesis química.

Aplicación de NPs en semillas

Los principales atributos de calidad en una semilla son: fisiológico, sanitario, físico y genético. Estas cualidades de una semilla pueden asegurar el establecimiento de cultivo, generando una buena producción para agricultores. Indiscutiblemente, la semilla de buena calidad representa el insumo estratégico por excelencia que permite sustentar las actividades agrícolas, contribuyendo

significativamente a mejorar su producción en términos de calidad y rentabilidad. Por tal motivo, son de gran interés científico-técnico los trabajos encaminados a estimular y prolongar la germinación y posterior conservación de las semillas, para poder elevar la productividad de los cultivos de forma sostenible y enfrentar los cambios en el entorno de manera más apropiada (Doria, 2010).

Marcos (2015) indica que la evaluación del vigor de la semilla tiene muchas implicaciones importantes para la industria de semillas, como un monitoreo básico del potencial fisiológico de la semilla durante las diferentes fases de producción de semillas y un apoyo para decisiones estratégicas con respecto a la selección de lotes de semilla de alta calidad para satisfacer la demanda del consumidor. Tomando en cuenta los cuatro atributos de calidad (físico, genético, fisiológico y sanitario) y así contar con altas probabilidades de producir un cultivo sano y con mayor rendimiento.

Durante el almacenamiento y el tiempo en que permanecen almacenadas, los mecanismos de deterioro de la semilla disminuyen la germinación, la velocidad de crecimiento de la plántula y la tolerancia a condiciones adversas (Pichardo *et al.*, 2010). Por lo que, el vigor de semillas disminuye, la germinación se reduce y por ende la semillas muere.

Las NPs pueden desempeñar un papel importante en la agricultura, como fertilizantes compuestos y nanopesticidas, actuando como agentes de entrega de productos químicos que dirigen las moléculas a orgánulos celulares específicos en las plantas, además pueden ser usadas en diversas especies de plantas para promover la germinación (NPs ZnO) y crecimiento de plántulas (Siddiqui *et al.*, 2015).

En la agricultura, las semillas tratadas con un recubrimiento de NPs son llamadas semillas inteligentes (Chinnamuthu y Boopathi, 2009). Con ello, la productividad de los cultivos se mejora y su germinación; también, se asegura el establecimiento de los cultivos en campo en condiciones favorables.

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, obteniendo plántulas vigorosas, debido principalmente a la penetración de NPs en la semilla, lo que permiten aumentar la imbibición de agua y micronutrientes y beneficiando a las primeras etapas del proceso germinativo de las semillas (Mahmoodzadeh *et al.*, 2013).

Estudios recientes indican que, en semillas de tomate, aplicando tratamientos de NPs, en cajas Petri por 24 h, con diferentes niveles de NPs_{Cu} y MPs_{CuSO₄} (micro partículas de CuSO₄) en concentraciones de 0, 0.5, 1.0, 5.0, 10.0 y 50 ppm, se encontró que las NPs_{Cu} a 5 y 10 ppm promueven el vigor de germinación de las semillas. Por otra parte, el tratamiento con 10 ppm incrementó la longitud del tallo y el tratamiento con 5 ppm la longitud de radícula (Ruiz-Torres *et al.*, 2016).

Por otra parte, Juárez *et al.* (2016) mencionan que el uso de nanopartículas como nanocobre (NPs_{Cu}) son muy útiles en la agricultura, ya que al realizar la aplicación muestran un mayor un crecimiento de plántulas y rendimiento obteniendo una mayor calidad del fruto.

Estudio realizado por Abbasi *et al.* (2016), indicaron que la aplicación de NPs de sílice y de plata a una concentración de 20 y 60 %, al evaluar la germinación de semillas de *Thymus kotschyanus*, se encontraron valores más altos (20 %) en los parámetros de germinación de la semilla en los tratamientos con nano-plata. El aumento de la concentración de nanopartículas de plata manifestó una disminución de la germinación.

Funciones del zinc

El zinc es un micronutriente esencial para el crecimiento y la mejora de plantas y es utilizado en gran diversidad de cultivos, desempeña la posición más

importante en varias rutas metabólicas y es esencial para activar varias enzimas como el superóxido dismutasa, triptófano sintetasa y deshidrogenasas (Narendhran *et al.*, 2016).

Aunque el zinc es uno de los nutrientes minerales esenciales a bajas concentraciones, es muy tóxicos en cantidades altas. Algunos fungicidas pueden incrementar el contenido de zinc en plantas cultivadas y en el suelo. Casierra-Posada y Poveda, (2005) indicaron que altas concentraciones de Zn^{++} reducen el área foliar y la producción de materia seca. La calidad de la fruta se mostró afectada por este metal en plantas tratadas con altas concentraciones, se les redujo el diámetro y disminuyó el contenido de clorofila y carotenos en las hojas.

Por otra parte, Méndez-Argüello *et al.* (2016) mencionan que el efecto promotor de crecimiento de las NPs de ZnO+Ag y de las NPs de ZnO atribuyen a la actividad del zinc, como precursor de la producción de auxinas que promueven división y elongación celular; así como por su influencia en la reactividad del ácido indolacético, el cual actúa como fitoestimulante hormonal. También, puede ser factible que estas NPs estén involucradas en la biosíntesis de citoquininas y giberelinas.

Un estudio realizado por Burman *et al.* (2013), revela que la aplicación foliar de 1, 5 y 10 mg L⁻¹ de NPs ZnO durante un periodo de 15 días en plantas de garbanzo (*Cicer arietinum*), promovieron mayor altura y biomasa seca. Se destaca que la aplicación de zinc en forma de nanofertilizante aplicado directamente a la parte aérea del cultivo en bajas dosis es más eficiente para promover el crecimiento de este, esto se debe a que el zinc es requerido para la producción de biomasa, así como también este microelemento tiene una función muy importante en el Metabolismo de las auxinas, Síntesis de citocromos y nucleótidos y Producción de clorofila para en proceso fotosintético.

Nanopartículas de óxido de zinc

Dentro de la nanotecnología se habla de NPs metálicas, especialmente de plata y óxido de zinc, ya que son de las más estudiadas por sus propiedades antimicrobianas dentro de diversas áreas como son: la industria, medicina y alimentación animal (Alvarado *et al.*, 2014).

El ZnO es un metal de transición y un semimetal que puede reaccionar con ácidos y bases generando agua y sal. Es un material semiconductor, es relativamente barato y presenta una baja toxicidad, siendo muy efectivo en la protección contra los rayos UV. Es un material excelente para la fabricación de pantallas solares, porque absorbe los rayos ultravioletas y combate los potenciales problemas asociados a la exposición al sol (Martinello *et al.*, 2012).

Por otro lado, en la agricultura las NPs de óxido de zinc actúan con un gran efecto antifúngico (Lira-Saldivar *et al.*, 2014). Como una alternativa en el uso de fungicidas sistémicos, los cuales tienen un efecto residual en los agroecosistemas debido al negativo impacto que ocasionan.

Jayarambabu *et al.* (2014) mencionan que el efecto positivo de las NPs ZnO en las plantas incluye un mayor porcentaje de germinación, crecimiento temprano de plántulas, incremento en la longitud de radícula y mayor acumulación de biomasa, debido a una mayor actividad fotosintética.

Estudios realizados con semillas de cacahuate, que fueron tratadas por separado con diferentes concentraciones de óxido de zinc (ZnO) y sulfato de zinc a granel quelado (ZnSO₄) (un suplemento de zinc común), respectivamente, a una concentración de 1000 mg L⁻¹ de NPsZnO, indican que promueve tanto la germinación de semillas y el vigor de las plántulas y, a su vez mostró establecimiento temprano en el suelo que se manifiesta por la floración temprana y mayor contenido de clorofila de la hoja (Prasad *et al.*, 2012).

En el mismo sentido Raskar y Laware (2014), mencionaron que las NPs ZnO tienen una potencial aplicación como agentes bacteriostáticos y se pueden utilizar para controlar la propagación e infección de diversos patógenos. Por lo que, en semillas de cebolla tratadas con NPs a concentraciones de (0,0, 10, 20, 30, 40 ppm) estudiando su efecto sobre estas, se observó que, a menor concentración, la germinación aumento, sin embargo, mostró disminución en valores a concentraciones más altas.

Existen reportes que indican que las NPs de ZnO incrementan el nivel de AIA en raíces y en los brotes apicales provocando un aumento en el crecimiento de plantas, promoviendo de esta forma el aumento de biomasa seca en las plantas, en semillas de cacahuete con las nanopartículas sintetizadas de óxido de zinc (ZnO), plata (Ag) y dióxido de titanio (TiO₂) superó en la mejora de la germinación (75%), la longitud de la raíz y por lo tanto el índice de vigor (Shyla y Natarajan, 2014).

Por otra parte, Sheykhbaglou *et al.* (2010) encontraron que la aplicación de NPs de óxido de nano-hierro sobre el cultivo de soja mejoró el rendimiento de grano y mayor peso seco de la vaina. El experimento determinó que a concentraciones de 0.75g fue aumentando el peso seco de la vaina. El mayor rendimiento de grano se observó con el uso de 0.05 g de óxido de nano-hierro.

Aplicación de NPs y su fitotoxicidad

La aplicación de NPs en cualquier área es relativamente nueva, por lo que se desconoce los posibles efectos negativos que pudiera tener, sobre todo en los cultivos, donde es factible que haya fitotoxicidad.

Zhang *et al.* (2015) investigaron la fitotoxicidad de las NPs ZnO sobre la germinación de semillas de maíz (*Zea mays L.*) y de pepino (*Cucumis sativus L.*). En la prueba de elongación de la raíz, todas las plántulas fueron afectadas al ser expuestas a una concentración de 1,000 mg L⁻¹, mostrando afectaciones en radícula.

Gutiérrez-Praena *et al.* (2009) mencionan que los humanos están expuestos a estas nanopartículas, las cuales se pueden adquirir vía respiratoria (nanopartículas suspendidas en el aire), dérmica (nanopartículas ambientales, cosméticos) y oral (alimentos, agua). La exposición también se puede producir a través de la instrumentación médica o prácticas clínicas, ya que se usan, por ejemplo, en el tratamiento y diagnóstico del cáncer de mama y en el control de infecciones en cirugía. Aún se desconoce su efecto al estar sometidos por largo tiempo.

Aunque, estos materiales tienen características deseables para aplicaciones industriales, ya que los materiales nanoestructurados a menudo exhiben propiedades beneficiosas, desde absorbanza UV en protector solar hasta lubricación de motores sin aceite. Los estudios en animales y humanos muestran que las nanopartículas inhaladas se eliminan de manera menos eficiente que las partículas más grandes, las nanopartículas pueden translocarse a muchos tejidos y órganos a través del sistema circulatorio, linfático y nervioso. La clave para comprender la toxicidad de las nanopartículas se basa en su diminuto tamaño, ya que al ser más pequeño que las células, les permite penetrar estructuras biológicas básicas, alterando su función normal (Buzea *et al.*, 2007).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación del sitio experimental

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), Buenavista, Saltillo, Coah.

Preparación de las soluciones con nanopartículas y micropartículas (MPs)

Las soluciones con NPs de ZnO y ZnO+Fe y con MPs de ZnO y QFe, se prepararon incorporando las partículas en agua destilada, en concentraciones de 0, 5 y 10 ppm. Posteriormente se mezclaron con un vortex marca Lab-net por 20 minutos, en dos tiempos de 10.

Imbibición de semillas de pepino (*Cucumis sativus*)

Para determinar el efecto de las NPs y de las MPs en la germinación de semillas de pepino (*Cucumis sativus*), se establecieron bioensayos que constaron de cuatro tipos de partícula (NPsZnO y NPsZnO+Fe; y MPsZnO y MPsuQFe), tres concentraciones (0, 5, y 10 ppm), con tres repeticiones de 25 semillas cada una (Cuadro 1). Posterior al tratamiento y con la ayuda de pinzas de disección, las semillas se sembraron entre dos capas de papel Anchor, humedecido con agua destilada, enrollando en forma de "taco", estos fueron puestos en bolsas de polietileno transparente y colocados en contenedores de plástico, para luego ser introducidos a una cámara bioclimática a una temperatura de 25°C y un fotoperiodo de 16 horas luz y 8 horas oscuridad. Los ensayos se establecieron en un diseño completamente al azar con arreglo factorial 4 x 3.

Cuadro 1. Tratamientos con NPs de ZnO, ZnO+Fe y MPs de ZnO y QFe aplicadas en semillas de calabaza en condiciones de laboratorio.

Tratamiento	Concentración
NPs/MPs	ppm
NPsZnO	0
	5
	10
NPsZnO+Fe	0
	5
	10
MPsZnO	0
	5
	10
MPsQFe	0
	5
	10

ppm = partes por millón; NPs = nanopartículas; MPs = micropartículas.

VARIABLES EVALUADAS EN LAS SEMILLAS GERMINADAS

- Primer conteo de plántulas normales:** Se realizó cuatro días después de la siembra, esta evaluación es un indicador del vigor que posee la semilla para germinar en menor tiempo y establecerse en condiciones de campo, el resultado fue expresado en porcentaje.
- Plántulas normales (PN):** al final del bioensayo se realizó un segundo conteo de plántulas normales. Se entiende por plántulas normales aquellas que poseen todas sus partes (vástago y radícula) sin ninguna anomalía visible, esto al octavo día después de la siembra.

- **Plántulas anormales (PA)**, todas aquellas que carecen de plúmula o radícula, o presentan un desarrollo irregular de alguna de sus estructuras, el resultado fue expresado en porcentaje.
- **Semillas sin germinar (SSG)**, todas aquellas semillas duras o muertas que no tuvieron la capacidad de germinar, el resultado se expresó en porcentaje.
- **Longitud media de vástago (LV) y Longitud media de radícula (LR)**, se midieron todas las plántulas normales por repetición, esto es que no presentaran rasgo alguno de anormalidad, la medida fue expresada en cm.
- **Peso seco de plántula (PS)**, esta variable se obtuvo una vez determinadas todas las variables anteriores, se realizó después de un secado de aquellas plántulas consideradas normales, el secado tuvo una duración de 24 horas en una estufa marca Riosa H-48 a 72 °C. Pasadas las 24 horas se extrajeron, y se dejaron en un desecador, posteriormente fueron pesadas en una balanza analítica marca Precisa BJ610C, el resultado fue expresado en (mg plnatula⁻¹)

El experimento se estableció utilizando un diseño completamente al azar con arreglo factorial. Los datos se sometieron 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 versión 9.1.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo con los resultados obtenidos en el análisis de varianza (Cuadro 2) del bioensayo de germinación de semillas de pepino (*Cucumis sativum*) para la fuente de variación tipo de partícula existen diferencias altamente significativas ($P \leq 0.01$) para las variables vigor de germinación, longitud de vástago y de radícula, mientras que el porcentaje de germinación y de plántulas anormales presentaron diferencias significativas ($P \leq 0.05$).

Para la fuente de variación concentración los resultados indican que existen diferencias ($P \leq 0.01$) para el vigor de germinación, porcentaje de germinación, porcentaje de plántulas anormales, peso seco de plántula, longitud de vástago y de radícula.

En el caso de la interacción tipo de partícula por concentración, se mostraron diferencias altamente significativas ($P \leq 0.01$) para las variables porcentaje de plántulas anormales, longitud de vástago y longitud de radícula. Mientras que el porcentaje de vigor de germinación, la germinación final y semillas sin germinar indicaron diferencias significativas ($P \leq 0.05$), sin embargo, para la variable peso seco de plántula no se detectaron diferencias estadísticas.

Lo anterior hace referencia a que la aplicación de nanopartículas y micropartículas metálicas genera una influencia positiva en la manifestación de algunas de las variables estudiadas en este bioensayo, las cuales tienen una estrecha relación con los procesos de imbibición, metabolismo, vigor de germinación, así como crecimiento de vástago.

Cuadro 2. Cuadrados medios del análisis de varianza para las variables evaluadas en el bioensayo de germinación en semillas de pepino (*Cucumis sativus*), tratadas con nanopartículas y micropartículas de Zn y Fe.

F.V.	GL	VIGOR	GERM	PA	SSG	PS	GL	LV	LR
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(mg/plántula)		(cm)	(cm)
NPMP	3	502.51**	46.66*	59.25*	1.62NS	1.35NS	3	64.98**	139.49**
CONC	2	745.33**	189.77**	256.00**	3.11NS	3.89**	2	75.66**	117.14**
NPMP*CONC	6	241.62*	45.77*	73.48**	4.29*	0.80NS	6	18.96**	47.40**
ERROR	24	93.33	13.33	18.22	1.33	0.55	817	4.38	4.76
CV %		13.17	3.91	64.03	207.84	4.86		23.26	19.99

**, * Niveles de significancia al 0.05 y 0.01, respectivamente. NPMP=Tipo de partícula (Nano o Micro); CONC= Concentración; F.V. Fuente de variación; GL= Grados de libertad; VIGOR= Plántulas normales al primer conteo; GERM= 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.

En la comparación de medias por tipo de partícula (Cuadro 3), los resultados mostraron diferencias estadísticas para el vigor de germinación, porcentaje de germinación, porcentaje de plántulas anormales, longitud de vástago y longitud de radícula, sin embargo, las variables porcentaje de semillas sin germinar y peso seco de plántula no presentaron diferencias estadísticas.

La aplicación de NPs-ZnO generó los mejores resultados para la promoción del vigor de germinación (81 %), superando en 24.61 % al tratamiento con NPs ZnO+Fe, sin embargo, los tratamientos con (MPs ZnO, NPs ZnO+Fe, MPs QFe) fueron estadísticamente iguales. Esta variable está relacionada principalmente con el metabolismo de las semillas, esto es, la segunda fase del proceso de germinación, indicando la velocidad con la que germina la semilla al cuarto día después de la siembra (Anexo 1).

Los resultados también indican que la variable porcentaje de germinación, no se reduce con la aplicación de MPsZnO (96 %), NPsZnO+Fe (92 %) y MPsQFe (93 %), siendo estadísticamente iguales al testigo (Anexo 2), mostrando que al menos no existe fitotoxicidad.

En cuanto a las variables LV y LR (Cuadro 3), los resultados indican que al aplicar MPs QFe y NPs ZnO+Fe se incrementó el desarrollo de estas variables, sin embargo, el máximo valor se obtuvo con MPs QFe, superando en 13.68 % y 15.5 % respectivamente, al tratamiento que presentó el menor desarrollo (NPs ZnO).

Se observó que las NPsZnO+Fe y MPsQFe tienen un efecto positivo en la velocidad de germinación de las semillas, favoreciendo también el desarrollo de plántulas, indicando una mayor elongación celular, lo anterior indica que estas NPs tienen un efecto promotor del vigor, el cual está íntimamente relacionado con el metabolismo que se realiza durante el proceso de germinación.

Esto podría deberse a que el Zn^{++} participa en la vía de síntesis del aminoácido triptófano, precursor en la síntesis del ácido indol acético (AIA), regulador del crecimiento y desarrollo de los brotes y hojas. Y el hierro, fue reportado por Yasmeeen *et al.* (2016), como promotor de la germinación, al aplicar en semillas

de trigo nanopartículas de hierro, asimismo se obtuvo mayor crecimiento de raíz y de plúmula. Por otra parte, estudios realizados por Esparza Arredondo (2016) indican cambios estadísticamente significativos en longitud de radícula y vástago con la aplicación de NPsZnO, ZnO+Ag, CuO y Fe₂O₃ en *Cucumis sativus*.

Cuadro 3. Comparación de medias para las variables evaluadas en el bioensayo de germinación en semillas de pepino (*Cucumis sativus*), por tipo de partícula (Zn y Fe).

Partícula	VIGOR (%)	GERM (%)	PA (%)	SSG (%)	PS (mg/plántula)	LV (cm)	LR (cm)
NPsZnO	81a	91 b	9a	0a	15.93a	8.33 c	10.02 b
MPsZnO	69a b	96a	4 b	0a	15.18a	8.82 bc	10.52 b
NPsZnO+Fe	65 b	92ab	7ab	1a	15.19a	9.34ab	11.50a
MPsQFe	78a b	93ab	6ab	1a	15.09a	9.47a	11.58a
\bar{x}	73	93	6	1	15.35	4.38	4.76
Tukey (0.05)	12.56	4.74	5.55	1.50	0.97	0.53	0.55

Medias con la misma literal son estadísticamente iguales, Tukey (0.05); VIGOR= Plántulas normales al primer conteo; GERM= 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 efectuar la comparación de medias por concentración (Cuadro 4), estadísticamente resultaron diferentes las variables vigor de germinación, porcentaje de germinación, porcentaje de plántulas anormales, peso seco de plántula, longitud de vástago y longitud de radícula, no así el porcentaje de semillas sin germinar.

Cabe destacar que el porcentaje de vigor de germinación y el porcentaje de germinación, presentan resultados estadísticamente iguales al testigo, sin embargo, a una concentración de 5 ppm el vigor y la germinación presentó un decremento de 18.98 % y 7.36 %, en comparación con el testigo (Cuadro 4)

El vigor es considerado como la habilidad para la emergencia en condiciones ambientales desfavorables y el desempeño de las semillas posterior al almacenamiento, por lo que es considerado un parámetro sumamente importante en la calidad fisiológica de las semillas, particularmente en la retención de la capacidad germinativa (Hampton y Tekrony, 1995).

Por otra parte, Navarro *et al.* (2009) indicaron que el vigor puede ser considerado como la interacción de aquellas propiedades que determinan el comportamiento de la germinación y la emergencia. Por ello, el vigor no puede ser desvinculado como parte esencial de la calidad de las semillas.

En el caso del peso seco de plántula, la aplicación de 5 y 10 ppm a las semillas durante la imbibición, generó resultados positivos, ya que las plántulas presentaron en promedio 15.69 y 15.66 mg plántula⁻¹ respectivamente.

Por otra parte, algunos autores mencionan que el efecto promotor o inhibidor del crecimiento de las NPs en las plantas está relacionado con su concentración, tamaño y las propiedades inherentes del elemento involucrado, así como la función fisiológica y bioquímica que desempeñan en la planta, y si actúa como micronutriente tratándose de zinc, se argumenta que podrían incrementar los niveles de la hormona ácido indolacético (AIA), en las raíces o brotes, que a su vez pueden incrementar el vigor de las semillas y por ende el crecimiento de plántulas (Wang, *et al.*, 2015)

Ulla y Arshad, (2014) mencionan que el efecto de las NPs en semillas tratadas comienza a manifestarse desde la germinación de las semillas, generando un cambio en la dinámica de la germinación, observándose un incremento en el porcentaje de germinación y el índice de velocidad de emergencia.

En este caso autores como García-López *et al.*, (2017) mencionan que la imbibición de semillas en diferentes concentraciones de NPs ZnO aumenta significativamente la germinación y el vigor, mejorando el desarrollo de la longitud de plúmula y radícula, durante el proceso de germinación, las NPs de ZnO en concentraciones adecuadas puede mejorar significativamente la velocidad de germinación, generando plántulas de mayor vigor para la producción.

Esto puede ser por qué el zinc forma parte de proteínas encargadas de mantener la estructura tridimensional adecuada de la enzima ribulosa bifosfato carboxilasa/oxigenasa, mejor conocida como Rubisco, la cual es responsable de la fijación del carbono atmosférico por las plantas. También mantiene activos al fotosistema II, encargado de captar la luz durante el proceso de fotosíntesis, y a la enzima anhidrasa carbónica, involucrada en la hidratación del dióxido de carbono en las plantas (Amezcu Romero y Lara Flores, 2016).

Cuadro 4. Comparación de medias por concentración para las variables evaluadas en el bioensayo de germinación de semillas de pepino (*Cucumis sativus*), tratadas con NPs y MPs de Zn y Fe.

Concentración (ppm)	VIGOR (%)	GERM (%)	PA (%)	SSG (%)	PS (mg/plántula)	LV (cm)	LR (cm)
0	79a	95a	4 b	1a	14.69 b	9.00 b	11.18a
5	64 b	88 b	11a	1a	15.69a	8.47 c	10.20 b
10	77a	96a	4 b	0a	15.66a	9.46a	11.29a
\bar{x}	73	93	6	1	15.35	4.38	4.76
Tukey (0.05)	9.84	3.72	4.35	1.17	0.76	0.41	0.43

Medias con la misma literal son estadísticamente iguales, Tukey ($P \leq 0.05$); VIGOR= Plántulas normales al primer conteo; GERM= 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.

En lo que respecta a la longitud de vástago y de radícula (cm), se manifiesta que los mejores resultados para el incremento de estas variables se obtienen al aplicar 10 ppm, ya que las plántulas tratadas a esta concentración presentaron una mayor elongación, lo que se traduce en un estímulo para el crecimiento y el desarrollo de plántulas.

En los Anexos 5 al 8 se observan las interacciones entre factores, indicando que tanto el tipo de partícula como la concentración afectan el comportamiento del proceso germinativo. Sin embargo, no se observó un patrón definido, por ejemplo, en el Anexo 5 se ve que al tratar las semillas con MPsZnO a 10 ppm se obtiene el mejor porcentaje de vigor de germinación con 92 %. Por otra parte, al tratar las semillas con MPsZnO a 10 ppm se incrementa el porcentaje de vigor al máximo (100 %) (Anexo 6). Reduciéndose por completo el porcentaje de plántulas anormales (Anexo 7). En cuanto a la longitud de vástago, la aplicación de NPsZnOFe a 10 ppm a semillas durante la imbibición, resulta en la mayor longitud.

Estudios realizados por Cruz-Ruiz (2017), indican que la NP compuesta de Zn+Fe (NPZnFe) a una concentración de 10 ppm en semillas de *Cucurbita pepo* var. Grey zucchini, tiene un efecto positivo en el vigor y en el incremento de la longitud de plúmula, sin embargo, un efecto similar se muestra a una concentración de 5 ppm incrementando el vigor y la longitud de radícula.

Krishna y Natarajan (2014) demostraron que con la aplicación de NPs ZnO se mejora la velocidad de germinación en semillas de cacahuate. Los efectos beneficiosos de las NPs podrían atribuirse a una mayor producción de enzimas responsables de las reacciones metabólicas.

Por otra parte, un estudio realizado por Lin y Xing (2007), quienes evaluaron los efectos de cinco tipos de nanopartículas (nanotubos de carbono, aluminio, alúmina, zinc y óxido de zinc) sobre la germinación de semillas y crecimiento de las raíces de seis especies de plantas (rábano, colza, centeno, lechuga, maíz y pepino). La germinación de las semillas no se vio afectada, con excepción del maíz a una aplicación de 2000 mg L⁻¹, sin embargo, a bajas concentraciones muestra un mayor desarrollo de raíces, así se demuestra que las

NPs actúan de forma benéfica dependiendo del tipo, concentración y especie de cultivo.

V. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este estudio permiten concluir que la aplicación de NPs durante la germinación mejora notablemente la expresión de variables asociadas con este proceso en semillas de pepino (*Cucumis sativus*). Sin embargo, la aplicación de NPsZnO+Fe presenta mejor respuesta en las variables evaluadas.

Se observó que la aplicación de 10 ppm genera un efecto positivo en el incremento del vigor de germinación y el porcentaje de germinación de las semillas de esta especie *Cucumis sativus*, sin embargo, al aplicar 5 ppm existe un decremento en la expresión de estas variables, incrementando a 12 % la presencia de plántulas anormales, disminuyendo a la par el vigor de germinación de las semillas evaluadas en este ensayo.

Lo anterior nos conduce a la conclusión de que la aplicación NPsZnO+Fe a una dosis de 10 ppm durante la imbibición de semillas de melón, mejora el vigor, la germinación y el crecimiento de plántulas, así como la acumulación de materia seca.

Tratar las semillas con NPsZnO+Fe a bajas concentraciones, genera una respuesta positiva, al actuar como elementos promotores de crecimiento y desarrollo, sin embargo, la dosis óptima depende de la interacción que el tipo de partícula genera en el metabolismo de la planta y de la genética de la especie.

El uso de NPs durante el proceso germinativo genera un incremento en la respuesta de variables fisiológicas asociadas, motivo principal de este estudio.

VI. LITERATURA CITADA

- Abbasi, M., A. Ghorbani, and M. Moameri. 2016. Effects of silica and silver nanoparticles on seed germination traits of *thymus kotschyanus* in laboratory conditions. *Journal of Rangeland Science* 6(3): pp. 222-231.
- Alvarado, R., F. Solera, y J. Vega-Baudrit. 2014. Síntesis Sonoquímica de Nanopartículas de Óxido de Zinc y de Plata Estabilizadas con Quitosano. Evaluación de su Actividad Antimicrobiana. *Revista Iberoamericana de Polímeros*. 15:3. pp. 134-148.
- Amezcu Romero J. y M. Lara Flores. 2017. El zinc en las plantas. *Ciencia*. (68) 3, pp. 8.
- Burman, U., M. Saini, P. Kumar. 2013. Effect of zinc oxide nanoparticles on growth and antioxidant system of chickpea seedlings. *Toxicological and Environmental Chemistry*. pp. 95: 7.
- Buzea, C., I.I. Pacheco, and K. Robbie. 2007. Nanomaterials and nanoparticles: sources and toxicity. *Biointerphases* 2:17, pp. 71.
- Carrillo, R. G. y M. C. González-Chávez. 2009. La Nanotecnología en la agricultura y rehabilitación de suelos contaminados. pp. 14.
- Casirra-Posada, F., y J. Poveda. 2005. La toxicidad por exceso de Mn y Zn disminuye la producción de materia seca, los pigmentos foliares y la calidad del fruto en fresa (*Fragaria sp. cv. Camarosa*). *Suelos, fertilizantes y manejo del agua*. Colombia. pp.7.
- Castillo, R. F. 2012. Introducción a los nanomateriales. Facultad de estudios superiores Cuautitlán (UNAM). pp. 82.
- Chalco S, W. R. 2009. Nanotecnología en la industria alimentaria. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola. pp.32.
- Chinnamuthu, C.R. y M. Boopathi. 2009. Nanotechnology and Agroecosystem. *Tamil Madras Agric. J.* 96(6): pp. 17-31.

- Cruz Ruiz L. I. 2017. Aplicación de Nanopartículas y Micropartículas de Óxido de Zinc y Sulfato de Fierro, y su Efecto en la Germinación y el Crecimiento de Plántulas de Calabaza (*Cucurbita pepo*). Ing. Agrónomo en producción. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo Coahuila México. pp. 54.
- Doria, J. 2010. Generalidades sobre las semillas: su producción, conservación y almacenamiento. Cultivos tropicales. La Habana, Cuba. 31(1), pp. 16.
- Esparza Arredondo, I. J. E. 2016. Potencial antimicrobial de nanopartículas metálicas en Microorganismos fitopatógenos y su potencial como promotores de crecimiento en plantas. Universidad autónoma agraria Antonio Narro. Saltillo Coahuila México. pp. 53.
- Farokhzad, O. C. y R. Langer. 2009. Impact of nanotechnology on drug delivery. ACS Nano 3: pp. 16-20.
- Foladori, G., y N. Invernizzi. 2005. Nanotecnología ¿Beneficios para todos o mayor desigualdad? Redes, Universidad Nacional de Quilmes Bernal Este, Argentina. mayo, vol. 11, número 021. pp. 22.
- 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-Saldívar. 2017. Interacción de las nanopartículas ZnO sobre la germinación y crecimiento temprano de plántulas de chile habanero (*Capsicum chinense*). Agrobio nanotechnology. UANL, UAAAN, Facultad de Ciencias Biológicas; Centro de investigación en Química Aplicada, Saltillo, Coah, México. pp 51-64.
- Gutiérrez-Praena, D., A. Jos, S. Pichardo, M. Puerto, E. Sánchez Granados, A. Grilo y A. M. Cameán. 2009. Nuevos riesgos tóxicos por exposición a nanopartículas. Revista de Toxicología. 26: pp. 87-92.
- Hampton, J.G. and D.M. Tekrony. 1995. Handbook of vigour test methods. 3rd Edition. International Seed Testing Assoc. Zürich, Switzerland. pp.117.

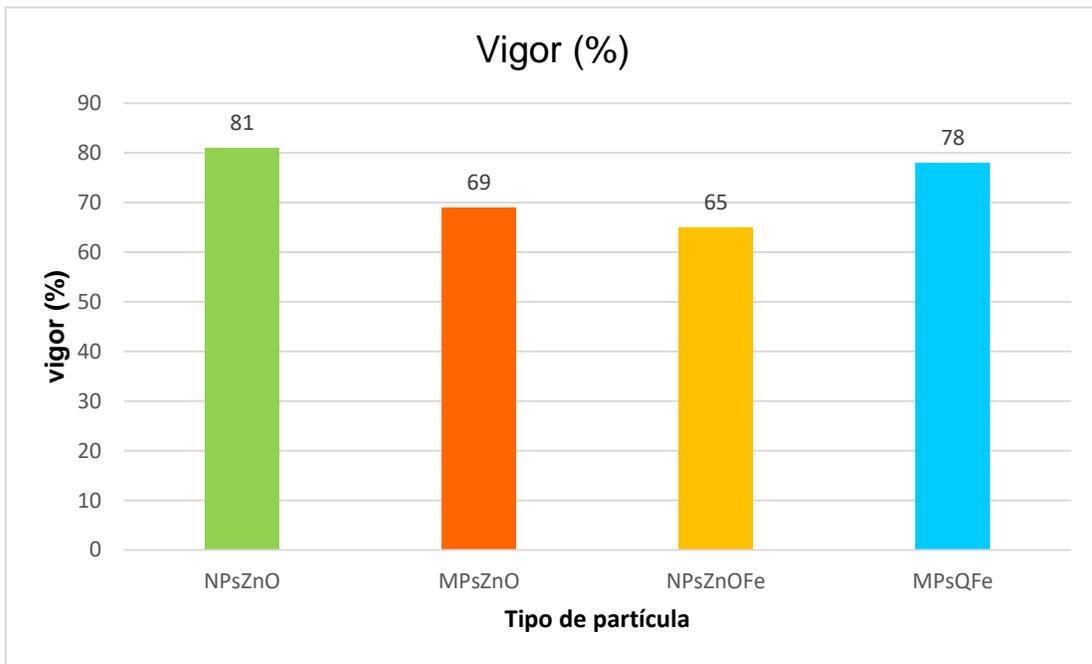
- Heath, J.R. 2008. Nanotechnology and Cancer. Annual Review of Medicine, 59: pp. 251-265.
- Jayarambabu, N., B. Siva Kumari, K. Venkateswara Rao and Y.T. Prabhu. 2014. Germination and growth characteristics of mungbean seeds (*Vigna radiata* L.) affected by synthesized zinc oxide nanoparticles. International Journal of Current Engineering and Technology 4(5): pp. 6.
- Juárez-Madonado, A., H. Ortega-Ortíz, F. Pérez-Labrada, G. Cadenas-Pliego, and A. Benavides-Mendoza. 2016. Cu Nanoparticles absorbed on chitosan hydrogels positively alter morphological, production, and quality characteristics of tomato. Journal of Applied Botany and Food Quality 89: pp. 7.
- Kah, M., S. Beulke, K. Tiede, and T. Hofmann. 2012. Nanopesticides: State of Knowledge, Environmental Fate, and Exposure Modeling. Critical Reviews in Environmental Science and Technology. pp. 1823- 1826. DOI: 10.1080/10643389.2012.671750.
- 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(9): pp. 1376-1381.
- Kole, C., P. Kole, K. Manoj Randunu, P. Choudhary, R. Podila, P. Chun Ke, A. Rao, M. Marcus, K. Richard. 2013. Nanobiotechnology can boost crop production and quality: first evidence from increased plant biomass, fruit yield and phytomedicine content in bitter melon (*Momordica charantia*). BMC Biotechnology. DOI: 10.1186/1472-6750- 13-37.
- Lira-Saldívar, R.H., J. Corrales-Flores, Hernández-Suarez, R. Betancourt-Galindo, L. A. García-Cerda, B. Puente-Urbina. 2014. Actividad Antifúngica de nanopartículas de cobre y óxido de zinc-plata contra *Botrytis cinerea*. Departamento de materiales Avanzados del Centro de Investigación en Química Aplicada. pp. 7.

- Lin D., and B. Xing. 2007. Phytotoxicity of nanoparticles: inhibition of seed germination and root growth. *Environmental Pollution*. pp. 247–249
- Mahmoodzadeh, H., M. Nabavi, and H. Kashef. 2013. Effect of nanoscale titanium dioxide particles on the germination and growth of canola (*Brassica napus*). *Journal of Ornamental and Horticultural Plants*. 3(1): pp. 30.
- Marcos, J. 2015. Prueba de Vigor de Semillas: Una visión general de la perspectiva pasada, presente y futura. Universidad de Sao Paulo. Brasil. pp. 72.
- Martinello, B., L. Rodríguez., A.M, Bernardin. 2012. Síntesis de nanopartículas de ZnO por el proceso sol-gel. *Cualicos* 12 (1): pp. 1-9
- Maine, E., Thomas V.J., Bliemel, M, Murira, A, Utterback, J. 2013. The emergence of the nanobiotechnology industry. *Nat Nanotechnol*. doi: 10.1038/nnano.2013.288.
- Mendoza Uribe G. y J. L. Rodríguez-López. 2006. La nanociencia y la nanotecnología: una revolución en curso. Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México. 15(29), pp. 27.
- Méndez-Argüello B., I. Vera-Reyes, E. Mendoza-Mendoza, L.A. García-Cerda, B.A. Puente-Urbina y R.H. Lira-Saldívar. 2016. Growth promotion of *Capsicum annuum* plants by zinc oxide nanoparticles. Departamento de Plásticos en la Agricultura, Centro de Investigación en Química Aplicada, Saltillo, Coahuila. *Nova Scientia*. 8(17) pp.18.
- Molins, R. 2008. Oportunidades y amenazas de la nanotecnología para la salud, los alimentos, la agricultura y el ambiente. *Innovación y tecnología*. Pp.16.
- Narendhran, S., P. Rajiv, y R. Sivaraj. 2016. Toxicity of ZnO nanoparticles on germinating *Sesamum indicum* (Co-1) and their antibacterial activity. *Bulletin of Materials Science* 39(2): pp. 415-421.
- Navarro, M., G. Febles, y V. Torres. 2009. Comportamiento interactivo de la germinación, la dormancia, la emergencia y el crecimiento inicial como

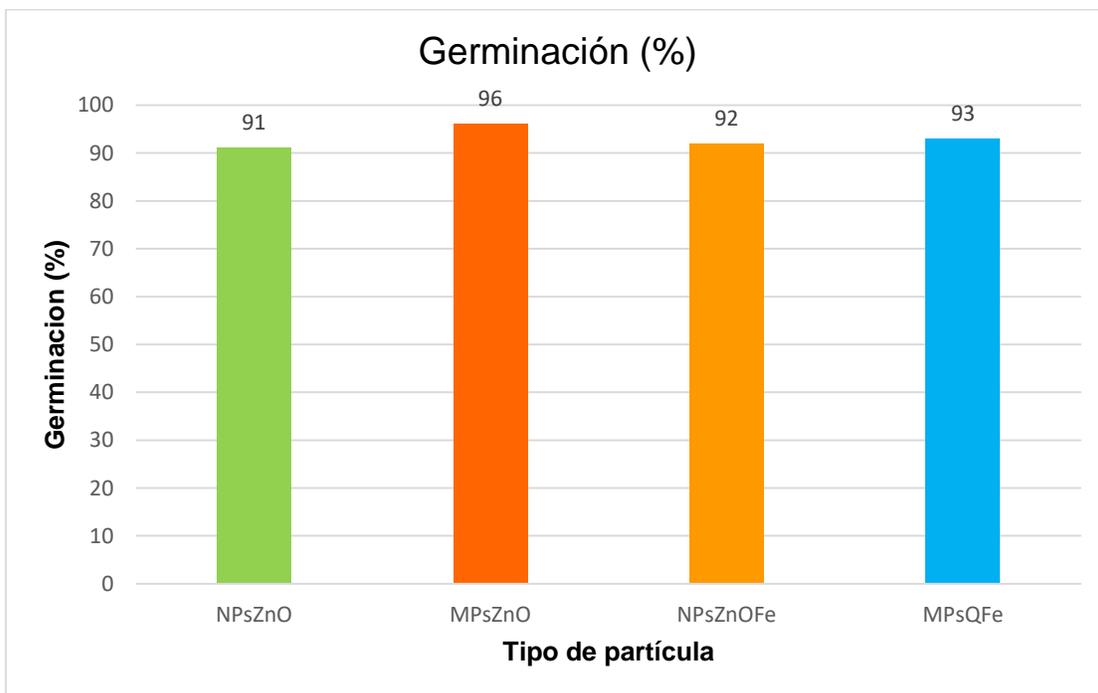
- atributos biológicos para evaluar el vigor de las semillas de *Albizia lebbek* (L.) Benth. PhD. Universidad Agraria de La Habana. Cuba. pp. 101.
- Panwar, J., N. Jain, A. Bhargava, M. S. Akhtar, and Y. S. Yun. 2012. Positive effect of zinc oxide nanoparticles on tomato plants: A step toward developing Nano-fertilizers. International conference on Environmental Research and Technology (ICERT) pinang, Malaysia. pp. 8.
- Pichardo González, J. M., O. J. Ayala Garay., V. A. González Hernández., C. M. Flores Ortiz., A. Carrillo Salazar., A. Peña Lomelí. y G. García de los Santos. 2010. Calidad fisiológica, ácidos grasos y respiración en semillas de tomate de cáscara deterioradas artificialmente. Revista fitotecnia mexicana, 33(3), pp. 231-238.
- Prasad, T. N. V. K. V., P. Sudhakar, Y. Sreenivasulu, P. Latha, V. Munaswamy, K. R. Reddy, and Pradeep, T. 2012. Effect of nanoscale zinc oxide particles on the germination, growth and yield of peanut. Journal of plant nutrition, 35(6), pp. 905-927.
- Raskar, S. V., y S. L. Laware. 2014. Effect of zinc oxide nanoparticles on cytology and seed germination in onion. Int. J. Curr. Microbiol. pp. Sci, 3(2), pp. 467-473.
- Razzaq, A., R. Ammara, H. M. Jhazab, T. Mahmood, A. Hafeez, y S. Hussain. 2016. A novel nanomaterial to enhance growth and yield of wheat. Journal of Nanoscience and Technology. pp. 55-58.
- Ruiz-Torres, N. A., J. L. García-López, R. H. Lira-Saldívar, I. Vera-Reyes, y B. Méndez-Argüello. 2016. Efecto de Nanopartículas Metálicas y Derivadas del Carbón en la Fisiología de Semillas. In R. H. Lira Saldívar, y B. Méndez Argüello, Agronano Tecnología Nueva frontera de la Revolución Verde. Saltillo, Coah. UAAAN. pp. 42-60.
- SAS Institute. 2004. SAS/STAT ® 9.1 User's Guide. Cary, NC: SAS Institute Inc. USA. 1521 p.

- Sheykhbaglou, R., M. Sedghi., M.T. Shishevan., y R. S. Sharifi. 2010. Effects of nano-iron oxide particles on agronomic traits of soybean. *Notulae Scientia Biologicae*, 2(2), pp. 112.
- Shyla, K.K., N. Natarajan, 2014. Customizing zinc oxide, silver and titanium dioxide nanoparticles for enhancing groundnut seed quality. *Indian Journal of Science and Technology*, 7: pp. 7.
- Siddiqui, M. H., Al-Whaibi, H. M., and Mohamad, F. 2015. Nanotechnology and plant sciences. Nanoparticles and their impact on plant. Springer. Aligarh India. pp. 306.
- Srilatha, B. 2011. Nanotechnology in Agriculture. *Journal Nanomedic Nanotechnology*. Vol. 2. pp. 123-128.
- Ullah, S. and 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). pp. 57-61.
- Wang, S.; H. Liu, Y. Zhang, H. Xin, 2015. Effect of CuO nanoparticles on reactive oxygen species and cell cycle gene expression in roots of rice. *Environmental Toxicological Chemistry*, 34: pp. 554-561.
- Yasmeen F., A. Razzaq, M. Naveed Iqbal, H. Muhammad Jhanzab. 2016. Efecto de plata, cobre y hierro nanopartículas en la germinación del trigo. *Revista internacional de biociencias*. (6)4: pp. 6.
- Zhang, R., H. Zhang, C. Tu, X. Hu, L. Li, Y. Lou, and P. Christie. 2015. Phytotoxicity of ZnO nanoparticles and the released Zn (II) ion to corn (*Zea mays L.*) and cucumber (*Cucumis sativus L.*) during germination. *Biblioteca nacional de medicina de EE. UU. Institutos nacionales de salud*. 22(14), pp. 10.

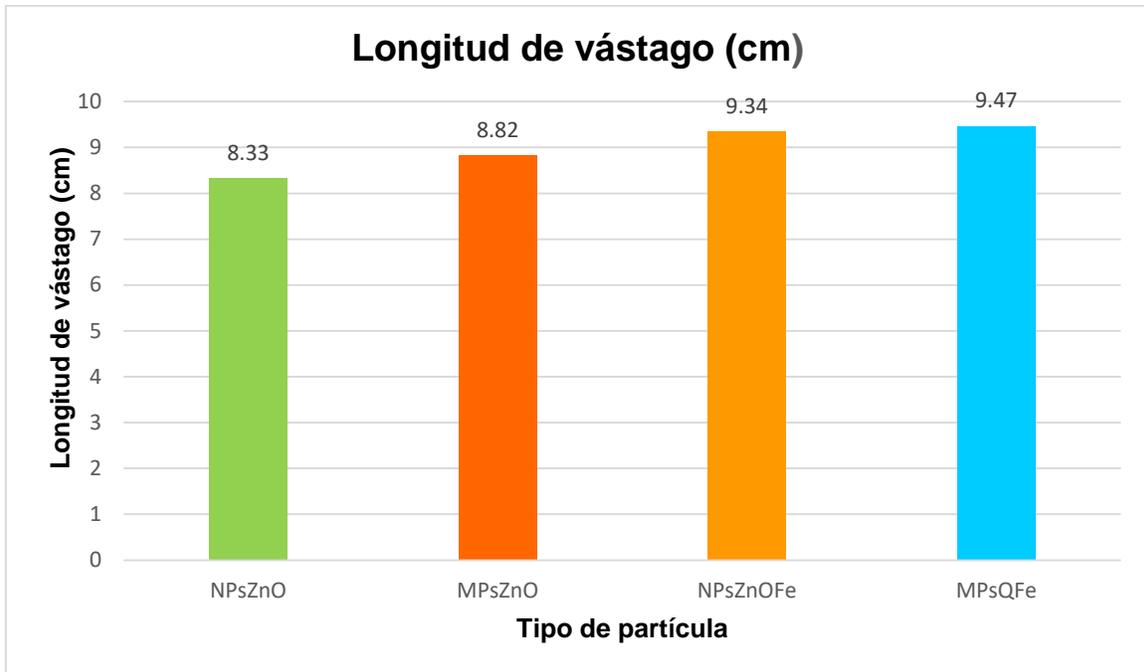
VII. ANEXOS



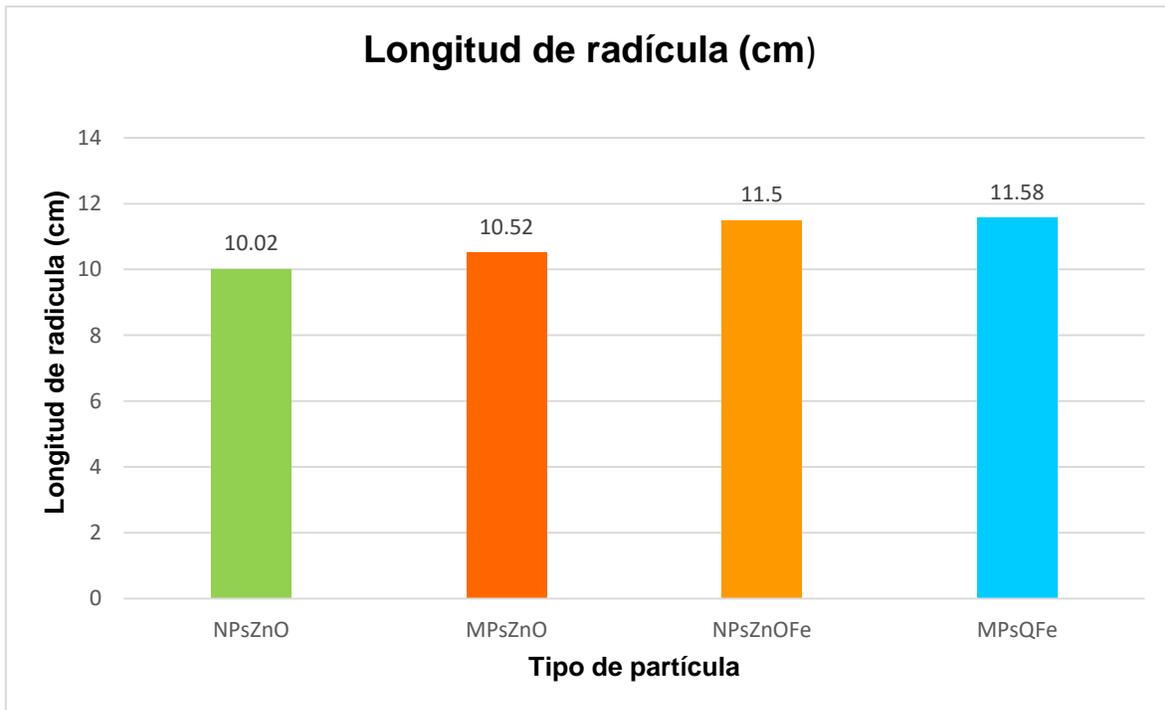
Anexo 1 porcentaje de vigor de germinación por tipo de partícula.



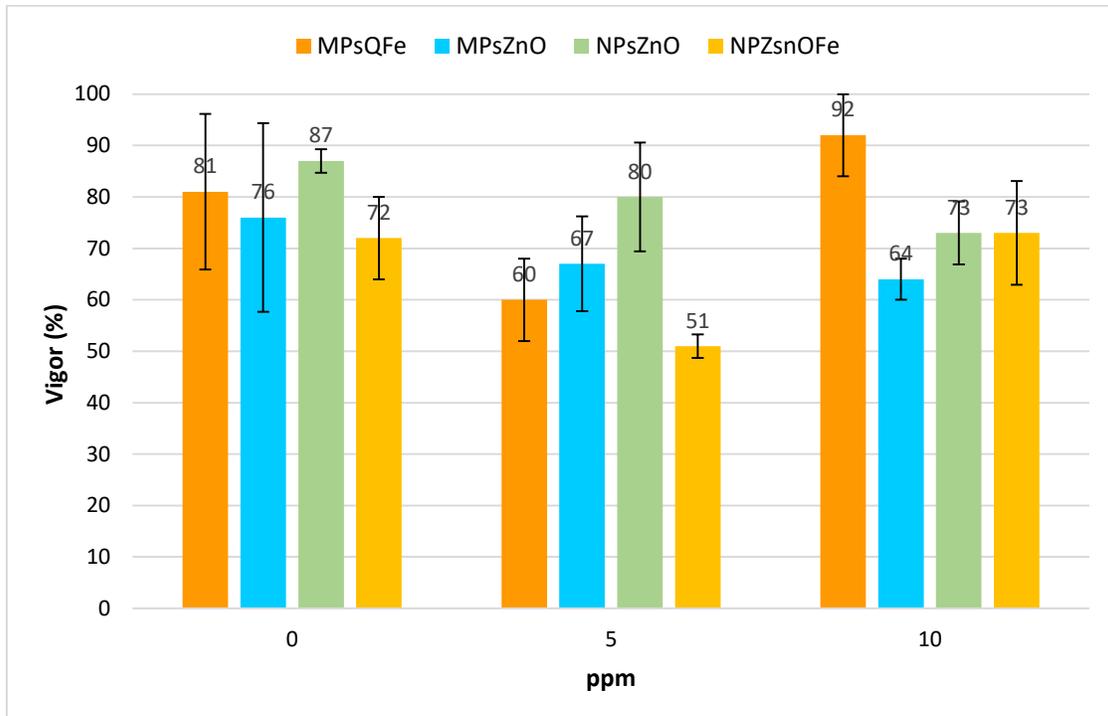
Anexo 2 porcentaje de germinación por tipo de partícula



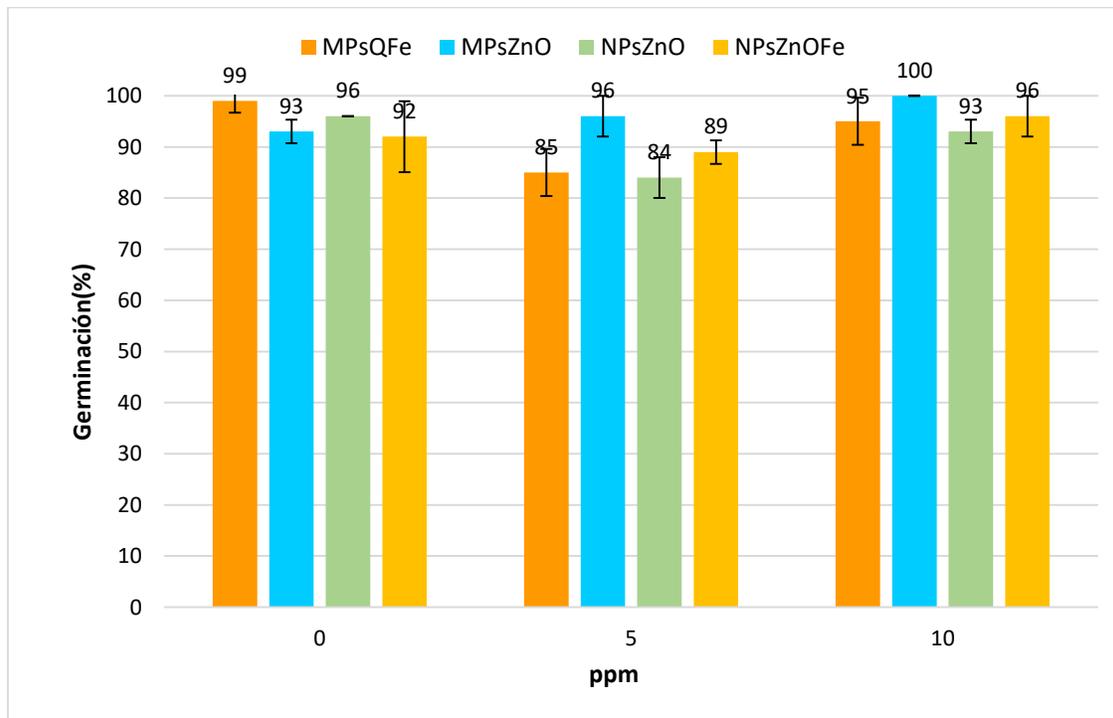
Anexo 3 longitud de vástago (cm) por tipo de partícula.



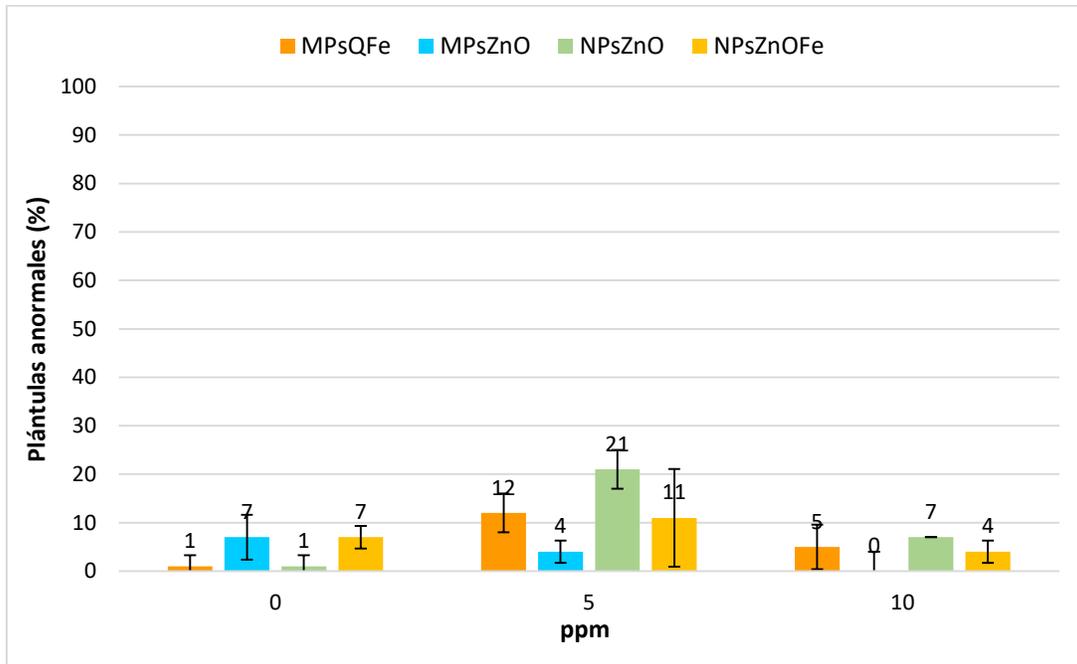
Anexo 4 longitud de radícula (cm) por tipo de partícula



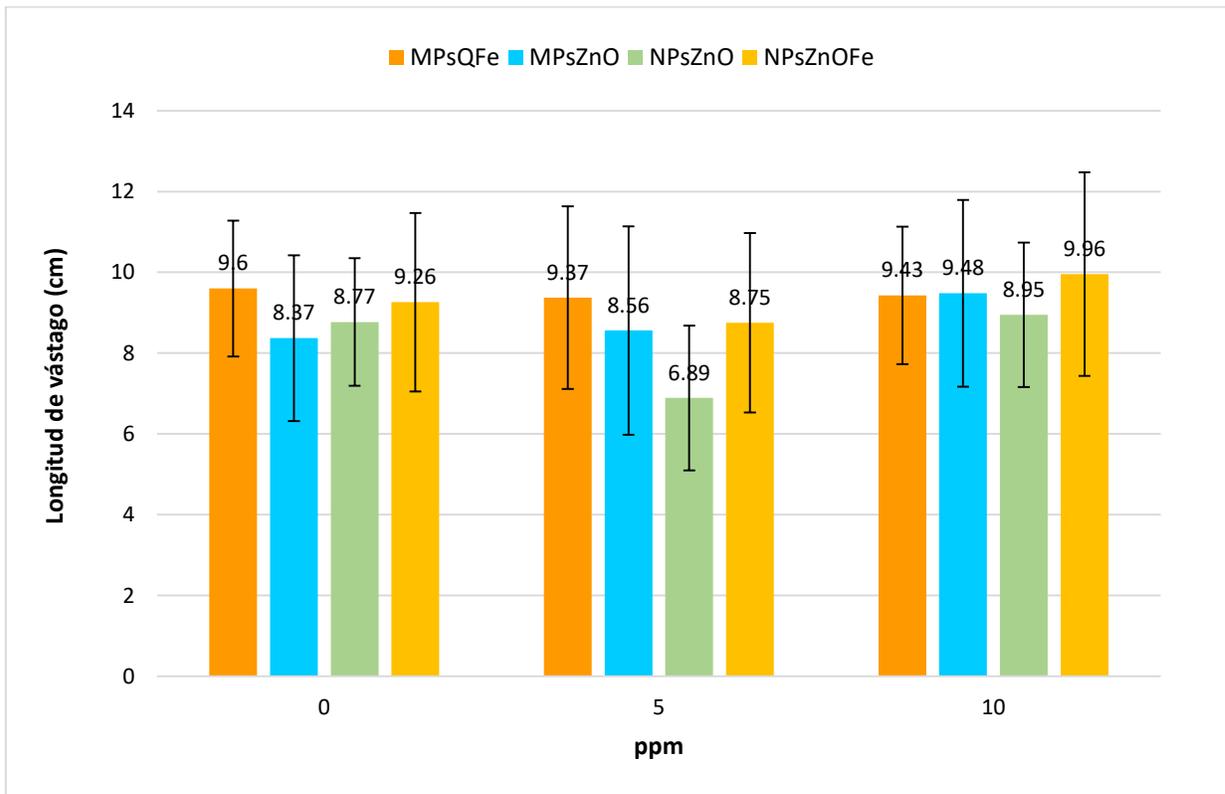
Anexo 5 porcentaje de vigor de germinación por tipo de partícula y por concentración.



Anexo 6 porcentaje de germinación por tipo de partícula y por concentración.



Anexo 7 porcentaje de plántulas anormales por tipo de partículas y por concentración.



Anexo 8 longitud de vástago (cm) por tipo de partícula y por concentración.