

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO



Modulación de la Germinación y Desarrollo de Plántulas en Ambientes Salinos de Semillas
de *Zea mays* L. Tratadas con Nanopartículas de Óxido de Zinc

Por:

JOSE ALFREDO OSORIO FRANCISCO

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN

Saltillo, Coahuila, México.

Diciembre de 2021.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO

Modulación de la Germinación y Desarrollo de Plántulas en Ambientes Salinos de Semillas
de *Zea mays* L. Tratadas con Nanopartículas de Óxido de Zinc

Por:

JOSE ALFREDO OSORIO FRANCISCO

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN

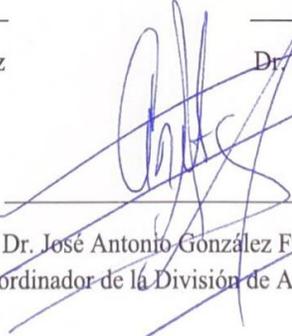
Aprobada por el Comité de Asesoría:



Dra. Norma Angélica Ruiz-Torres
Asesor Principal



Dr. Froylán Rincón Sánchez
Coasesor

Dr. Francisco Javier Sánchez Ramírez
Coasesor

Dr. José Antonio González Fuentes
Coordinador de la División de Agronomía

Saltillo, Coahuila, México.
Diciembre de 2021.

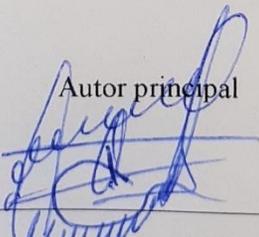
Derechos de Autor y Declaración de no plagio

Todo material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor de los Estados Unidos Mexicanos, y pertenece al autor principal quien es el responsable directo y jura bajo protesta de decir verdad que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos:

Reproducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (corta y pega); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio); comprar, robar o pedir prestados los datos o la tesis para presentarla como propia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin usar comillas; utilizar ideas o razonamientos de un autor sin citarlo; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, gráficas, mapas o datos sin citar al autor original y/o fuente. Así mismo tengo conocimiento de que cualquier uso distinto de estos materiales como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Por lo anterior nos responsabilizamos de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaramos que este trabajo no ha sido previamente presentado en ninguna otra institución educativa, organización, medio público o privado.

Autor principal



Jose Alfredo Osorio Francisco

DEDICATORIA

A DIOS

Por haberme permitido llegar a esta etapa de la vida y por bendecirme con mucho más de lo que merezco.

A MIS PADRES

Severo Osorio Gertrudis y Olga Lidia Francisco Amando gracias por haberme apoyado en todo momento, sé que desde muy pequeño me enferme y tuvieron que hacer varios sacrificios para poder llevarme al doctor, tras quince años de atención medica pudimos superar esa enfermedad gracias a su esfuerzo y perseverancia, es por eso, que de aquí en adelante me encargare de darles todo lo que pudimos haber tenido. Este logro no es solo mío si no te todos, ya que gracias a sus consejos y mostrarme que con dedicación y esfuerzo se puede triunfar. Quiero que sepan que estoy eternamente agradecido por haber dado la oportunidad de hacer una carrera universitaria.

A MIS ABUELOS

José Osorio Pascuala (Papá Chelito) † y María Gertrudis Catarina agradezco a dios por haber podido pasar momentos tan maravillosos a lado de mi tocayo, él me consentía mucho no me dejaba hacer los trabajos pesados, a pesar de eso me enseñó la forma de trabajar y ser una persona de bien, un día dijo (ama pan tlen tekitis ni no tocayo) y con orgullo puedo decir que trabajaré como ingeniero agrónomo. Mamá li es una de las personas más maravillas, me ha demostrado su cariño, amor y enseñado a ver lo hermoso de la vida. A pesar que estoy fuera de casa siempre pienso en ella.

Zenaido Francisco Magdalena y Eugenia Amado Cristóbal soy la persona más afortunada al tenerlos como abuelos, gracias por su apoyo, sé que ustedes también tuvieron que hacer sacrificios desde los inicios de mi vida, es por eso que les agradezco desde el fondo de mi corazón por todo el amor y cariño que me han dado. Ustedes me han enseñado que hay que ser amable ante todas las personas y que el fuerzo tienen su recompensa.

AGRADECIMIENTOS

A la universidad Autónoma agraria Antonio Narro por haberme dado la oportunidad de poder ser parte de su comunidad estudiantil, por brindarme las herramientas y los conocimientos necesarios para mi formación profesional, fue como una segunda casa para mí.

A la Dra. Norma Angélica Ruiz Torres por otorgarme su confianza y la oportunidad de ser participe en tan importante proyecto de investigación, le agradezco por los conocimientos impartidos, el tiempo brindado y la motivación que me dio para seguir superándome.

Al Dr. Enrique Navarro Guerrero por todo el apoyo durante la carrera, los consejos, los conocimientos transmitidos y por brindarme su amistad.

A la Ing. María Luisa Francisco Mendoza por su apoyo incondicional durante la estancia de prácticas profesionales y por los conocimientos transmitidos.

A mis tíos Carlos, Víctor, Juan José, Francisco, Toño, y Benito por los consejos, enseñanzas que con llevan a hacer un buen trabajo, buscar la solución a todos los problemas y nunca rendirse.

A mis tías Isabel, Irene, Alma, Eva, Juana y Cristina por su cariño, sus consejos y alentarme a ser una buena persona.

A mis amigos Adán, Kevin, Cristina, Daniel, J. Isabel, Miguel y Marco por la motivación y ayuda que nos brindamos en el transcurso de la carrera, aunque tuvimos momentos de altas y bajas, siempre nos alentamos a ser los mejores.

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDO

ÍNDICE DE CUADROS	xi
ÍNDICE DE ANEXOS	xi
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1. Objetivo general	2
1.1.2 Objetivos específicos	2
1.1.3 Hipótesis.....	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1. La importancia del maíz.....	3
2.2. La nanotecnología	3
2.3. El zinc en las plantas y el efecto de las nanopartículas de óxido de zinc	4
2.4. Como afecta la salinidad en la agricultura a nivel mundial	6
2.5. Efecto de la salinidad en la germinación.....	7
2.6. Efecto de la salinidad en las plantas.....	8
2.7 Fotosíntesis.....	9
2.7.1 Efecto de las sales en el proceso fotosintético	9
III. MATERIALES Y MÉTODOS	11
3.1. Localización del sitio experimental	11
3.2. Preparación de soluciones salinas	11
3.3. Preparación de suspensión con nanopartículas de óxido de zinc.....	11
3.4. Imbibición de semillas	11
3.5. Siembra en papel Anchor	12
3.6. Variables evaluadas.....	12
3.6.1. Vigor de germinación:.....	12
3.6.2. Plántulas normales (PN):.....	12

3.6.3. Contenido de clorofila:.....	12
3.6.4. Plántulas anormales (PA):.....	12
3.6.5. Semillas sin germinar (SSG):.....	13
3.6.6. Longitud de plúmula (LP) y de radícula (LR):	13
3.6.7. Peso seco de plúmula y de radícula:	13
3.7 Análisis estadístico.....	13
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	15
V. CONCLUSIONES	30
VI. BIBLIOGRAFÍA	31
VII. ANEXOS.....	39

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Cuadros medios del análisis de varianza del estudio de germinación de semillas de maíz para determinar el efecto modulador de las NPsZnO en ambientes salinos.....	16
Cuadro 2. Cuadros medios del análisis de varianza de las variables evaluadas en plántulas de maíz con sales y nanopartículas.....	18
Cuadro 3. Cuadros medios del análisis de varianza para las variables evaluadas en plántulas de maíz, obtenidas de semillas tratadas con sales y nanopartículas.....	18
Cuadro 4. Comparación de medias de las variables evaluadas en la germinación de semillas de maíz en diferente concentración salina.....	22
Cuadro 5. Comparación de medias de las variables evaluadas en la germinación de semillas de maíz y la cantidad de biomasa acumulada en diferente concentración salina.....	25
Cuadro 6. Comparación de medias del efecto de las nanopartículas en la germinación de semillas de maíz.....	29

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Plántulas de alto vigor en ambientes salinos, obtenidas de semillas tratadas con NPsZnO.....	39
Anexo 2. Anexo 2. Comparación de peso seco de plúmula y peso seco de radícula, tratado con NPsZnO y sometido a ambientes salinos.	39
Anexo 3. Efecto de los medios salinos en el índice de vigor de semillas tratadas con NPsZn.....	40
Anexo 4. Plántulas de bajo vigor, plántulas anormales, semillas sin germinar en ambientes salinos, derivadas de semillas tratadas con NPsZnO.....	40

RESUMEN

El presente trabajo se realizó 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 el efecto de la imbibición de semillas de maíz en nanopartículas de óxido de zinc, en el proceso germinativo, crecimiento de plántulas y el contenido de clorofila, y la respuesta de la aplicación de sulfato de sodio (Na_2SO_4) a diferentes concentraciones.

El experimento constó de tratamientos con NPsZnO a diferentes concentraciones (0, 50 mg L^{-1}) y Na_2SO_4 (0, 0.25, 0.50, 0.75, 1.0, 1.25, 1.50, 1.75, 2.0, 2.50, 3.0, 3.50, 4.0 mS/cm). Se contaron 1300 semillas de un híbrido comercial de maíz, colocando 100 por cada tratamiento, después se les aplicó 30 ml de suspensión de NPsZnO, en concentraciones de 0 y 50 ppm. Posteriormente las cajas de Petri fueron colocadas en una cámara bioclimática por 21 horas, a una temperatura de $25^\circ\text{C} \pm 2$, con una humedad relativa de 50%, y un fotoperiodo de 24 horas de obscuridad.

Transcurrido el tiempo de imbibición, se efectuó la siembra, la cual consistió en colocar 4 repeticiones de 25 semillas entre papel Anchor, previamente humedecido con las diferentes concentraciones de Na_2SO_4 , se enrollaron dándole un aspecto de taco. Las cuatro repeticiones de cada tratamiento se pusieron en una bolsa de polietileno, posteriormente se colocaron dentro de un contenedor de plástico y por último se introdujeron a una cámara de germinación.

Las variables evaluadas del experimento fueron: vigor de germinación, plántulas normales, contenido de clorofila, plántulas anormales, semillas sin germinar, longitud de plúmula y de radícula, peso seco de plúmula y radícula.

El estudio se estableció en un diseño completamente al azar, con arreglo factorial (2 x 13), siendo dos los factores en estudio: 1. Concentración de NPsZnO y 2. Conductividad eléctrica mS/cm . Las variables evaluadas fueron analizadas para determinar diferencias estadísticas para las variables en estudio, seguidamente se realizó una comparación de medias con la Prueba de Tukey ($P \leq 0.05$), utilizando el paquete estadístico SAS.

Los tratamientos con nanopartículas tuvieron efecto positivo en la variable peso de plúmula, a una concentración de 50 ppm.

Ambientes con Na_2SO_4 en un rango de 0.25 a 1.50 mS/cm, incrementaron el vigor de germinación, porcentaje de germinación, plántulas de alto vigor, peso seco de plúmula y peso seco de radícula. Sin embargo, en ambientes mayores a 1.50 mS/cm, las variables antes mencionadas fueron afectadas severamente.

La interacción Na_2SO_4 x NPsZnO mostró una modulación positiva para las variables plántulas de alto vigor, peso seco de plúmula, peso seco de radícula e índice de vigor.

Palabras claves: imbibición, vigor, nanopartículas, sulfato de sodio, conductibilidad eléctrica.

I. INTRODUCCIÓN

El maíz, desde hace cientos de años ha estado presente en la dieta de los mexicanos no solo por su valor nutrimental sino también por lo económico, unido a esto, se ha cultivado en todas la regiones del país.

Hoy en día la producción agrícola es cada vez más difícil debido al cambio climático, aunado a esto los agricultores cada vez tienen que sustraer agua a niveles más profundos del suelo, para poder irrigar los cultivos, sin embargo, el agua que se aplica contiene altos de niveles de sales, en vez de beneficiar a los cultivos, limitan su desarrollo, y por ende, la producción es severamente afectada.

Además, los suelos están siendo deteriorados cada vez más debido a las malas prácticas agrícolas, por lo que conlleva a suministrar grandes cantidades de fertilizantes al suelo, para que las plantas logren un desarrollo adecuado, y una producción considerable, lamentablemente esta práctica es altamente utilizada en la agricultura, el efecto que tiene al realizar esta actividad es salinizar y degradar aún más los suelo agrícolas.

Por lo anterior, los investigadores están en busca de nuevas tecnologías que ayuden a minimizar los efectos de la agricultura tradicional. La nanotecnología es la ciencia y tecnología que proporciona materiales a nanoescala (nanopartículas), su aplicación está dirigida a campos como a medicina, electrónica y la agricultura, en esta última ha tenido gran auge debido a la elaboración de plaguicidas y fertilizantes nanoestructurados que a través de mecanismos logran suministrar de manera lenta y dirigida de acuerdo a la demanda del cultivo.

Varios estudios han señalado efectos positivos de las nanopartículas como germinación uniforme, crecimiento de plántulas, mayor acumulación de biomasa y mejoras en el rendimiento. Así también como efectos negativos en la capacidad de germinación y desarrollo de plántulas. Es por eso que se realizó este experimento, para analizar el efecto promotor de las nanopartículas de óxido de zinc en semillas de maíz, al germinar y desarrollar plántulas en diferentes ambientes salinos.

1. Objetivo general

Evaluar el efecto de la imbibición de semillas de maíz con nanopartículas de óxido de zinc, en el proceso germinativo, crecimiento de plántulas y el contenido de clorofila, y la respuesta de la aplicación de sulfato de sodio a diferentes concentraciones

1.1.2 Objetivos específicos

1. Evaluar el efecto de las NPsZnO en la germinación, vigor y desarrollo de plántulas de maíz.
2. Estudiar los efectos que tiene el sulfato de sodio (Na_2SO_4) en diferentes concentraciones (0, 0.25, 0.50, 0.75, 1.0, 1.25, 1.50, 1.75, 2.0, 2.50, 3.0, 3.50, 4.0 mS/cm), en el proceso germinativo, vigor, desarrollo de plántulas, y contenido de clorofila en maíz.
3. Determinar si existe modulación de la respuesta fisiológica a diferentes ambientes salinos inducidos con Na_2SO_4 , en semillas tratadas con NPsZnO.

1.1.3 Hipótesis

H_i : La aplicación de nanopartículas de óxido de zinc (NPsZnO), modula los procesos fisiológicos, mejorando el vigor, el porcentaje de germinación y el desarrollo de las plántulas de maíz, en ambientes salinos.

H_0 : La aplicación de nanopartículas de óxido de zinc (NPsZnO), no modula los procesos fisiológicos, ni mejora el vigor, el porcentaje de germinación y el desarrollo de plántulas de maíz, en ambientes salinos.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. La importancia del maíz

Desde el punto de vista alimentario, económico y social, el maíz (*Zea mays* L.) es el cultivo de mayor importancia en México. Este cereal es primordial en la dieta de los mexicanos, el consumo anual per cápita es de 335.8 kg, derivado de ello se cultiva en todas las entidades federativas del país (SIAP, 2020).

La producción de maíz en México en 2019 fue 27, 228,242 toneladas, posicionándose como el octavo productor mundial, el estado de Sinaloa contribuye con el 22.1%, seguido de Jalisco con 15. 7% de la producción nacional (SIAP, 2020).

Debido a la alta demanda del maíz tanto nacional como internacional, es necesario implementar nuevas tecnologías que contribuyan al establecimiento del cultivo y por ende eleven la producción agrícola.

2.2. La nanotecnología

La nanotecnología (NT) es la ciencia, ingeniería y tecnología llevada a cabo a nanoescala, así mismo abre una amplia gama de oportunidades en diversos campos como medicina, farmacéutica, electrónica y agricultura (Srilatha, 2011; Prasad *et al.*, 2014).

La NT es considerada como una tecnología emergente, se orienta a la caracterización, elaboración y aplicación de estructuras de dimensiones muy pequeñas, el tamaño oscila de 1 a 100 nanómetros (nm) denominados nanopartículas (NPs), o sea de 1 a 100 billonésimas de metro (Yadollahi *et al.*, 2010).

Desde que se elaboró el Plan Nacional de Desarrollo 2007-2012, la NT se consideró como sector estratégico y como una tecnología precursora, debido a que se presenta cada vez más en el desarrollo de varias actividades productivas y porque se prevé que en el futuro su uso será determinante para el progreso de muchas ramas de los sectores agropecuarios, industrial y de servicios; y por lo tanto la productividad y competitividad del país (Rodríguez, 2016).

El constante aumento de la población ha traído consigo una alta demanda de alimentos, el sector agrícola al tratar de cubrir las necesidades alimentarias realizó el uso incontrolado de

productos químicos fertilizantes y pesticidas, pero disminuyó la calidad de los alimentos y la fertilidad del suelo. Por lo tanto, ha sido necesario mejorar las prácticas agrícolas convencionales en prácticas inteligentes mediante la participación de tecnologías avanzadas como nanotecnología para la agricultura sostenible. Es por eso por lo que la NT ha generado la formulación nanoestructurada de productos químicos que a través de mecanismos como la entrega dirigida o de liberación lenta controlada y la liberación condicional, podría entregar sus ingredientes activos respondiendo a los desencadenantes ambientales y las demandas biológicas con mayor precisión (Naderi & Danesh, 2013).

En investigaciones recientes a nivel laboratorio, se ha informado que los nanofertilizantes pueden mejorar la productividad de los cultivos al aumentar la producción de semillas, germinación, crecimiento de plántulas, actividad fotosintética, metabolismo, síntesis de carbohidratos y proteínas (Solanki *et al.*, 2015).

Por otra parte, estudios de campo demuestran que el uso de nanofertilizantes provoca un aumento en la eficiencia del uso de nutrientes, reduce la toxicidad del suelo, minimiza los posibles efectos negativos asociados con la sobredosificación y reduce la frecuencia de aplicación. Por lo tanto, la nanotecnología tiene un gran potencial para lograr una agricultura sostenible, especialmente en los países de desarrollo (Naderi & Danesh, 2013).

2.3. El zinc en las plantas y el efecto de las nanopartículas de óxido de zinc

El zinc es uno de los micronutrientes esenciales para el desarrollo de las plantas. La estructura y funcionalidad de muchas enzimas dependen de la presencia de Zn en la planta. Algunos de ellos son:

El zinc se requiere para la síntesis de carbohidratos durante la fotosíntesis y la transformación de los azúcares en almidón.

Participa en el metabolismo de hormonas al regular la cantidad de auxinas por medio de la síntesis del aminoácido triptófano.

En los procesos de maduración, producción de semillas y biomasa, el Zn favorece la formación y fertilidad del polen (Hussain *et al.*, 2015; Rudami y Prajapati, 2018). Este micronutriente forma parte de las enzimas que alertan cuando se presentan factores de estrés biótico y abiótico, así como respuestas de defensa de las plantas para lidiar contra dichos

estreses. Además, es un componente estructural de las proteínas cinasas, que son las responsables de transmitir las señales originadas por los agentes de estrés hacia el interior de las células, con el fin de preparar y estimular la respuesta a dichos agentes (Amezcuca y Lara, 2017).

El efecto promotor o inhibidor del crecimiento de las plantas al aplicar NPs está en relación con su concentración, tamaño y las propiedades inherentes, así como la función fisiológica y bioquímica que desempeña en la planta, y si actúa como micronutriente como el cobre, zinc, etc. (Wang et al., 2015).

En semillas de maíz nativo pigmentado al ser recubiertas con NPsZnO, incrementaron el vigor, el porcentaje de germinación y la longitud de radícula (Estrada *et al.*, 2017). En el reporte de Vasanth *et al.* (2016) indicaron que las NPs mejoraron el vigor de las semillas y la velocidad de germinación, debido principalmente a la entrada de nanomateriales en la semilla, incrementando el potencial hídrico y mayor degradación de reservas.

García-López *et al.* (2017) reportaron que al imbibir semillas de chile habanero con NPsZnO a diferentes concentraciones (0,100, 200, 300, 400 y 500 ppm), aumentó significativamente el porcentaje de germinación y de vigor, mejorando el desarrollo de la longitud de plúmula y radícula, mientras que a concentraciones de 400 y 500 ppm, presentó un decremento de 4.68 y 4.16% en longitud de plúmula; 5.05 y 7% en longitud de radícula, en comparación con el testigo. Así mismo mencionan que las NPsZnO son absorbidas fácilmente durante la germinación y tienen la capacidad de influir en los procesos metabólicos del mismo. El efecto positivo o negativo de las NPsZnO, está en función al tipo de nanomaterial, dosis y genotipo.

Sedghi *et al.* (2013) indicaron que al aplicar 1.0 g L^{-1} de NPsZnO, en semillas de soya causó efectos significativos en la germinación y desarrollo. Prasad *et al.* (2012) indican que al tratar semillas de cacahuate a una concentración de 1000 mg L^{-1} de NPsZnO, promovió la germinación, el vigor de las plántulas y a su vez, un establecimiento temprano en campo manifestando una floración temprana y un mayor contenido de clorofila en las hojas.

En otro estudio, la aplicación de NPsZnO aumentó los niveles de AIA en raíces y en los brotes apicales, que a su vez aumentó la tasa de desarrollo de plántulas de garbanzo *C. arietinum* (Pandey *et al.*, 2010).

Méndez-Argüello *et al.* (2016) trabajando con plantas de *Capsicum annuum* obtuvieron incrementos significativos en crecimiento, producción de biomasa seca y de un mayor índice de clorofila al aplicar NPsZnO puras, y con NPsAg a concentraciones de 1.25 y 2.5% molar, al follaje. El efecto promotor podría estar relacionado con el zinc como precursor de las síntesis de auxinas que causa la elongación y división celular, así como la reactividad del ácido indolacético. Además, es posible que las NPsAg indujeron una mayor producción de las fitohormonas citoquininas y giberelina; aparte de estimular la actividad de enzimas antioxidantes.

Algunos estudios señalan que las NPsTiO₂ y NPsZnO afectaron significativamente el diámetro del tallo y la actividad fotosintética (unidades SPAD) en plantas de frijol y girasol, mientras que en plantas de maíz solo afecta las unidades SPAD. Sin embargo, el efecto de las NPs está en función del tipo y concentración, así como del tipo de cultivo (Medina *et al.*, 2017).

2.4. Como afecta la salinidad en la agricultura a nivel mundial

El aumento de los suelos salinos en todo el mundo ha limitado la producción de cultivos para la alimentación humana y animal, las áreas que se encuentran en esta situación se consideran marginales, en un mundo donde el espacio y la alimentación constituyen grandes limitaciones (Mesa, 2003). El problema afecta aproximadamente el 25% de los 230 millones de hectáreas irrigadas del planeta (Ariel *et al.*, 2008).

En México, la distribución y extensión de suelos con problemas de salinidad están en aumento principalmente en áreas de riego de las zonas áridas, de forma simultánea, la calidad del agua de riego en estas áreas es deteriorada gradualmente debido al exceso de sales, aunado a esto, cuando existe un mal manejo del agua y del suelo, desatendiendo los componentes causantes de acumulación de sales, el proceso de salinización de los suelos se acelera y agrava (Zamudio *et al.*, 2004).

La salinidad se refiere a una alta concentración de sales presentes en el suelo que afectan a las plantas por su efecto tóxico y la disminución del potencial osmótico en el suelo (Lamz y González, 2013). El principal componente de la salinidad de los suelos es por cloruro de sodio (NaCl), sin embargo, los suelos salinos suelen presentar una mezcla de diferentes tipos de sales como los cloruros y los sulfatos de Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺.

Los suelos salinos muestran una conductividad eléctrica de 4 o más dS m^{-1} , un pH de 7.3 a 8.5 y menos de 15% de sodio intercambiable, que repercuten en un bajo crecimiento y desarrollo de plantas, o que determinan las posibilidades de remoción de sus sales o sodio intercambiable, mediante prácticas correctivas (Martínez *et al.*, 2011).

Dichos valores intervienen en la presión osmótica, con innegables repercusiones sobre la vegetación, interfiriendo en el desarrollo de varios cultivos y otras plantas no especializadas Mata *et al.* (2014) indica que desde el punto de vista agronómico, la salinidad es expresada en términos de conductividad eléctrica (CE), indica la velocidad con lo que la corriente eléctrica atraviesa una solución salina, existiendo una proporcionalidad en la concentración de sales en la solución Basurto *et al.* (2008). La CE se calcula en milimhos por centímetro cúbico (mmhos/cm^3) o de igual forma como deciSiemens (dS m^{-1}) (Mata *et al.*, 2014).

El estrés por salinidad es un limitante para la producción de plantas de interés comercial, incluido el maíz (*Zea mays* L.).

2.5. Efecto de la salinidad en la germinación

La germinación de las semillas es el factor de mayor importancia para el establecimiento de plantas, y una de las limitantes es la salinidad, causando cambios que pueden afectar no solo el proceso germinativo, sino también el crecimiento, desarrollo y rendimiento de los cultivos (Carpici *et al.* 2009; Ruiz y Torenti, 2012).

La tolerancia a la salinidad de cada especie dependerá de las condiciones ambientales y de la habilidad que posea para controlar la absorción de Na^+ , principalmente durante la fase de germinación (Layne-Garzaball *et al.*, 2008).

Layne-Garsaball *et al.* (2007) mencionan que al haber un incremento en los niveles de salinidad en el suelo retardan el proceso de germinación y el porcentaje final de germinación es reducido, debido a las dificultades de imbibición que presentan las semillas en medios con alta salinidad, dado por la disminución de la movilidad del agua que se ve reflejado en un retardo en la germinación.

Meza *et al.* (2006) indican que los porcentajes de germinación disminuyen considerablemente al haber un incremento en las concentraciones de sales en el agua de riego, atribuyendo a que el potencial osmótico inhibió la imbibición.

Por su parte Lastiri *et al.* (2017) evaluaron el efecto de la salinidad en la germinación y emergencia de siete especies forrajeras, entre ellas pasto ray grass (*Lolium perenne* L.), pasto estrella (*Cynodon nlemfuensis*), cebada (*Hordeum vulgare* L.), janamargo (*Vicia sativa* L.), garbanzo (*Cicer arietinum* L.), alfalfa (*Medicago sativa* L.) y avena (*Avena sativa* L.), en condiciones *in vitro*, encontraron que conforme la conductividad eléctrica aumentó, se produjo una reducción drástica en la imbibición respecto a sus propios testigos y se vio reflejado en el porcentaje de germinación.

2.6. Efecto de la salinidad en las plantas

El efecto principal de la salinidad es la disminución de la producción de hojas nuevas y un descenso significativo del crecimiento de los brotes (Roy *et al.*, 2014). Munns y Tester (2008) indican que el crecimiento de las plantas responde a la salinidad en dos fases: una fase osmótica rápida que inhibe el desarrollo de las hojas jóvenes y una fase iónica más lenta que acelera la senescencia de las hojas más viejas.

La salinidad afecta cada aspecto de la fisiología de la planta y su metabolismo. La elevada concentración de sales ocasiona un desequilibrio iónico y de estrés osmótico. Un fuerte estrés salino rompe la homeostasis del potencial hídrico y la distribución de iones (Alcaraz-Ariza, 2012).

El estrés osmótico se presenta cuando hay un incremento de sales en la solución del suelo ocasionando una disminución de los potenciales hídrico y osmótico del suelo, el cual es reflejado en el estado hídrico de la planta o contenido relativo de agua (CRA); es decir la planta tiende a perder agua, por lo que debe mantenerse en un potencial hídrico más negativo que el sustrato para asegurar la absorción de agua (Alfonso, 1998; Bartels & Ramanulu, 2005).

El estrés salino rompe la homeostasis iónica de las plantas al inducir un exceso tóxico de sodio (Na^+) en el citoplasma y una carencia de iones como el potasio (K^+). El sodio inhibe muchas enzimas, y por eso es importante prevenir la entrada de este al citoplasma Alcaraz-Ariza (2012).

El efecto más frecuente sobre las plantas es la disminución del desarrollo debido a una disminución del potencial osmótico del medio de crecimiento y, en consecuencia, de su

potencial hídrico; la toxicidad iónica regularmente asociada con la absorción excesiva de Na^+ y de Cl^- , y por ende un desequilibrio nutricional debido a la interferencia de los iones salinos con la absorción de los nutrientes que requiere la planta (García y Jáuregui, 2008).

El estrés iónico está acompañado con altas relaciones Na^+/K^+ y $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ y la acumulación de Na^+ y Cl^- en los tejidos, por lo que es dañino para el metabolismo general de las células y reduce la captación de nutrientes minerales como K^+ , Ca^{2+} y Mn^{2+} (Chaman 2007; Karimi et al. 2009). Puede inhibir el desarrollo de las plántulas debido a la toxicidad iónica de una diversidad de procesos metabólicos, incluyendo enzimas que participan en la fotosíntesis, deficiencia en la nutrición mineral Buchanan et al. (2000).

Además de afectar el crecimiento y contenido mineral de las plantas, la salinidad tiene efecto sobre el funcionamiento de los estomas y la fotosíntesis, así como el contenido de clorofila en las plantas Ashraf y Bhatt (2000). La salinidad también delimita la capacidad de las plantas para absorber agua, provocando drásticamente una reducción en el crecimiento Munns (2002).

2.7 Fotosíntesis

La fotosíntesis es un proceso mediante el cual las plantas, algas y bacterias fotosintéticas son capaces de transformar la energía radiante en energía química (ATP y NADPH) y utilizarla para sintetizar compuestos orgánicos Pérez y Carril (2009).

El proceso fotosintético es realizado en dos fases, en la fase lumínica los tilacoides de los cloroplastos captan la energía solar y junto con el agua es absorbida y transformada en energía química ATP y el poder reductor NADPH libera oxígeno, en la fase oscura esta energía química y el poder reductor salen de los tilacoides y pasan al estroma del cloroplasto ahí suceden diferentes reacciones como ciclo de Calvin, el CO_2 se fija y se convierte en azúcares, aminoácidos y ácidos grasos que son la fuente de energía para la planta Pérez y Carril (2009).

2.7.1 Efecto de las sales en el proceso fotosintético

El estrés salino provoca una disminución en la tasa de crecimiento y consecuentemente la producción de los cultivos al interrumpir los procesos fisiológicos, específicamente la fotosíntesis. La acumulación de iones sodio en el tejido foliar en estrés salino cambia la

proporción de K:Na, lo que posiblemente afecte los procesos bioenergéticos de la fotosíntesis Sudhir & Murthy (2004).

Los procesos metabólicos inducidos por estrés hídrico repercuten en una disminución de la fotosíntesis, causando la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS por sus siglas en inglés) y la producción de la hormona vegetal ácido abscísico (ABA) Bartels y Sunkar (2005).

Una respuesta inducida por la salinidad en maíz (Cha-um y Kirdmanee, 2009), es la disminución de la concentración foliar de clorofila. En maíz, la disminución en la concentración de clorofila total inducida por NaCl, se relacionó con menores tasas de asimilación de CO₂ y transpiración (Lohaus et al., 2000) (Cha-um y Kirdmanee, 2009). Sin embargo, la degradación de la clorofila no fue un parámetro útil para diferenciar nivel de tolerancia a la salinidad en el maíz (Cha-um y Kirdmanee, 2009), a diferencia de otras especies tales como arroz (Lutts et al., 1996) y trigo (Argentel et al., 2006).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Localización del sitio experimental

El presente trabajo se realizó 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), la cual se localiza en las coordenadas 25°21'19.0"N 101°01'59.8"W, en Buenavista, al sur del municipio de Saltillo, Coahuila, México, sobre la Calzada Antonio Narro.

3.2. Preparación de soluciones salinas

La preparación de las soluciones salinas de sulfato de sodio (Na_2SO_4) (MERK), consistió en pesar el producto de acuerdo al cálculo realizado (0, 0.088, 0.176, 0.265, 0.353, 0.441, 0.530, 0.618, 0.706, 0.886 mg, 1.06, 1.24, 1.41g) en una balanza analítica (AND modelo HR-200), posteriormente se depositó cada uno en un vaso de precipitado que contenía 500 ml de agua destilada con una conductividad eléctrica de 3.61 $\mu\text{S}/\text{cm}$, seguidamente se colocó el vaso de precipitado en un agitador (Corning), para lograr la máxima dispersión de Na_2SO_4 . Una vez disuelto el producto se midió la CE, con un conductímetro de la marca Hach sension5, obteniendo las diferentes concentraciones (0, 0.25, 0.50, 0.75, 1.0, 1.25, 1.50, 1.75, 2.0, 2.50, 3.0, 3.50, 4.0 mS/cm).

3.3. Preparación de suspensión con nanopartículas de óxido de zinc

La solución con nanopartículas de óxido de zinc (NPsZnO), fue preparada a una concentración de 0.50 mg L⁻¹ en agua destilada, y dispersadas con un sonicador (AS2060B) por 20 minutos (dos tiempos de 10 min), y un testigo que consistió en agua destilada.

3.4. Imbibición de semillas

Se contaron 1300 semillas del híbrido comercial de maíz, colocando 100 por cada tratamiento con una pinza de disección, cerciorando que cada semilla este con el embrión hacia abajo, en cada caja de Petri.

Después de colocar las semillas acordes a cada tratamiento, se prosiguió a aplicar 30 ml de suspensión de NPsZnO, en concentraciones de 0 y 50 ppm, enseguida las cajas de Petri fueron

colocadas en una cámara bioclimática de la marca Thermo Scientific por 21 horas, a una temperatura de $25^{\circ}\text{C} \pm$ con una humedad relativa 50% y un fotoperiodo de 24 horas de obscuridad.

3.5. Siembra en papel Anchor

Transcurrido el tiempo de imbibición, se efectuó la siembra, la cual consistió en colocar 4 repeticiones de 25 semillas sobre el papel Anchor previamente humedecido con las diferentes concentraciones de Na_2SO_4 por cada tratamiento, de forma horizontal con el embrión hacia abajo logrando una distribución homogénea a lo largo del papel, previendo que a los laterales se deje 2 pulgadas y 10 cm de la parte superior. Una vez terminado la siembra se cubrieron las semillas con otra hoja de papel Anchor previamente humedecido y se enrolló dándole un aspecto de taco, seguidamente fueron marcadas con un lápiz para su correcta identificación. Las cuatro repeticiones de cada tratamiento se pusieron en una bolsa de polietileno, posteriormente se colocaron dentro de un contenedor de plástico y por último se introdujeron a una cámara de germinación marca Thermo Scientific.

3.6. Variables evaluadas

3.6.1. Vigor de germinación: Primer conteo de plántulas normales (plúmula y radícula emergida con una relación de dos veces, el tamaño de la semilla), se realizó a los 4 días después de la siembra, considerando este valor como un índice de vigor que posee la semilla para germinar en menor tiempo, el resultado es expresado en porcentaje.

3.6.2. Plántulas normales (PN): A los 11 días después de la siembra se realizó el conteo, considerando aquellas que poseen el sistema radicular y tallo bien desarrollado, sin ninguna mal formación visible, esto representa el porcentaje de germinación.

3.6.3. Contenido de clorofila: Esta variable se midió a los 10 días después de la siembra, se eligieron 5 plantas con la hoja bien desarrollada, por repetición de cada tratamiento. El aparato que se utilizó fue el SPAD 502.

3.6.4. Plántulas anormales (PA): En esta variable fueron consideradas aquellas que carecían de tallo y radícula, o presentaban algún defecto en sus estructuras que les impidió un desarrollo normal.

3.6.5. Semillas sin germinar (SSG): Son todas aquellas semillas que no tuvieron la capacidad de germinar, el valor se expresó en porciento.

3.6.6. Longitud de plúmula (LP) y de radícula (LR): Se midieron todas aquellas plántulas normales de cada tratamiento, la LP se midió desde la base de la zona de inserción de la raíz-mesocotilo hasta la punta de la última hoja desarrollada. La longitud de raíz se tomó donde inicia el mesocotilo hasta el ápice de la raíz primaria. Se utilizó una tabla con una hoja milimétrica graduada en centímetros, estas variables son indicativo del vigor de la plántula.

3.6.7. Peso seco de plúmula y de radícula: Se tomaron todas las plántulas normales de cada repetición, fueron divididas con una navaja de 2 filos donde comienza el mesocotilo, las plúmulas se colocaron dentro de bolsas de papel estraza perforadas; las radículas en otras y se identificaron. Posteriormente fueron colocadas en una estufa marca RIOSA modelo H-24, a una temperatura de 70°C durante 24 horas.

Transcurrido el tiempo se sacaron las bolsas y se colocaron en un desecador para que no tomaran la humedad del ambiente y afectara los valores, seguidamente se pesó cada una de las repeticiones en una balanza analítica AND modelo HR-200, y se obtuvo los datos para saber el peso seco representado en mg/plántula⁻¹.

Además, se determinó la relación peso seco de plúmula/peso seco de radícula (INDPS). Y un índice de vigor (IVI =germinación % x (PSP mg + PSR mg).

3.7 Análisis estadístico

El estudio se estableció en un diseño completamente al azar, con arreglo factorial (2 x 13), siendo dos los factores en estudio: 1. Concentración de NPsZnO (0, 50 mgL⁻¹) y 2. Conductividad eléctrica (0, 0.25, 0.50, 0.75, 1.0, 1.25, 1.50, 1.75, 2.0, 2.50, 3.0, 3.50, 4.0 mS/cm). Las variables evaluadas fueron analizadas para determinar diferencias estadísticas para las variables en estudio, también se realizó una comparación de medias con la Prueba de Tukey (P≤0.05), utilizando el paquete estadístico SAS (2004).

Modelo estadístico:

$$T_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \epsilon_{ijk}$$

Donde:

T_{ijk} = Valor observado en la variable de respuesta;

μ = Media general;

α_i = Efecto del i-ésimo ambiente salino;

β_j = Efecto de la j-ésima concentración de NPSZnO;

$(\alpha\beta)_{ij}$ = Interacción del i-ésimo ambiente salino y la j-ésima concentración de NPSZnO;

ε_{ijk} = Error experimental.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en el análisis de varianza de las pruebas llevadas a cabo en laboratorio con semillas de maíz, previamente imbibidas con NPsZnO y sometidas a diferentes concentraciones de Na₂SO₄ (Cuadro 1), muestran diferencias estadísticas ($P \leq 0.01$), en la fuente de variación conductividad eléctrica (CE), para las variables vigor de germinación, plántulas de alto vigor, y plantas de bajo vigor. Por otra parte, la variable semillas sin germinar mostró diferencias ($P \leq 0.05$), sin embargo, para el porcentaje de germinación y plántulas anormales no hubo diferencias estadísticas.

Por otra parte, las fuentes de variación concentración de nanopartículas y la interacción conductividad eléctrica por concentración de nanopartículas, tuvieron respuestas significativas ($P \leq 0.01$), en las variables vigor de germinación, plántulas de alto vigor y plántulas de bajo vigor; por el contrario, en porcentaje de germinación, plántulas anormales y semillas sin germinar no se encontraron diferencias estadísticas.

Los resultados indican que los tratamientos aplicados durante el proceso de imbibición modificaron la respuesta de la germinación y el desarrollo de las plántulas, efectos semejantes encontraron Laynez-Garsaball *et al.* (2007), en un trabajo similar realizado con semillas de maíz. Posteriormente, al revisar la comparación de medias, se explicará el efecto que se presentó al aplicar Na₂SO₄ en diferentes concentraciones.

En el Cuadro 2 se presentan los cuadrados medios de variables fisiológicas evaluadas en el bioensayo, en las fuentes de variación conductividad eléctrica y concentración de nanopartículas, las variables peso seco de plúmula, peso seco de radícula, índice de peso seco de la raíz/peso seco de la plúmula, e índice de vigor (IVI), resultaron ser altamente significativos ($P \leq 0.01$), a excepción del índice de vigor (IVI), en la fuente de variación concentración de nanopartículas, debido a que no mostró diferencias estadísticas.

Asimismo, en la interacción conductividad eléctrica x concentración de nanopartículas, las variables peso seco de plúmula, peso seco de radícula, índice de peso seco de la raíz/peso seco de la plúmula, y índice de vigor (IVI), presentaron diferencias estadísticas ($P \leq 0.01$).

Cuadro 1. Cuadrados medios del análisis de varianza del estudio de germinación de semillas de maíz para determinar el efecto modulador de las NPsZnO en ambientes salinos.

FV	GL	VIGOR (%)	GERMINACIÓN (%)	PAV (%)	PBV (%)	PA (%)	SSG (%)
CE	12	1663.80 **	49.48 ^{NS}	2442.03**	1921.44**	38.00 ^{NS}	12.51*
NPS	1	4687.41 **	10.86 ^{NS}	1923.15**	1532.51**	7.53 ^{NS}	0.62 ^{NS}
CE*NPS	12	321.34 **	28.31 ^{NS}	627.04**	560.80**	19.53 ^{NS}	7.28 ^{NS}
Error	77	46	33.59	70.67	62.81	26.00	5.75
CV %		8.08	6.21	10.95	47.99	92.70	183.27

NS= Diferencias no significativas; *= Diferencias significativas ($P \leq 0.05$); **= Diferencias altamente significativas ($P \leq 0.01$); FV = Fuente de variación; GL= Grados de libertad; vigor= plántulas normales al primer conteo; Germinación= plántulas normales al segundo conteo; PAV= plántulas de alto vigor; PBV= Plántulas de bajo vigor; PA= Plántulas anormales; SSG= Semillas sin germinar; CE= Conductividad eléctrica; NPS= Concentración de nanopartículas; CE*NPS= Conductividad eléctrica* concentración de nanopartículas; Error= Error experimental; CV=Coeficiente de variación.

Estos resultados indican que los tratamientos alteraron la acumulación de materia seca (mg/plántula^{-1}) de las variables evaluadas.

Los resultados indican que las plántulas al haberse desarrollado en diferentes ambientes salinos se vieron limitadas en cuanto al proceso de división celular, afectando el desarrollo vegetativo y contenido de materia seca (Ruiz *et al.*, 2014).

De acuerdo con el análisis de varianza, las variables longitud de plúmula, longitud de radícula, y la relación longitud de plúmula/longitud de radícula, mostraron diferencias estadísticas ($P \leq 0.01$), para las fuentes de variación conductividad eléctrica, concentración de nanopartículas y en la interacción conductividad eléctrica x concentración de nanopartículas, sin embargo, en la variable longitud de radícula para la fuente de variación concentración de nanopartículas, no se observaron diferencias (Cuadro 3).

Los resultados indican que la limitación en el desarrollo vegetativo y radicular se debe posiblemente a la disminución del potencial osmótico del medio de crecimiento y, en consecuencia, de su potencial hídrico (García y Jáuregui, 2008).

En el Cuadro 3, las fuentes de variación conductividad eléctrica, concentración de nanopartículas y la interacción conductividad eléctrica x concentración de nanopartículas, indicaron diferencias estadísticas ($P \leq 0.01$), para la variable contenido de clorofila. Lo anterior indica que las diferentes concentraciones salinas y de nanopartículas tienen efecto en el proceso de síntesis de la clorofila.

Cuadro 2. Cuadrados medios del análisis de varianza de las variables evaluadas en plántulas de maíz con sales y nanopartículas.

FV	GL	PSP (mg)	PSR (mg)	INDPSRP (mg)	IVI (mg)
CE	12	70.58**	54.21**	0.02**	143047.95**
NPS	1	399.91**	166.30**	0.23**	10623.20 ^{NS}
CE*NPS	12	24.09 **	48.22**	0.03**	44090.21**
Error	74	5.88	2.34	0.0012	15267.45
CV (%)		5.01	5.77	6.50	7.06

NS= Diferencias no significativas; *= Diferencias significativas ($P \leq 0.05$); **= Diferencias altamente significativas ($P \leq 0.01$); FV = Fuente de variación; GL= Grados de libertad; PSP= Peso seco de plúmula; PSR= Peso seco de radícula; INDPSRP= Índice de peso seco de radícula/peso seco de plúmula; IVI= Índice de vigor (porcentaje de germinación *peso seco de plúmula + peso seco de radícula); CE= Conductividad eléctrica; NPS= Concentración de nanopartículas; CE*NPS= Conductividad eléctrica*concentración de nanopartículas; Error= Error experimental; CV=Coeficiente de variación.

Cuadro 3. Cuadrados medios del análisis de varianza para las variables evaluadas en plántulas de maíz, obtenidas de semillas tratadas con sales y nanopartículas.

FV	GL	LP (cm)	LR (cm)	INDLP/LR (cm)	GL	CLOROFILA (S)
CE	12	185.67**	360.21 **	0.20**	12	407.39**
NPS	1	800.57**	8.40 ^{NS}	1.07**	1	1227.58**
CE*NPS	12	83.95**	85.89**	0.13**	12	424.62**
Error		4.69	6.78	0.02		10.66
CV (%)		14.10	12.82	19.30		15.72

NS= Diferencias no significativas; *= Diferencias significativas ($P \leq 0.05$); **= Diferencias altamente significativas ($P \leq 0.01$); FV= Fuente de variación; GL= Grados de libertad; LP= Longitud de plúmula; LR= Longitud de radícula; INDLP/LR= Índice de longitud de plúmula/longitud de radícula; Clorofila= Pigmentación verde de la hoja; CE= Conductividad eléctrica; NPS= Concentración de nanopartículas; CE*NPS= Conductividad eléctrica*concentración de nanopartículas; Error= Error experimental; CV=Coeficiente de variación.

Al realizar la comparación de medias por concentración de Na_2SO_4 (Cuadro 4), los resultados indican un buen vigor de germinación en el rango de 0 a 1.50 mS/cm, presentando 94%, y al incrementar la CE de 3.5 a 4 mS/cm, el vigor se redujo estadísticamente, reportando un 40 y 81%, respectivamente. Navarro et al. (2015) indican que el vigor es la sumatoria de aquellas propiedades de las semillas que determinan el nivel de actividad, metabolismo y la respuesta durante la germinación y emergencia de la plántula en un amplio rango de ambientes.

De acuerdo con este estudio, el retardo de la velocidad de germinación se debe posiblemente a una disminución en la absorción de agua o un efecto tóxico de los iones, los cuales afectan los niveles enzimático y hormonal (Kaya *et al.*, 2008).

En el porcentaje de germinación se observó, que, en el rango de 0 a 1.5 mS/cm de Na_2SO_4 presentó 98%, siendo el valor más alto, superando a la media general que obtuvo 93%, y al aumentar la conductibilidad eléctrica, se presentaron valores inferiores a la media (88%).

Este mismo efecto ha sido observado en siete especies forrajeras, entre ellas pasto ray grass, pasto estrella, cebada garbanzo, alfalfa y avena en condiciones *in vitro*, indicando que al haber un incremento en los niveles de salinidad produjo una reducción drástica en la imbibición y se vio reflejado en el porcentaje de germinación (Lastiri *et al.*, 2017).

Los resultados del estudio pueden ser atribuidos que al haber altas concentraciones de Na_2SO_4 , provocan una disminución de la movilidad del agua y por consecuencia la velocidad de imbibición de las semillas, que a su vez retardan la emergencia de la radícula y la plúmula.

Estos resultados concuerdan con Reyes-Pérez *et al.* (2013), que al probar diferentes variedades de albahaca (*Ocimum basilicum* L.), observaron mayores valores de porcentaje y tasa de germinación a una concentración de 0 mM de NaCl, y valores menores en 50 y 100 mM de NaCl.

Según Flowers *et al.* (2010), la disminución de la germinación se debe al haber un incremento en la concentración de NaCl, atribuyendo a una disminución o retardó de la imbibición en las semillas por los efectos tóxicos que ejercen los iones sobre ellas, afectando las funciones de la membrana y la pared celular del embrión.

Ruiz y Torenti (2012) al realizar estudios en cuatro especies forrajeras: *Agropyron elongatum*, *Antephora pubescens*, *Cenchrus ciliaris* cv. Texas y *Panicum coloratum* cv Klein

verde bajo condiciones de estrés hídrico y salino, encontraron que la velocidad y el porcentaje de germinación final, es drásticamente reducido al incrementar la concentración salina, además, observaron que el Na_2SO_4 es más tóxico que el NaCl , ya que fueron sometidos a los mismos potenciales osmóticos.

Algunas sales afectan la tasa de germinación y el porcentaje de germinación más que otras, al mismo estrés osmótico, debido a efectos tóxicos propios de cada ion y también de cada especie (Cam-Culim *et al.*, 2017; Ruiz y Torenti, 2012).

De acuerdo con Carpici *et al.* (2009) y Ruiz y Torenti (2012), indican que la germinación es el factor de mayor importancia para el establecimiento de un cultivo y al presentar condiciones de salinidad afectan la germinación, crecimiento, desarrollo y rendimiento final.

En el presente estudio fue relevante determinar el porcentaje de vigor de germinación y germinación como indicador de tolerancia al estrés salino, ya que es posible estimar la respuesta de las semillas de maíz en ambientes salinos.

Para la variable plántulas de alto vigor, se observaron diferencias estadísticas, mostrando que en concentraciones inferiores a 1.50 mS/cm, se expresó mejor respuesta de desarrollo de plántulas, presentando 88%, y al aumentar la concentración esta, se redujo, obteniendo un 25%. A diferencia con el porcentaje de plántulas de bajo vigor, este se reduce en concentraciones de baja de salinidad, y al aumentar, lo hace de igual forma hasta un 63%.

La variable plántulas anormales, no reportó diferencias estadísticas, pero si numéricamente, la concentración de 3.5 mS/cm de Na_2SO_4 , tuvo el mayor valor 11%, y el tratamiento control obtuvo 2%. Lo anterior refleja el daño causado por la salinidad en el proceso germinativo. Los resultados en este estudio están relacionados a un estrés osmótico, afectando negativamente los tejidos de las plantas, ya que se dificulta la extracción de agua por las raíces. Dicho estrés afecta principalmente en el desarrollo de las hojas y raíces, debido a que el agua es necesaria para que las células estén turgentes y les permita la expansión de la pared y la elongación celulares (Goumi *et al.*, 2014).

La variable semillas sin germinar no presentó diferencias estadísticas, indicando que en concentraciones bajas y altas de Na_2SO_4 , los porcentajes se mantienen en un rango de 0-4%.

Jamil *et al.* (2007) reportó efectos similares, en donde el crecimiento de las plántulas de repollo es fuertemente inhibido por niveles de NaCl, 4.7, 9.4 y 14.1 dS m⁻¹, siendo este último en donde presentó mayores daños, además indican que el desarrollo de las raíces se vio más afectado que el crecimiento de los brotes por el estrés salino.

De acuerdo con lo anterior, los resultados coinciden con Parés y Basso (2013), al suministrar concentraciones de NaCl en el agua de riego superiores a 4 dS m⁻¹, afectaron negativamente el crecimiento de las plantas de papaya Maradol; los efectos son atribuidos a la alta concentración de Na encontrada en el tejido foliar, asumiendo que la disminución del crecimiento haya ocurrido como una respuesta a la combinación de los efectos tóxicos y osmóticos. La disminución en el crecimiento podría deberse también a cambios en el estado hídrico celular y a disturbios en la toma y translocación de nutrientes causados por el estrés osmótico.

Rodríguez *et al.* (2019) asumen que la disminución en el crecimiento de las plantas es por cambios en el estado hídrico celular y por disturbios en la absorción y translocación de agua y nutrientes causados por el estrés osmótico. El ajuste osmótico es la disminución del potencial osmótico celular en las plantas como resultado de la acumulación activa de solutos en respuesta a estrés hídrico o salino (Munns, 2008).

En este estudio se observó que las plántulas de maíz a medida que las concentraciones de Na₂SO₄ se elevaron, se realizó un ajuste osmótico en sus células, como respuesta a un potencial hídrico muy negativo del medio de desarrollo, como consecuencia se observó que las plantas reducen su crecimiento debido a un mayor gasto de energía en la extracción agua de la solución del suelo.

En la comparación de medias Cuadro 5, para la variable peso seco de plúmula, muestra que al haber un incremento en la concentración de Na₂SO₄, se promovió la división celular, dando como resultado mayor acumulación de materia seca, obteniendo 52.30 mg/plántula⁻¹ y el testigo obtuvo 41.36 mg/plántula⁻¹. Este mismo efecto se presentó en la variable peso seco de radícula, consiguiendo 31.33 mg/plántula⁻¹, siendo el valor más alto al aplicar Na₂SO₄ y el tratamiento control obtuvo 26.20 mg/plántula⁻¹, comprobando que, en las dos variables, los resultados son estadísticamente diferentes.

Cuadro 4. Comparación de medias de las variables evaluadas en la germinación de semillas de maíz en diferente concentración salina.

CE	VIGOR (%)	GERMINACIÓN (%)	PAV (%)	PBV (%)	PA (%)	SSG (%)
0.00	94 a	98 a	88 ab	10 cd	2 b	0 a
0.25	92 a	95 ab	87 ab	8 d	4 ab	1 a
0.50	91 ab	96 ab	91 a	5 d	4 ab	0 a
0.75	78 c	92 ab	85 ab	7 d	5 ab	3 a
1.00	89 abc	90 ab	75 bcd	15 bcd	6 ab	4 a
1.25	90 ab	94 ab	82 abc	12 cd	5 ab	1 a
1.50	94 a	96 ab	89 ab	7 d	4 ab	0 a
1.75	82 bc	93 ab	80 abc	13 cd	6 ab	1 a
2.00	80 bc	92 ab	75 bcd	17 bcd	5 ab	3 a
2.50	89 abc	93 ab	69 cd	24 bc	6 ab	1 a
3.00	90 ab	93 ab	88 ab	5 d	6 ab	1 a
3.50	40 d	88 b	25 e	63 a	11 a	1 a
4.00	81 bc	93 ab	65 d	28 b	7 ab	0 a
Media	84	93	77	16	5	1
Tukey	11.65	10.15	14.72	13.80	8.71	4.09

Media= Valores con la misma literal en cada columna son estadísticamente iguales. CE= Conductividad eléctrica; vigor= Plántulas normales al primer conteo; Germinación= Plántulas normales al segundo conteo; PAV= Plántulas de alto vigor; PBV= Plántulas de bajo vigor; PA= Plántulas anormales; SSG= Semillas sin germinar.

De acuerdo con la relación peso seco de radícula/peso seco de plúmula, indica que el tratamiento control (CE = 0), obtuvo una mayor acumulación de biomasa en la parte aérea, debido a que no hubo presencia de sales que interviniera en la división celular, y por ende generó mayor acumulación de biomasa.

Esto coincide con Reyes-Pérez *et al.* (2013), al trabajar con diferentes variedades de albahaca, observaron que la acumulación de la materia fresca y seca de la parte aérea mostró mayores valores en 50 y 100 mM, y valores inferiores con el tratamiento control. Este incremento en la acumulación de biomasa seca a niveles moderados y relativamente altos son atribuidos al haber un incremento en la síntesis de azúcares, prolinas y aminoácidos para disminuir el efecto osmótico de la salinidad en etapa de desarrollo, asociando la presencia de mecanismos de tolerancia a las sales en las variedades.

En contraste Pares y Basso (2013), al trabajar con plántulas de papaya Maradol en etapa de vivero, encontraron que al adicionar 8 dS m⁻¹ de NaCl en el agua de riego, redujo la acumulación de materia seca en la parte aérea en un 35%, en comparación con el tratamiento control al cual no se le agregó sales; posteriormente continuaron su desarrollo hasta la culminación de la etapa juvenil, se observó una recuperación de la biomasa aérea de las plantas sometidas al tratamiento más salino ya que la reducción de la biomasa fue solo del 10% en comparación al control.

Sangoquiza *et al.* (2021) al trabajar con semillas de maíz variedad Tayuyo en condiciones *in vitro*, observaron un retardo en la velocidad de germinación al someterlos a niveles altos de salinidad, además, la longitud de la radícula, crecimiento de la plúmula, el número de hojas y el peso de la materia fresca mostraron una tendencia a disminuir con el incremento en las concentraciones de salinidad desde 4, 6 y 8 dS m⁻¹. Estos resultados muestran como el efecto de las sales causan una disminución evidente sobre el desarrollo radicular ya que interrumpe los procesos de síntesis de proteínas. El crecimiento de las plántulas también es perjudicado, por acumulaciones altas de iones salinos en las células.

Carpici *et al.* (2009) trabajaron con 6 variedades de maíz, encontrando un efecto marcado en el porcentaje de germinación, peso seco de brotes y raíces al aplicar 0, 50, 100, 150, 200 y 250 mM de NaCl. Los resultados mostraron que la variedad C-955 es la más tolerante y

Progen-1550 es la más sensible a niveles altos de salinidad. Esto significa que hay diferencias genéticas entre variedades con respecto al estrés salino.

Así mismo, Oliva et al. (2008) señalan que la aplicación de 80 mM de NaCl a plántulas de tamarindo, el peso seco de la raíz disminuye 10.1 g equivalente a 72% con respecto al testigo sin sales. El peso seco del tallo presentó mayor daño que la acumulación de biomasa seca de la raíz, debido a que la disminución fue de 14.8 g (83%), empleando la concentración de 80 mM con respecto al tratamiento control.

Cuadro 5. Comparación de medias de las variables evaluadas en la germinación de semillas de maíz y la cantidad de biomasa acumulada en diferente concentración salina.

CE	PSP (mg)	PSR (mg)	INDPSRP (mg)	IVI (mg)
0.00	41.36 d	26.20 cde	0.63 a	1650.27 cde
0.25	47.18 bc	26.78 cd	0.58 ab	1759.53 bcd
0.50	50.22 ab	24.55 def	0.48 de	1786.08 a-d
0.75	49.42 ab	24.55 def	0.49 cde	1699.46 cd
1.00	47.11 bc	22.43 f	0.47 e	1576.49 de
1.25	49.08 ab	24.44 def	0.51 cde	1732.09 bcd
1.50	52.11 a	31.33 a	0.60 ab	1992.84 a
1.75	48.39 ab	27.02 cd	0.55 bc	1752.55 bcd
2.00	48.94 ab	27.63 cd	0.54 bcd	1738.17 bcd
2.50	49.41 ab	28.51 bc	0.58 ab	1803.51 abc
3.00	52.30 a	30.50 ab	0.58 ab	1934.21 ab
3.50	44.07 cd	23.84 ef	0.54 bcd	1482.91 e
4.00	49.87 ab	27.11 cd	0.54 bcd	1798.18 abc
Media	48.47	26.48	0.55	1747.91
Tukey	4.24	2.67	0.062	216.47

Medias = Valores con la misma literal en cada columna son estadísticamente iguales, PSP= Peso seco de plúmula; PSR= Peso seco de radícula; INDPSRP= Índice de peso seco de radícula/peso seco de plúmula; IVI= Índice de vigor (porcentaje de germinación *peso seco de plúmula + peso seco de radícula); CE= Conductividad eléctrica.

Al efectuar la comparación de medias (Cuadro 6), por concentración de NPsZnO, la variable vigor de germinación presentó diferencias estadísticas, al aplicar 50 ppm de NPsZnO, con 77%, mientras que el tratamiento control obtuvo 90%. Los resultados indican un efecto fitotóxico en la aplicación de NPsZnO.

En contraste con los resultados obtenidos, Estrada *et al.* (2017) mencionan que las NPsZnO mejoran el vigor y el porcentaje de germinación, así también Sedghi *et al.* (2013) indican que la germinación de semillas de soya es promovida aplicando 1.0 g L^{-1} de NPsZnO.

Vasanth *et al.* (2016) reportaron efectos benéficos en la velocidad de germinación de las semillas al aplicar NPsZnO, indicando que esto sucede debido a un fácil ingreso del nanomaterial al interior de la semilla, incrementando el potencial hídrico y degradación de reservas.

Otros trabajos realizados por Raskar y Laware (2014), indican que al aplicar 0, 10, 20, 30 y 40 mg/ml^{-1} de NPsZnO, los índices de germinación mostraron valores mayores en concentraciones menores, sin embargo, estas disminuyeron significativamente en concentraciones altas. Así mismo De la Rosa *et al.* (2013), al realizar estudios en pepino, alfalfa y tomate encontraron que al aplicar 1600 mg L^{-1} de NPsZnO, la germinación aumentó en un 10% pero hubo una disminución del 40 y 20%, respectivamente.

De acuerdo con lo mencionado Wang *et al.* (2015) y García-López *et al.* (2017), señalan que las NPs tienen efectos promotores o inhibidores, ya sea en etapas de germinación o desarrollo, está en función al tipo de nanomaterial, concentración, tamaño y genotipo.

En las variables porcentaje de germinación, plántulas anormales y semillas sin germinar, no se observaron diferencias estadísticas. Esto indica que la respuesta a la aplicación de NPsZnO, fue igual al tratamiento control (0 ppm NPsZnO).

De acuerdo con la variable plántulas de alto vigor, se observan diferencias estadísticas en la aplicación de 50 ppm de NPsZnO, presentó 72%, siendo un valor inferior al tratamiento control, que obtuvo 81%, y, por ende, el porcentaje de plántulas de bajo vigor aumentó hasta en un 21%. Mostrando así, que la aplicación de NPsZnO tienen un efecto inhibitorio en el desarrollo vegetativo.

Para la variable peso seco de plúmula, se observaron diferencias estadísticas entre el tratamiento 0 ppm y 50 ppm NPsZnO, en donde la acumulación de materia seca fue de 46.64 y 50.39 mg/plántula, respectivamente. Por el contrario, en el peso seco de la radícula, al aplicar 50 ppm de NPsZnO, el contenido de biomasa disminuyó, obteniendo un valor de 25.14 mg/plántula y el tratamiento control 27.75 mg/plántula.

La relación peso seco de radícula/peso seco de plúmula, indican diferencias entre tratamientos; se observa mayor acumulación de materia seca en la raíz en el tratamiento control presentando 0.59 mg/plántula⁻¹; y la aplicación de 50 ppm de NPsZnO obtuvo 0.50 mg/plántula⁻¹. Por el contrario, en la variable índice de vigor no se observaron diferencias estadísticas.

Panwar *et al.* (2012) indican un mejor desarrollo y acumulación de materia seca en plántulas de tomate al aplicar foliarmente 20 mg mL⁻¹ de NPsZnO, además al realizar el análisis del material vegetal reveló la presencia del Zn en las hojas.

En el reporte de Booyanitipong *et al.* (2011), mencionan que las concentraciones de 100, 500 y 1000 mgL⁻¹ de NPsZnO atrofian la longitud radical y reduce el número de raíces secundarias en plántulas de arroz.

Varios reportes revelan que la fitotoxicidad causada por algunas NPs genera un comportamiento impredecible sobre el estrés oxidativo, dependiendo del tipo, composición química, concentración y medio de exposición de las NPs (Lei *et al.*, 2008); Song *et al.*, (2012); García-López *et al.*, (2017)).

Medina *et al.* (2017) trabajando con plántulas de frijol y girasol, observaron que las NPs de TiO₂ y ZnO, causaron una disminución significativa del diámetro del tallo y la actividad fotosintética al aplicar altas dosis de NPs.

Arias-García y De la Rosa Álvarez (2015) indican que las NPsZnO en altas concentraciones en el medio de desarrollo, afecta significativamente el crecimiento de plántulas de girasol. El análisis de rayos x demostró niveles altos de NPs en la planta.

Yanik y Vardar (2015) al experimentar con plantas de *Triticum aestivum*, evaluaron los efectos dependientes del tiempo (24, 48, 72 y 96 h), y la aplicación de diferentes concentraciones de NPs de Al₂O₃ (0, 5, 25, 50 mg/ml), los resultados indicaron una reducción

radicular en 40.2% en 5 mg/ml, 50.6% en 25 mg/ml y 54.5% mg/ml a las 96 h. El análisis histoquímico reveló la acumulación de lignina, deposición callosa y daño en las células de la corteza de la raíz. Después de las 96 h, la actividad peroxidasa aumentó, lo que es considerado como uno de los factores de estrés oxidativo, así mismo se encontró que las NPs de Al_2O_3 indujeron la fragmentación del ADN, considerado como uno de los marcadores de la muerte celular programada.

En contraste con los resultados obtenidos, varios estudios demuestran efectos positivos al aplicar NPsZnO, García-López *et al.* (2017) obtuvieron un mayor porcentaje de germinación, plantas vigoras y longitud radicular al imbibir semillas de chile habanero en concentraciones de 100, 200, 300 ppm de NPsZnO. Méndez-Argüello *et al.* (2016) al aplicar al follaje NPsZnO puras y con Ag a una dosis de 1.25 y 2.5% molar, consiguieron incrementar el desarrollo vegetativo, acumulación de materia seca y mayor contenido de clorofila en la hoja.

Shamkramma *et al.* (2015) indican que al recubrir semillas de tomate con NPs de Fe_2O_3 mostraron mejor germinación, longitud de plúmula y radícula expresando plantas vigorosas, observando que la NP empleada se deposita principalmente en los pelos radicales y en la zona nodal y media de la planta.

Cuadro 6. Comparación de medias del efecto de las nanopartículas en la germinación de semillas de maíz.

NPS (ppm)	VIGOR (%)	GER (%)	PAV (%)	PBV (%)	PA (%)	SSG (%)	PSP (mg)	PSR (mg)	INDPSRP (mg)	IVI (mg)
0	90 a	94 a	81 a	13 b	5 a	1 a	46.64 b	27.75 a	0.59 a	1741.16a
50	77 b	93 a	72 b	21 a	6 a	1 a	50.39 a	25.14 b	0.50 b	1754.94 a
Media	84	93	77	16	5	1	48.47	26.48	0.55	1747.91
Tukey	2.66	2.31	3.35	3.14	1.99	0.93	0.96	0.60	0.01	49.25

NPS= Nanopartículas; VIGOR= Plántulas normales al primer conteo; GER= Plántulas normales al segundo conteo; PAV= Plántulas de alto vigor; PBV= Plántulas de bajo vigor; PA= Plántulas anormales; SSG= Semillas sin germinar; PSP= Peso seco de plúmula; PSR= Peso seco de radícula; INDPSRP= Índice de peso seco de radícula/peso seco de plúmula; IVI= Índice de vigor (porcentaje de germinación * peso seco de plúmula + peso seco de radícula); Media= Valores con la misma literal en cada columna son estadísticamente iguales.

V. CONCLUSIONES

Los tratamientos con NPsZnO tuvieron efecto positivo en la variable peso seco de plúmula, a una concentración de 50 ppm.

Ambientes con Na₂SO₄ en un rango de 0.25 a 1.50 mS/cm, incrementaron el vigor de germinación, porcentaje de germinación, plántulas de alto vigor, peso seco de plúmula y peso seco de radícula. Sin embargo, en ambientes mayores a 1.50 mS/cm, las variables antes mencionadas fueron afectadas severamente.

La interacción Na₂SO₄ x NPsZnO mostró una modulación positiva para las variables plántulas de alto vigor, peso seco de plúmula, peso seco de radícula e índice de vigor.

VI. BIBLIOGRAFÍA

- Alcaraz-Ariza, F. J. 2012. Salinidad y vegetación. Geobotánica Tema 18. Universidad de Murcia España. <https://www.um.es/docencia/geobotanica/ficheros/tema18.pdf>. (Consultado: junio 2021).
- Alfonso, R. V. 1998. Determinación de los parámetros genéticos-fisiológicos indicadores del estrés hídrico para su empleo en el mejoramiento genético del arroz (*Oryza sativa* L.) y la estabilidad varietal. Tesis de grado; INCA, Cuba. 86.
- Amezcu Romero, J. C., y Lara, F. M. 2017. El zinc en plantas. *Ciencia*. 68(3):28-35.
- Argentel M. L., González L. M., y Plana R., 2006. Efecto de altas concentraciones salinas sobre la germinación y el crecimiento del trigo (*Triticum aestivum*) variedad Cuba-C-204. *Cultivos Tropicales*. 27:45-48.
- Arias García, F. I., y De La Rosa Alvarez, M. G. 2015. Toxicidad de nanopartículas metálicas en maíz y girasol, especies de interés económico y alimentario de la región del bajo. *Jóvenes en la Ciencia*. 1(2):424-428.
- Ariel. M. D., Ayrault. G., Noelia. D. R., y Abdala. G. 2008. Tolerancia a la salinidad en dos portainjertos de citrus: crecimiento, composición mineral y ajuste osmótico. *Rev. FCA UN Cuyo*. 97-104.
- Ashraf, M. Y and Bhatt, S. 2000. Effect of salinity on growth and chlorophyll content in rice. *Pakistan Journal of Scientific and Industrial Research*. 43:130-132.
- Bartels, D., and Ramanulu, S. 2005. Drought and salt tolerance in plants. *Plant Sciences*. 24:23-58.
- Bartels, D., and Sunkar, R. 2005. Drought and salt tolerance in plants. *Critical Reviews in Plant Sciences*. 24:23-58.
- Basurto, S. M., Núñez, B. A., Pérez, L. R., Hernández Rodríguez, O. A. 2008. Fisiología del estrés ambiental en plantas. *Aventuras del pensamiento*. Facultad de Ciencias Agrotecnológicas. Universidad Autónoma de Chihuahua, México. 45:1-5.

- Booyanitipong, P., Kositsup, B., Kumar, P., Baruah, S., and Dutta, J. 2011. Toxicity of ZnO and TiO₂ Nanoparticles on Germinating. *International Journal of Bioscience, Biochemistry and Bioinformatics*. 1(4):282-285.
- Buchanan, B. B., Wilhelm, G., and Russell, L. J. 2000. *Biochemistry & Molecular Biology of plants*. American Society of Plant Physiologists. 1367.
- Cam-Culim, A., Cruz-Crespo, E., Ortega-Escobar, H. M., Sánchez-Bernal, Madueño-Molina, A., Bojórquez-Serrano, J. I., y Mancilla-Villa, O. R. 2017. Respuesta de *Phaseolus vulgaris* a la salinidad generada por NaCl, Na₂SO₄ y NaHCO₃. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 8(6):1287-1300.
- Carpici, E. B., Celik, N. and Bayram. G. 2009. Effects of salt stress on germination of some maize (*Zea mays* L.) cultivars. *African Journal of Biotechnology*. 8(19):4918-4922.
- Carpici, E. B., Celik, N. and Bayram. G. 2009. Effects of salt stress on germination of some maize (*Zea mays* L.) cultivars. *African Journal of Biotechnology*. 8(19):4918-4922.
- Chaman, M. M. E. 2007. Variaciones en el contenido relativo de agua y la concentración de prolina en *Capsicum annuum* L. inducido por NaCl. *Arnaldoa*. 14(2):251- 258.
- Cha-um S., and Kirdmanee C. 2009. Effect of salt stress on proline accumulation, photosynthetic ability, and growth characters in two maize cultivars. *Pak. J. Bot.* 41:87-98.
- De la Rosa, G., López-Moreno, M. L., Haro, D., Botez, C. E., Peralta-Videa, J. R., and Gardea-Torresdey, J. L. 2013. Effects of ZnO nanoparticles in alfalfa, tomato, and cucumber at the germination stage: Root development and X-ray absorption spectroscopy studies. *Pure Appl. Chem.* 85:2145–2248.
- Estrada, U. J., Méndez, A. A., y Vázquez, D. A. 2017. Mejoramiento de la calidad fisiológica de la semilla de maíz nativo (*Zea mays* L.) mediante la aplicación de nanopartículas de óxido de zinc. In: Lira-Saldívar, R. H., y B. Méndez-Argüello, I. Vera-Reyes. (comps). *AgroBio Nanotecnología: Nuevo paradigma científico en la producción de alimentos*. Saltillo, Coahuila, México. 255-257.

Flowers, T. J., Gaur, P. M., Gowda, C. L. L., Krishnamurthy, L., Samineni, S., Siddique, K. H. M., and Colmer, T. J. 2010. Salt sensitivity in chickpea. *Plant Cell & Environment*. 33(4):490-509.

García, M., Jáuregui, D. 2008. Efecto de la salinización con NaCl o Na₂SO₄ sobre la anatomía foliar en dos genotipos de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) con tolerancia salina diferencial. *Ernstia*. 18(1):89-105.

García-López, J., Zavala-García, F., Olivares-Sáenz, E., Ruiz-Torres, N. A., Ramos-Cortez, E., Vera. R. I., Argüello-Méndez, B., García-Rodríguez, D. A., y Lira-Saldívar, R. H. 2017. Interacción de las nanopartículas ZnO sobre la germinación y crecimiento temprano de plántulas de chile habanero (*Capsicum chinense*). In: Lira-Saldívar, R. H., y B. Méndez-Argüello, I. Vera-Reyes. (comps). *AgroBio Nanotecnología: Nuevo paradigma científico en la producción de alimentos*. Saltillo, Coahuila, México. 51-64.

Goumi, Y. E., Fakiri, M., Lamsaouri, O., and Benchekroun, M. 2014. Salt stress effect on seed germination and some physiological traits in three Moroccan barley (*Hordeum vulgare* L.) cultivars. *Biology*. 625-636.

Hussain, A., Arshad, M., Zahir, A. Z., and Asghar, M. 2015. Prospects of zinc solubilizing bacteria for enhancing growth of maize. *Pakistan Journal of Agricultural Research*. 52(4): 915-922.

Jamil, M., Lee, K. B., Jung, K. Y., Lee, D. B., Han, M. S., and Rha, E. S. 2007. Salt stress inhibits germination and early seedling growth in cabbage (*Brassica oleracea capitata* L.). *Pak. J. Biol. Sci.* 10(6):910-914.

Karimi, S., Rahemi, M., Maftoun, M. E. and Tavallali, V. 2009. Effects of Long-term Salinity on Growth and Performance of Two Pistachio (*Pistacia* L.) Rootstocks. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. 3(3):1630-1639.

Kaya, M., Kaya, G., Kaya, M. D., Atak, M. Saglam, S., Khawar, K. M., and Ciftci, C. Y. 2008. Interaction between seed size and NaCl on germination and early seedling growth of some Turkish cultivars of chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Zhejiang University-Science B*. 9(5):371-377.

- Lamz, P. A., y González, C. M. C. 2013. La salinidad como problema en la agricultura: la mejora vegetal una solución inmediata. *Cultivos Tropicales*. 34:31-42.
- Lastiri, H. M. A., Álvarez. B. D., Soria, M. L. H., Ochoa, E. S., y Cruz-Cárdenas, G. 2017. Efecto de la salinidad en la germinación y emergencia de siete especies forrajeras. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 8(6):1245-1257.
- Layne-Garsaball, J. A., Méndez-Nateral, J. M. y Mayz-Figueroa, J. 2008. Efecto de la salinidad y del tamaño de la semilla sobre la germinación y crecimiento de plántulas de maíz (*Zea mays* L.) bajo condiciones de laboratorio. *Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*. 11(1):17-25.
- Layne-Garsaball, J. A., Rafael, M. J., Mayz-Figueroa, J. 2007. Efecto de la salinidad del suelo sobre la germinación de semillas de maíz de diferentes pesos en el oriente venezolano. *Temas Agrarios*. 70-71.
- Lei, Z., Mingyu, S., Xiao, W., Chao, L., Chunxiang, Q., Liang, C., Hao, H., Xiaoqing, L., and Fashui, H. 2008. Antioxidant stress is promoted by nano-anatase in spinach chloroplasts under UV-B radiation. *Biol Trace Elem Res*. 121(1):69-79.
- Lohaus G., Hussmann M., Pennewiss K., Schneider H., Zhu J.J., Sattelmacher, B., 2000. Solute balance of a maize (*Zea mays* L.) source leaf as affected by salt treatment with special emphasis on phloem retranslocation and ion leaching. *J. Exp. Bot*. 51: 1721-1723.
- Lutts S., Kiner J.M., Bouharmont J., 1996. NaCl-induced senescence in leaves of rice (*Oryza sativa* L.) cultivars differing in salinity resistance. *Ann. Bot*. 78: 389-398.
- Martínez, V. N., López, A.C. V., Basurto, S. M., Pérez, L. R. 2011. Efectos por salinidad en el desarrollo vegetativo. *Tecnociencia Chihuahua*. 5(3):156-161.
- Medina, P. G., Fernández, L. F., López, V. F., Del Razo-Rodríguez, O. E., Almaraz, B. I., y Campos-Montiel, R. G. 2017. Cultivo de frijol, maíz y girasol en suelo agrícola acondicionado con nanopartículas de TiO₂ y ZnO. In: Lira-Saldívar, R. H., y B. Méndez-Argüello, I. Vera-Reyes. (comps). *AgroBio Nanotecnología: Nuevo paradigma científico en la producción de alimentos*. Saltillo, Coahuila, México. 173-189.

- Méndez-Argüello, B., Vera-Reyes, I., Mendoza-Mendoza, E., García-Cerda, L.A., Puente-Urbina, B.A., y Lira-Zaldívar, R. H. 2016. Promoción del crecimiento en plantas de *Capsicum annuum* por nanopartículas de óxido de zinc. *Nova Scientia*. 8(17):140-156.
- Mesa, D. 2003. Obtención de plantas resistentes a la salinidad para los suelos salinos cubanos. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*. 37:217-226.
- Munns, R. 2002. Comparative physiology of salt and water stress. *Plant, Cell and Environment*. 25:239–250 pp.
- Munns, R. 2008. Why Measure Osmotic Adjustment? *Australian Journal of Plant Physiology*. 32:811-821.
- Munns, R., and Tester, M. 2008. Mechanisms of Salinity Tolerance. *Annual Review of Plant Biology*. 59(1):651–681 pp.
- Naderi, M. R., and Danesh, S. A. 2013. Nanofertilizers and their roles in sustainable agriculture. *International journal of agriculture and Crop Sciences (IJACS)*. 5(19):2229-2232.
- Navarro, M., Febles, G., and Herrera, R. S. 2015. Vigor: essential element for seed quality. *Cuban Journal of Agricultural Science*. 49(4):447-458.
- Oliva, A., Rincón, R., Zenteno, E., Pinto, A., Dendooven, L., y Gutiérrez, F. 2008. Rol del vermicompost frente al estrés por cloruro de sodio en el crecimiento y fotosíntesis en plántulas de tamarindo (*Tamarindusindica* L.). *Gayana Botánica*. 65(1):10-17.
- Pandey, A. C., Sanjay, S. S., and Yadav, R., S. 2010. Application of ZnO nanoparticles in influencing the growth rate of *Cicer arietinum*. *Journal of Experimental Nanoscience*. 5(6):488–497.
- Panwar, J., Jain, N., Bhargava, A., A Khatar, M. S., and Yun, Y. S. 2012. Positive effect of Zinc Oxide nanoparticles on tomato plants: A step towards developing “Nano-fertilizers”. *International Conference on Environmental Research and Technology (ICERT)*. 348-352.
- Parés, J. y Basso, C. 2013. Efecto del cloruro de sodio sobre el crecimiento y estado nutricional de plantas de papaya. *Bioagro*. 25(2):109-116.

- Pérez, E., y Carril, U. 2009. Fotosíntesis: aspectos básicos. *Reduca (Biología), Serie Fisiología Vegetal*. 2(3):1-47.
- Prasad, R., Kumar, V., and Suranjit, P. K. 2014. Nanotechnology in sustainable agriculture: Present concerns and future aspects. *African Journal of Biotechnology*. 13(6):705-713.
- Prasad, T., Sudhakar, P., Sreenivasulu, Y., Latha, P., Munaswamy, V., Raja, R. K., Sreeprasad, T.S., Sanjanlal, P.R., and Pradeep, T. 2012. Effect of nanoscale zinc oxide particles on the germination, growth, and yield of peanut. *Journal of Plant Nutrition*. 35:37-41.
- Raskar, S. V., and Laware, S. L. 2014. Effect of zinc oxide nanoparticles on cytology and seed germination in onion. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. 3(2):467-463.
- Reyes-Pérez, J. J., Murillo-Amador, B., Nieto-Garibay, A., Troyo-Diéguéz, E., Reynaldo-Escobar, I. M., y Rueda-Puente, E. O. 2013. Germinación y características de plántulas de variedades de albahaca (*Ocimum basilicum* L.) sometidas a estrés salino. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 4(6):869-880.
- Rodríguez, F. O. 2016. Desarrollo de la Investigación Sobre Nanotecnología en el Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA-CONACYT). In: Lira-Saldívar, R. H., y B. Méndez-Argüello. (comps). *Agronano Tecnología*. Saltillo, Coahuila, México. 7-19.
- Rodríguez, N. D., Torres, S. C. N., Chaman, M. M. E., Hidalgo-Rodríguez, J. E. M. 2019. Efecto del estrés salino en el crecimiento y contenido relativo del agua en las variedades IR-43 y amazonas de *Oryza sativa* “arroz” (Poaceae). *Arnaldoa*. 26(3):931-942.
- Roy, S. J., Negrao, S., and Tester, M. 2014. Salt resistant crop plants. *Current Opinion in Biotechnology*. 26:115-124.
- Rudami, K., Patel, V., and Prajapati, K. 2018. The importance of zinc in plant growth -a review. *International Research Journal of Natural and Applied Sciences*. 5(2):38-48.
- Ruiz, E. F. H., Villalpando, G. R. L., Murillo, A. B., Beltrán, M. F. B., & Hernández, M. L.G. 2014. Differential Response to Salinity in Tomato Genotypes (*Lycopersicon Esculentum* Mill.) in Early Phenological Stages. *Terra Latinoamericana*. 32:311-323.

- Ruiz, M. y Torenti, O. 2012. Germinación de cuatro pastos bajo condiciones de estrés salino. *Phyton*. 81(2):169-176.
- Sangoquiza Caiza, C. V., Viera, T. Y., Yáñez Guzmán, C. F., y Zambrano Mendoza, J. L. 2021. Efecto del estrés salino sobre el crecimiento de plántulas de maíz variedad “Tayuyo” en condiciones *in vitro*. *Centro Agrícola*. 48(2):14-23.
- SAS. 2004. Statistical Analysis System, User's Guide. Statistical. Version 7th ed. SAS. Inst. Inc. Cary. N.C. USA.
- Sedghi, M., Hadi, M., and Toluie, S. G. 2013. Effect of nano zinc oxide on the germination parameters of soybean seeds under drought stress. *Annals of West University of Timisoara, ser. Biology*. 16(2):73-78.
- Shamkamma, K., Yallappa, S., Shivanna, M. B., and Manjanna, J. 2015. Fe₂O₃ magnetic nanoparticles to enhance *S. lycopersicum* (tomato) plant growth and their biomineralization. *Applied Nanoscience*. 6:983-990.
- SIAP. 2020. Servicio de información agroalimentaria y pesquera. <https://www.inforural.com.mx/wp-content/uploads/2020/11/Atlas-Agroalimentario-2020.pdf>. (Consulta: octubre 2021).
- Solanki, P., Bhargava, A., Chhipa, H., Jain, N., & Panwar, J. 2015. Nano-fertilizers and Their Smart Delivery System. *Nanotechnologies in Food and Agriculture*. 81–101.
- Song, G., Gao, Y., Wu, H., Hou, W., Zhang, C., and Ma, H. 2012. Physiological effect of anatase TiO₂ nanoparticles on *Lemna minor*. *Environ Toxicol Chem*. 31(9):2147-2152.
- Srilatha, B. 2011. Nanotechnology in Agriculture. *Journal of Nanomedicine and Nanotechnology*. 2:123-128.
- Sudhir, P., and Murthy, S. 2004. Effects of salt stress on basic processes of photosynthesis. *Photosynthetica*. 42:481-486.
- Vasanth, N., Melchias. G., and Kumareve, P. 2016. Evaluation of silver bio-nanoparticles synthesized with the mediation of ziziphus jujuba fruit extract on bactericidal compatibility and seed viability. *Indo American Journal of Pharmaceutical Research*. 6(7):6125-6135.

Wang, S., Liu, H., Zhang, Y., and Xin, H. 2015. The effect of CuO NPs on reactive oxygen species and cell cycle gene expression in roots of rice. *Environmental Toxicology and Chemistry*. 34(3):554–561.

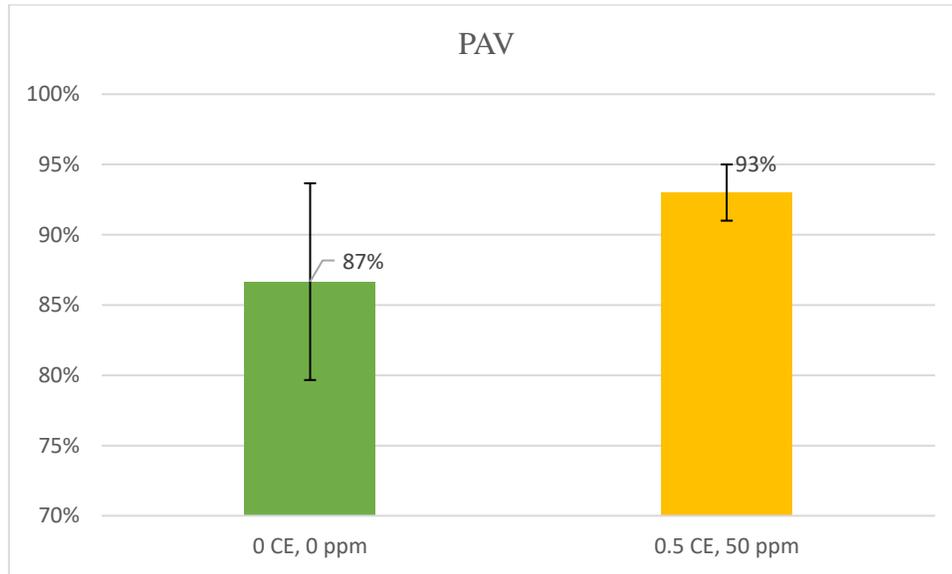
Yadollahia, A., Arzani, K. and Khoshgalb, H. 2010. The Role of Nanotechnology in Horticultural Crops Postharvest Management. In *Southeast Asia Symposium on Quality and Safety of Fresh and Fresh-Cut Produce*. 875:49-56.

Yanik, F., and Vardar, F. 2015. Toxic Effects of Aluminum Oxide (Al_2O_3) Nanoparticles on Root Growth and Development in *Triticum aestivum*. *Water Air Soil Pollut*. 296:3-13.

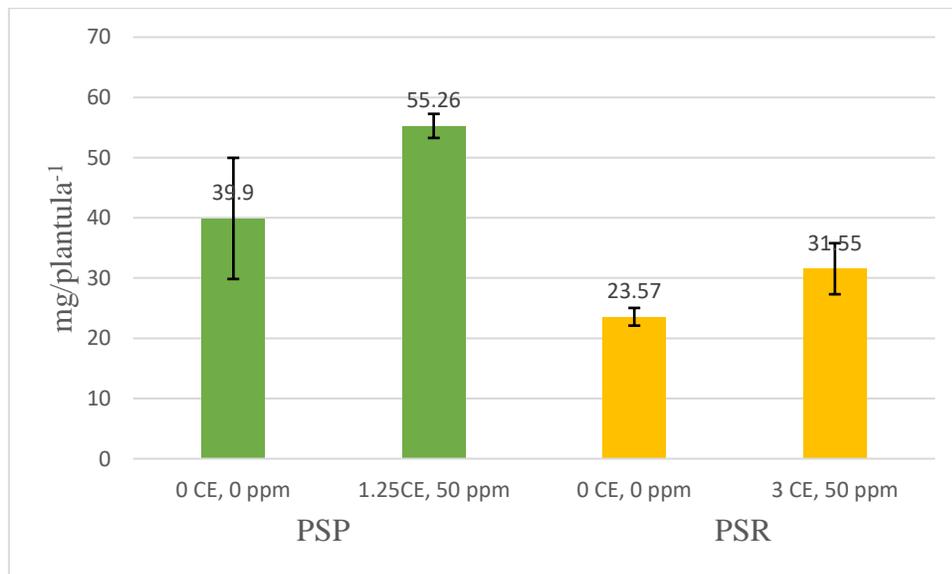
Zamudio, G. B., López. P. L., Alcántar. G. G., Gonzáles-Eguiarte. D R., Ruiz. C. J A., Castellanos, J. Z. 2004. Delimitación de áreas salinas en el distrito de riego de Caborca, Sonora, México. *Terra Latinoamericana*. 22(1):91-97.

VII. ANEXOS

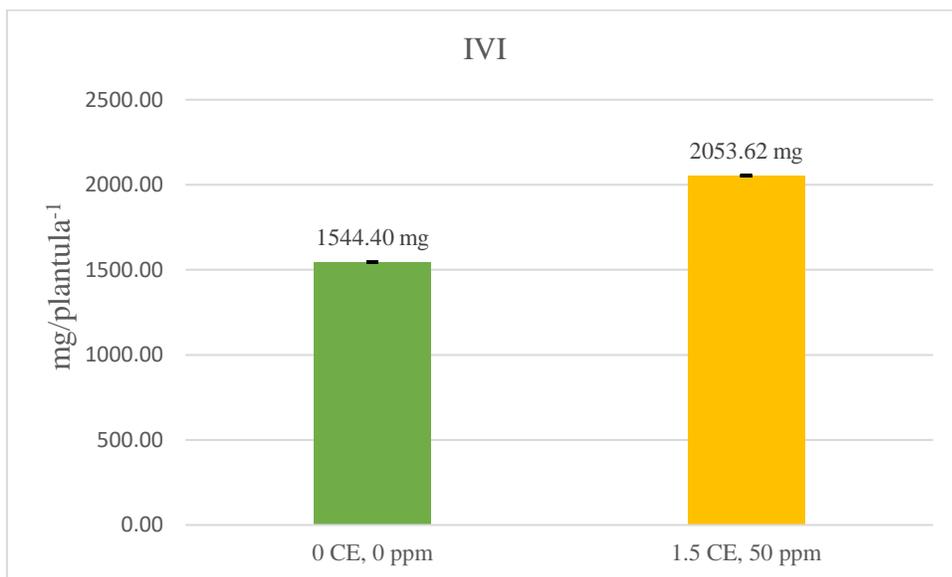
Anexo 1. Plántulas de alto vigor en ambientes salinos, obtenidas de semillas tratadas con NPsZnO.



Anexo 2. Comparación de peso seco de plúmula y peso seco de radícula, tratado con NPsZnO y sometido a ambientes salinos.



Anexo 3. Efecto de los medios salinos en el índice de vigor de semillas tratadas con NPsZnO.



Anexo 4. Plántulas de bajo vigor, plántulas anormales, semillas sin germinar en ambientes salinos, derivadas de semillas tratadas con NPsZnO.

