

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO



Las Nanopartículas de ZnO Afectan la Germinación y Acumulación de Metabolitos
Secundarios en Plántulas de Maíz

Por:

NATALIA YURILMA PÉREZ LÓPEZ

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN

Saltillo, Coahuila, México

Diciembre, 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO

Las Nanopartículas de ZnO Afectan la Geminación y Acumulación de Metabolitos
Secundarios en Plántulas de Maíz

Por:

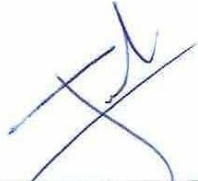
NATALIA YURILMA PÉREZ LÓPEZ

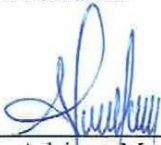
TESIS


Presentada como requisito parcial para obtener el título de:


INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN


Aprobada por el Comité de Asesoría:


Dr. Josué Israel García López
Asesor Principal


Dra. Adriana Morfin Gutiérrez
Asesor Principal Externo


Dra. Norma Angélica Ruiz Torres
Coasesor


Dra. Adriana Berenice Espinoza Martínez
Coasesor


Dr. Alberto Sandoval Rangel
Coordinador de la División de Agronomía



Saltillo, Coahuila, México

Diciembre, 2025

DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

El autor quien es el responsable directo, 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, vídeos, 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 las autoridades correspondientes.

Por lo anterior me responsabilizo de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaro que este trabajo es original.

Pasante

A handwritten signature in blue ink, consisting of several overlapping loops and strokes, positioned above a horizontal line.

Natalia Yurilma Pérez López

AGRADECIMIENTOS

Hoy quiero agradecer a Dios por permitirme cumplir esta meta tan importante en mi vida. Culminar mis estudios profesionales, un sueño que se vuelve realidad. Por estar conmigo en los momentos difíciles y sentir su presencia en cada etapa de mi vida.

Agradezco a la universidad por haberme proporcionado la infraestructura para poder participar en este proyecto de investigación, así como para mi formación profesional.

Gracias a mis asesores el Dr. Josué Israel García López y la Dra. Adriana Morfín, por su tiempo, paciencia, por ser mi guía y compartirme sus conocimientos.

Finalmente, quiero agradecer a mi comité de asesoría por el tiempo dedicado a la revisión de este documento y por sus valiosas sugerencias para el enriquecimiento del mismo.

Con cariño

Natalia

DEDICATORIA

A mis padres

Husiel Pérez Pérez: por ser mi fuente constante de inspiración y fortaleza. Gracias por tu amor incondicional, por enseñarme el valor del esfuerzo y la dedicación, y por estar siempre a mi lado en cada etapa de mi vida. Tu apoyo, tus consejos y tu confianza en mí me han impulsado a seguir adelante, incluso en los momentos más difíciles. Este logro también es tuyo, papá, porque sin ti no habría sido posible llegar hasta aquí.

Audelina López Hernández: por brindarme siempre su amor incondicional. Gracias por tu paciencia, por todas las noches en que estuviste a mi lado, ya sea escuchándome, motivándome o simplemente brindándome la calma que necesitaba. Este logro es el resultado de tu sacrificio y esfuerzo, y siempre estaré agradecida por todo lo que has hecho por mí. Te dedico este logro con todo mi corazón.

A mi abuela

Natalia Pérez Velásquez: A mi abuelita, quien con su amor y sabiduría marcó mi vida de manera indeleble. Aunque ya no pueda abrazarte, sé que sigues guiándome desde donde estés. Te agradezco por siempre estar allí para mí, por ser mi apoyo inquebrantable y por haberme enseñado a nunca rendirme. Dedico este logro a tu memoria, con la esperanza de que te haga sentir orgullosa desde el cielo.

A mis hermanos

Sandra, Alexis, Pablo y Osiel: por ser mi compañía constante y mis mayores motivadores. Gracias por todas las veces que me hicieron reír cuando necesitaba distraerme, por su apoyo en los momentos de estrés y por ser mi mayor fuente de confianza.

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDO

DECLARACIÓN DE NO PLAGIO	i
AGRADECIMIENTOS	ii
DEDICATORIA	iii
A mis padres	iii
A mi abuela.....	iii
A mis hermanos	iii
ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDO	iv
ÍNDICE DE CUADROS.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
RESUMEN	viii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Hipótesis.....	2
1.2 Objetivo.....	2
2. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1 Semillas.....	3
2.1.1 Estructura de una semilla.....	3
2.1.1.1 Embrión	4
2.1.1.2 Endospermo	5
2.1.1.3 Testa (Cubierta de la semilla).....	5
2.1.1.4 Micrópilo	5
2.1.2 Importancia de una semilla.....	5
2.2 Elongación de plántulas	5
2.2.1 Proceso de imbibición	7
2.2.1.1 Hidrocebado.....	7
2.2.1.2 Halocebado	8
2.2.1.3 Osmocebado	8
2.2.1.4 Cebado químico	9
2.2.1.5 Biocebado	9
2.2.1.6 Nanocebado	9
2.2.2 Imbibición con NPsZnO.....	10
Figura 2. Efectos comunes en semillas tratadas con NPsZnO.	10
2.3 Impacto de las NPsZnO en la germinación de semillas	11
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	13

3.1	Semillas utilizadas	13
3.2	Fuentes de Zn	13
3.3	Tratamientos.....	13
3.4	Aplicación de NPs en las semillas	13
3.5	Extracción y cuantificación de polifenoles.....	14
3.6	Capacidad antioxidante	14
3.7	Análisis de datos	14
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	15
4.1	Análisis de varianza	15
4.2	Germinación y plántulas anormales	15
4.3	Polifenoles y propiedades antioxidantes.....	17
5.	CONCLUSIONES	19
6.	LITERATURA CITADA	20

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Análisis de varianza para variables evaluadas en el ensayo de germinación y polifenoles por la aplicación de NPsZnO.....	15
--	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Representación esquemática de la estructura de una semilla; a) semilla monocotiledónea, clase de planta que produce flores cuya semilla cuenta con un cotiledón. b) semilla dicotiledónea, clase de planta con flores cuya semilla cuenta con dos cotiledones laterales (Proain Tecnología Agrícola, 2025).....	4
Figura 2. Efectos comunes en semillas tratadas con NPsZnO.	10
Figura 3. Porcentaje de germinación (A), plántulas anormales (B) y semillas sin germinar (C) en semillas de maíz sometidas a dosis de NPsZnO a concentraciones de 0, 5, 10, 15 y 20 ppm con NPsZnO. Los datos se obtuvieron de cuatro repeticiones (n=5) y la prueba estadística seleccionada fue (Tukey, $p \leq 0.05$).....	16
Figura 4. Concentración de fenoles totales (A) y capacidad antioxidante por DPPH (B) en plántulas que provienen de semillas de maíz sometidas a dosis de NPs ZnO a concentraciones de 0, 5, 10, 15 y 20 ppm con NPsZnO. Los datos se obtuvieron de cuatro repeticiones (n=5) y la prueba estadística seleccionada fue (Tukey, $p \leq 0.05$).	17

RESUMEN

Los nanomateriales de zinc (Zn) ha ganado atención en el sector primario debido a su capacidad fotocatalítica y fotooxidante frente a compuestos químicos y biológicos. Sin embargo, diversas investigaciones han demostrado que los nanomateriales cerámicas de óxido de Zn (NPsZnO) pueden afectar o mejorar el rendimiento de las especies botánicas. En este estudio, se determinó el impacto de NPsZnO a concentraciones de 0, 5, 10, 15 y 20 ppm en la germinación y las respuestas bioquímicas (acumulación de polifenoles y capacidad antioxidante por DPPH) en semillas y plántulas de maíz. Los resultados indican que los tratamientos con NPsZnO mejoró la germinación, con incrementos promedio del 36%. Para los polifenoles y capacidad antioxidante por DPPH, los tratamientos con NPsZnO presentaron un incremento promedio del 25.8 y 25.9%, respectivamente. Las observaciones de este estudio comprueban que las NPsZnO son eficaces para mejorar la germinación y acumulación de metabolitos secundarios en semillas y plántulas de maíz.

Palabras clave: *Zea mays*, nanofertilizantes, nanotecnología, germinación, polifenoles, capacidad antioxidante.

1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento poblacional ha provocado una alta demanda de alimentos con la finalidad de cubrir nuestras necesidades alimentarias, lo que conlleva a una creciente dependencia en el uso de agroquímicos. Estos fertilizantes químicos son utilizados para satisfacer las deficiencias de nitrógeno, fósforo y potasio, principalmente. Su constante uso ocasiona contaminación del aire y el suelo. Sin embargo, la agricultura convencional continúa utilizando estas técnicas agrícolas para el tratamiento de cultivos (Bhardwaj *et al.*, 2014). En este sentido recientes investigaciones han sido enfocadas hacia la producción de alimentos enriquecidos con minerales utilizando fertilizantes alternativos a los convencionales para el manejo y cuidado de cultivos agrícolas (Bhardwaj *et al.*, 2014).

Uno de los fertilizantes alternativos recientemente estudiados en la agricultura, son las NPsZnO, las cuales presentan un tamaño reducido y propiedades antifúngicas, antimicrobianas y antioxidantes, que les permite interactuar de manera específica con las estructuras biológicas a nivel celular y molecular, creando nuevas posibilidades para mejorar el rendimiento agrícola (Gardea *et al.*, 2014). Además, el óxido de zinc es un material capaz de mejorar el proceso de germinación de semillas, participando en la activación de sistemas de protección, en la regulación de la absorción de agua y en la promoción del desarrollo de las plantas en condiciones adversas (Rai *et al.*, 2016). Por otro lado, las NPsZnO pueden mejorar las respuestas genéticas, fisiológicas y agronómicas en las plantas expuestas a diferentes estímulos ambientales.

La germinación de semillas es el proceso más crítico de las plantas, ya que influye directamente en el crecimiento y desarrollo de los cultivos. Algunos factores como la salinidad de suelos y las condiciones adversas pueden afectar negativamente la tasa de germinación y la salud general de las plantas (Bhardwaj *et al.*, 2014). Por lo que, la investigación del impacto de nanomateriales en semillas es esencial para mejorar la producción agrícola y entender los mecanismos biológicos involucrados desde los inicios del crecimiento (Hailer, 2017).

Factores como el estrés hídrico y la sequía afectan la germinación de semillas, provocando el uso de tratamientos químicos, físicos y biológicos, haciendo uso de ciertas hormonas vegetales o nanopartículas para promover la germinación de semillas y su tolerancia ante condiciones de estrés.

1.1 Hipótesis

H_i: La aplicación de NPsZnO a concentraciones 0, 5, 10, 15 y 20 ppm, durante la imbibición de semillas de maíz modificará la germinación y acumulación de polifenoles antioxidantes de los germinados.

H₀: La aplicación de NPsZnO a concentraciones 0, 5, 10, 15 y 20 ppm, durante la imbibición de semillas de maíz no influirá sobre la germinación y acumulación de polifenoles antioxidantes de los germinados.

1.2 Objetivo

Determinar el impacto NPsZnO a concentraciones de 0, 5, 10, 15 y 20 ppm, sobre la germinación y acumulación de polifenoles antioxidantes en germinados de maíz.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Semillas

Las semillas son consideradas como el principal insumo en la agricultura, estas desempeñan funciones importantes en el establecimiento de cultivos para la producción de alimentos. También se considera fuente de alimento para los seres vivos, la cual puede resguardarse por un periodo de tiempo prolongado (Doria, 2010).

De manera general, una semilla es formada a partir de la fecundación de un óvulo vegetal, que consecuentemente producirá una planta. Estas plantas se dividen en dos grupos; las *angiospermas*, que son las plantas que producen flores y las *gimnospermas*, que comprenden a las coníferas. En ambos grupos se cuenta con la presencia de óvulos, pero su desarrollo ocurre de forma diferente (Doria, 2010).

Entonces se puede decir, que prácticamente una semilla resulta de la fecundación del grano de polen con los gametos femeninos, a este proceso se le conoce como doble fecundación (Doria, 2010). En estos procesos es de vital importancia distinguir una polinización de una fecundación; la polinización es el proceso de transferencia de polen, mientras que la fecundación es la fusión de los gametos masculinos y femeninos, lo que da lugar a la creación de nuevas semillas (Barton *et al.*, 2017).

2.1.1 Estructura de una semilla

La semilla es el resultado de la fecundación de los gametos masculinos y femeninos, y representa una estructura fundamental en la reproducción de plantas, que tiene como función la protección y dispersión del embrión, permitiendo que la planta se reproduzca

y se propague. En la Figura 1 se presenta la estructura de una semilla y se muestra un esquema representativo que ejemplifica sus partes (Figura 1).

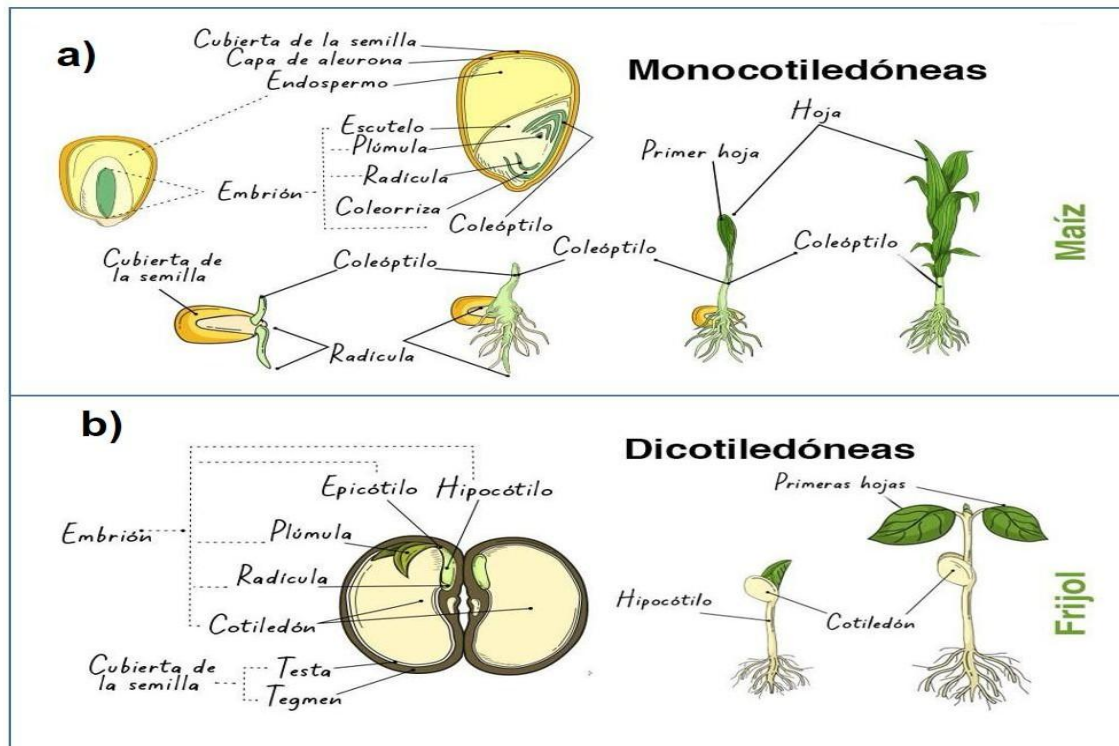


Figura 1. Estructura de una semilla; a) semilla monocotiledónea, clase de planta que produce flores cuya semilla cuenta con un cotiledón. b) semilla dicotiledónea, clase de planta con flores cuya semilla cuenta con dos cotiledones laterales (Proain Tecnología Agrícola, 2025).

Las partes principales de una semilla son las siguientes (Taiz, 2010):

2.1.1.1 Embrión

Es la parte que dará lugar a una nueva planta y está compuesto por a) la radícula, que es la porción del embrión que dará lugar a la raíz de la nueva planta, la plúmula, que se refiere a la parte del embrión que se desarrollará en el tallo y las hojas y los cotiledones, que corresponde a las primeras hojas que aparecerán en la germinación (dependiendo del tipo de planta, puede haber uno o dos cotiledones).

2.1.1.2 Endospermo

Es el tejido nutritivo que permite el desarrollo de la plántula hasta que sea capaz de realizar la fotosíntesis por sí mismo. En algunas semillas, el endospermo es grande y en otras es reducido o incluso ausente, siendo reemplazado por los cotiledones que almacenan el alimento.

2.1.1.3 Testa (Cubierta de la semilla)

Esta capa está compuesta por células que pueden ser gruesas y duras para proteger al embrión de factores como la desecación, el daño físico y la entrada de patógenos.

2.1.1.4 Micrópilo

Es una pequeña abertura en la testa, por donde el polen llega al óvulo durante la fecundación. También es importante para el paso de agua y gases durante el proceso de germinación.

2.1.2 Importancia de una semilla

Básicamente una semilla es un reservorio energético (Bonicatto *et al.*, 2020). A lo largo de historia han sido mejoradas y compartidas entre agricultores de todo el mundo, generando una amplia diversidad de semillas (Leon, 2016) (Bonicatto *et al.*, 2020). Desde semillas comerciales hasta semillas locales. Siendo las primeras, parte de un sistema formal o certificado que incluye semillas híbridas y transgénicas. Mientras que las segundas, son seleccionadas, mejoradas y conservadas de acuerdo a los criterios de los agricultores, preservando una amplia variedad de especies adaptadas a diferentes condiciones productivas y ambientales, incluyendo semillas nativas y criollas (Bonicatto *et al.*, 2020).

2.2 Elongación de plántulas

La germinación de una semilla es el proceso mediante el cual una semilla, en condiciones adecuadas de temperatura, humedad y oxígeno, comienza a desarrollarse y da lugar a una nueva planta. El proceso de germinación comienza cuando la semilla absorbe agua a través del micrópilo, iniciando la activación de los procesos metabólicos dentro de la

semilla, provocando hinchazón y ablandamiento de la testa. Una vez que la semilla está suficientemente hidratada, la radícula (raíz embrionaria) comienza a crecer hacia el interior del suelo buscando nutrientes y agua. Posteriormente, la plúmula (parte superior del embrión) se extiende hacia la superficie, y las primeras hojas (cotiledones) emergen para iniciar la fotosíntesis. Durante la germinación, es crucial que las condiciones de temperatura y humedad sean adecuadas, ya que la semilla no germinará si el entorno es demasiado frío o seco. Así como, el oxígeno también es esencial, ya que la germinación es un proceso que consume energía, a través de la respiración celular (Taiz, 2010).

Una semilla puede producir una plántula a partir del proceso de germinación de la misma. Durante la germinación se llevan a cabo mecanismos metabólicos y morfogenéticos. Inicialmente, ocurre la imbibición de agua a partir de la semilla, seguido de la participación metabólica y proceso de respiración. Finalmente, ocurre la ruptura de la testa y el crecimiento de la radícula. La imbibición de semillas puede ocurrir en semillas no viables, donde la germinación no es garantía. Por lo cual, la determinación de viabilidad en semillas, así como la cantidad, tipo de reservas e inhibidores de germinación, permite conocer su potencial para germinación de una plántula (Monroy, 2017).

2.2.1 Proceso de imbibición

Básicamente, consiste en el proceso de hidratación de una semilla. La absorción de agua por las semillas permite que se active el sistema enzimático y se permita aprovechar el reservorio energético en la semilla, lo cual es aprovechado por el embrión para el desarrollo celular (Pérez *et al.*, 2016).

Para determinar el tiempo de germinación de semillas, es a partir de una curva de imbibición, la cual prácticamente describe cuando una semilla es hidratada, donde se inicia la germinación de la misma. Durante este proceso, la semilla pasa por una serie de etapas caracterizadas por la absorción rápida de agua en una fase inicial seguida de una fase de estabilización. Este fenómeno es crucial para activar los procesos metabólicos dentro de la semilla, permitiendo la reanudación de la actividad celular y el crecimiento del embrión (Pérez, 2008).

Las etapas de la curva de imbibición consisten en lo siguiente:

1. **Absorción inicial rápida de agua:** Durante las primeras horas o días, la semilla absorbe agua de manera rápida, lo que causa su hinchazón.
2. **Fase de estabilización:** Después de la fase inicial, la tasa de absorción de agua disminuye y la semilla alcanza un equilibrio en el contenido de agua.
3. **Hidratación y activación metabólica:** Durante esta fase, se activan las enzimas que desencadenan las reacciones metabólicas necesarias para el crecimiento del embrión.

El proceso de imbibición de una semilla, se puede llevar a cabo siguiendo diferentes métodos, como son:

2.2.1.1 Hidrocebado

Es una técnica rentable y económica que consiste en remojar las semillas en agua y secarlas antes de sembrarlas. Las semillas alcanzan rápidamente altos niveles de humedad, lo que acelera el proceso de germinación, crecimiento y desarrollo de las

plántulas, debido a una activación de las respuestas fisiológicas, expresión de genes y proteínas en diversas especies vegetales (Lagiotis, 2023). Las técnicas de cebado, generalmente se aplican durante la primera fase de la germinación, esto con la finalidad de acelerar y uniformizar la progresión de la semilla a través de las fases de germinación. Actualmente se utilizan varias técnicas de cebado de semillas; estas incluyen tratamientos con agentes físicos (irradiación, ultrasonido, limas magnéticas), químicos (sales, fitohormonas,) o biológicos (bacterias, hongos). Entre estos, el hidrocebado, es una técnica que permite que las semillas alcancen rápidamente un alto nivel de humedad con un suministro constante de oxígeno, lo que aumenta el nivel de metabolitos asociados con el proceso de germinación (Casenave, 2023).

2.2.1.2 Halocebado

Permite remojar las semillas en suspensiones con diferentes tipos de fertilizantes, como NaCl, KCl, KNO₃, K₃PO₃, MgSO₃ y CaCl₂, antes de la exposición al estrés. La mejora de la relación K⁺/Na⁺ y la absorción de Ca²⁺, en condiciones de salinidad ayuda a mantener la homeostasis iónica, mejora el crecimiento de las plántulas, incrementa la actividad fotosintética y reduce la pérdida de electrolitos en los cultivos. El acondicionamiento de semillas se ha desarrollado como un método importante para producir plantas resistentes a diferentes tipos de estrés. Es un tratamiento pregerminativo que mejora el vigor y permite una germinación más rápida y coordinada. El halocebado es un método sencillo y económico, adecuado para los agricultores debido a su mejor sincronización de la emergencia de radícula y cultivos en diferentes condiciones ambientales (Robledo, 2020).

2.2.1.3 Osmocebado

Consiste en el uso de soluciones salinas que permiten vigorizar las semillas, como es el caso del polientilenglicol (PEG), que mejora la germinación, la emergencia y el establecimiento de las plántulas en condiciones de estrés. Este método requiere un gran volumen de soluciones osmóticas, un costoso control de la temperatura y sistemas de aireación, por lo que es muy poco utilizado para mejorar el crecimiento de los cultivos en ambientes salinos (Paparella *et al.*, 2015).

2.2.1.4 Cebado químico

Implica el uso de ciertas sustancias químicas para generar tolerancia al estrés abiótico en semillas. El mecanismo molecular que incrementa la tolerancia de las plantas al estrés, aún no está muy estudiado. Sin embargo, algunas de las sustancias químicas que son utilizadas para el tratamiento de semillas son nitroprusiato de sodio, peróxido de hidrógeno, hidrosulfuro de sodio, melatonina y poliaminas, los cuales mejoran la resistencia de las plantas a condiciones adversas (Savvides, 2016).

Las plantas de cultivo se ven sometidas a múltiples tipos de estrés abiótico a lo largo de su ciclo de vida, lo que reduce considerablemente su productividad y amenaza la seguridad alimentaria mundial. Investigaciones recientes sugieren que las plantas pueden ser preparadas mediante compuestos químicos para tolerar mejor diferentes tipos de estrés abiótico y el tratamiento químico es una de las herramientas prometedoras en la fisiología del estrés vegetal y la gestión del estrés en cultivos (Savvides, 2016).

2.2.1.5 Biocebado

Se refiere al uso de bacterias y hongos promotores del crecimiento vegetal para inducir la resistencia de las plantas al estrés abiótico (Forti *et al.*, 2020). Entre los microorganismos utilizados, se incluyen *Bacillus polymyxa*, *Pseudomonas fluorescens*, *Gliocladium* y varias especies de *Trichoderma harzianum* (Prasad *et al.*, 2016). Además de, extractos acuosos de diferentes plantas, como extracto acuoso de sorgo al 5% (SWE), en oscuridad durante 24 h a 25 °C.

2.2.1.6 Nanocebado

Consiste en el uso de nanopartículas para aumentar la productividad de las especies (Zulfiqar *et al.*, 2019). De acuerdo con algunas investigaciones, se ha observado que el nanocebado es capaz de regular los procesos fisicobioquímicos en cultivos sometidos a estrés abiótico. Khan *et al.*, reportan que las nanopartículas de plata (NPsAg) disponibles comercialmente (con un rango de tamaño entre 50 y 100 nm) mitigan los impactos adversos del estrés por NaCl de 120 y 150 mM en *Pennisetum glaucum*. Además, las NPsAg mejoran el crecimiento de las plantas y la concentración de proteína, la homeostasis iónica, acumulación de metabolitos secundarios y proteínas antioxidantes

que contribuye a la tolerancia a la salinidad (Ramírez *et al.*, 2021).

2.2.2 Imbibición con NPsZnO

La imbibición de semillas con NPsZnO puede influir en los procesos de germinación para mejorar el vigor de plántulas y obtener mayor productividad. El ZnO es un material que presenta propiedades beneficiosas para las plantas, y su aplicación en el proceso de imbibición de semillas mejora la germinación y crecimiento en diversas condiciones ambientales (Javed *et al.*, 2020). En la Figura 2 se muestra una imagen representativa de algunos de los efectos más importantes, provocados por el uso de NPsZnO en el proceso de imbibición de semillas y algunos de los factores en los que estas pueden influir.

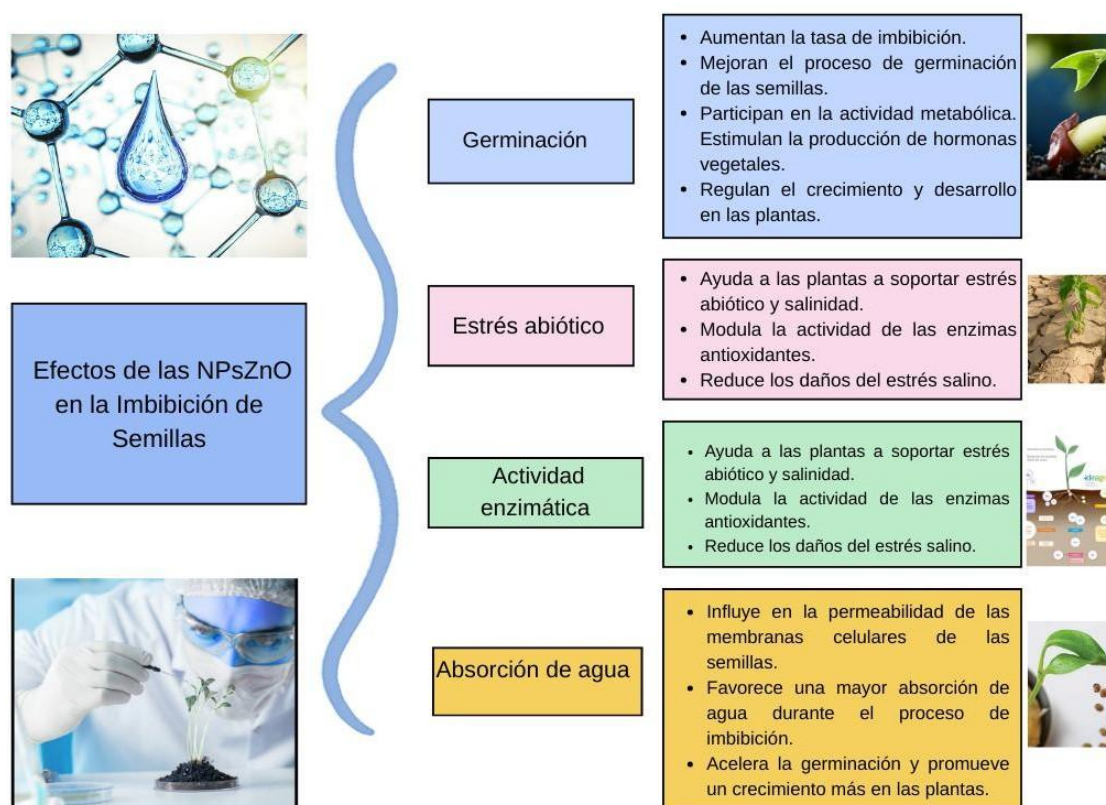


Figura 2. Efectos comunes en semillas tratadas con NPsZnO.

De acuerdo con lo reportado por Sharma *et al.*, las NPsZnO son capaces de interactuar con las membranas celulares de una semilla, mejorando su permeabilidad y facilitando la oxigenación y aprovechamiento del agua hacia el interior de la semilla. También pueden aumentar la síntesis de hormonas como, auxinas, que promueven la elongación celular de las estructuras en las plantas. Además de, actuar como agentes antioxidantes, reduciendo los daños causados por la presencia de radicales libres en las células de las plantas (Sharma *et al.* 2020). Con base en lo anterior, el uso de NPsZnO en la imbibición de semillas es una estrategia prometedora para el establecimiento de los cultivos, especialmente bajo climas adversos. Los fertilizantes de Zn tienen efectos positivos en la germinación, la acumulación de polifenoles y la mejora de la absorción de agua, favoreciendo el desarrollo inicial de las plantas.

2.3 Impacto de las NPsZnO en la germinación de semillas

El Zn, es un elemento esencial que participa en la síntesis de diversas proteínas y su presencia es indispensable el desarrollo óptimo de las plantas, actuando como agente estabilizador de membranas y protege a las plantas contra diferentes condiciones de estrés. Recientemente, se han utilizado una gran variedad de nanomateriales como candidatos promisorios para mejorar la germinación, crecimiento y rendimiento de cultivos agrícolas, que sean capaces de garantizar el uso eficiente de los recursos de producción en la agricultura. Utilizando como herramienta la nanotecnología para la creación de diversas nanopartículas, con diversas aplicaciones en la industria agrícola (Galindo *et al.*, 2022).

Una nanopartícula, es un material con un tamaño promedio entre 1-100 nm, que puede estar compuesto por carbono, metal, cerámico, mezclas entre diferentes materiales, etc. Las NPsZnO, corresponden a una material tipo cerámico con propiedades opto-eléctricas, físicas y antimicrobianas, que son capaces de impactar a las plantas en forma positiva (Faizan *et al.*, 2020), mejorando el crecimiento de distintas plantas, la tasa de germinación de semillas (en concentraciones bajas), el crecimiento de plántulas (*Vigna radiata* y *Cicer arietinum*), así como los parámetros nutricionales y fisiológicos en algunos cultivos. Además, de incrementar el contenido de este elemento en las partes comestibles de una planta (Rivera, 2021).

De manera general, los nanofertilizantes en la agricultura han tenido un impacto positivo, destacando los cultivos producidos en climas secos, ya que promueven el crecimiento, rendimiento y calidad de frutos, influenciando además actividades fotosintéticas y antioxidantes. Esto debido a sus tamaños nanométricos, que les permiten ingresar en los tejidos vegetales a partir de los estomas y floemas hacia diferentes tejidos de las plantas. Estas nanopartículas son comúnmente aplicadas vía foliar y directamente en suelos (López *et al.*, 2021).

Actualmente, los agroquímicos se aplican de forma excesiva. No obstante, su frecuente uso afecta la salud del suelo y de los agro ecosistemas, provocando contaminación ambiental (Lira, 2018). Debido a lo anterior, se propone el uso de micronutrientes en forma de nanopartículas (con propiedades de bioseguridad, inocuidad y biodegradabilidad), con el objetivo de aplicar concentraciones menores y más eficientes que sustenten los sistemas de producción agrícolas intensivos (García- Gómez *et al.* 2017).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Semillas utilizadas

La variedad de semilla de maíz híbrido elotero blanco (ASGROW®). La planta produce un elote blanco dulce apreciado por su sabor y su textura tierna. Este híbrido cuenta con una adaptación probada en altitudes que van de 0 a 2800 m s. n. m., esta semilla se desempeña bien en diversas zonas geográficas.

3.2 Fuentes de Zn

Las NPsZnO tienen un porcentaje de Zn y O 82.8 % y 17.18 %, respectivamente. De acuerdo con el peso molecular de cada elemento, el porcentaje teórico esperado para Zn y O es de 80.3 % y 19.7 % (García-López et al., 2019).

3.3 Tratamientos

Los tratamientos con Zn se prepararon en una solución madre de 200 mg L⁻¹ en agua desionizada y se homogeneizaron con un sonicador Branson M1800H (Emerson, Branson Ultrasonics Bath, Brookfield, USA) durante 15 min a 110 voltios-3 amperios y 50 Ghz. Enseguida, las suspensiones se diluyeron para preparar concentraciones a 5, 10, 15, 20 y 25 mg L⁻¹ para cada fuente de Zn, además de un testigo con agua destilada, las cuales fueron utilizadas como tratamientos aplicados durante la imbibición de semillas (15 h).

3.4 Aplicación de NPs en las semillas

Después de la imbibición de las semillas con los tratamientos de Zn, las semillas se colocaron en una hoja de papel Anchor con agua destilada acomodándolas en hileras. Luego se cubrieron con otra hoja de papel humedecida y se enrollaron, después se colocaron en una bolsa de polietileno y se instalaron sobre una bandeja de plástico profunda que se llevó a la cámara de crecimiento a 25 °C y 75 % de humedad relativa por siete días. Una vez obtenidos los germinados, se determinaron los siguientes parámetros: porcentaje de germinación, plántulas anormales y semillas sin germinar.

Posteriormente, la acumulación de tejido vegetal se sometió a secado en una estufa a 50 °C durante 36 h. Enseguida, las muestras secas se molieron con un molino eléctrico pulverizador Cgoldenwall HC-500 (Xia Cheng, Zhejiang, CHN), la harina se tamizó para obtener partículas de 0.50 mm (malla estándar 35), la cual se utilizó para los análisis bioquímicos.

3.5 Extracción y cuantificación de polifenoles

Los germinados fueron utilizados para hacer la extracción de polifenoles con metanol al 80%, la mezcla duró en agitación por 30 m y enseguida se separó el sobrenadante. La cuantificación de fenoles totales se realizó utilizando una mezcla de fosfomolibdato y fosfotungstato y ácido gálico para la curva de calibración de 0 a 200 mg/L (López-Contreras et al., 2015).

3.6 Capacidad antioxidante

El DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl) y ABTS (2,2'-azino-bis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid)), fue utilizado como radical libre y se generó una curva de calibración con ácido 6-hidroxi-2,5,7,8-tetrametilcroman-2-carboxílico de (0 a 500 µmol/L).

3.7 Análisis de datos

Se utilizó el diseño completamente al azar considerando como fuente de variación los tratamientos con NPs ZnO, cada uno con cuatro repeticiones. El modelo utilizado fue el siguiente; $Y_{ij} = \mu + \alpha_i + e_{ij}$. La unidad experimental contenía 25 semillas.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Análisis de varianza

El ANOVA indica que las variables relacionadas de germinación, polifenoles y capacidad antioxidante se vieron afectadas significativamente por la fuente de variación tratamientos con NPs ZnO (Cuadro 1). En la comparación de medias se explican las posibles causas del comportamiento del fenómeno evaluado.

Cuadro 1. Análisis de varianza para variables evaluadas en el ensayo de germinación y polifenoles por la aplicación de NPsZnO.

FV	GL	GER (%)	PA (%)	SSG (%)	Fenoles totales (mg GAE/100 g)	DPPH (μ mol TE/100 g)
Tratamientos	4	437.3*	249.6*	41.6*	289860.1*	456385.0*
Error	10	39.4	19.2	64.0	17324.9	7995.0
C V (%)		10.4	18.8	47.6	5.6	3.75

*, ** = Significativo al 0.01 nivel de probabilidad, respectivamente.

4.2 Germinación y plántulas anormales

Los resultados de la Figura 3A, demuestran que la aplicación de tratamientos con NPsZnO mejoró la germinación, con incrementos promedio del 36%. Derivado de los incrementos en la germinación, se presentó una reducción promedio del 50% en el porcentaje de plántulas anormales en las semillas que fueron tratadas con NPsZnO (Figura 3B). En el caso de semillas sin germinar (Figura 3C), no se observan diferencias significativas, pero numéricamente se presenta una disminución en los tratamientos con NPsZnO.

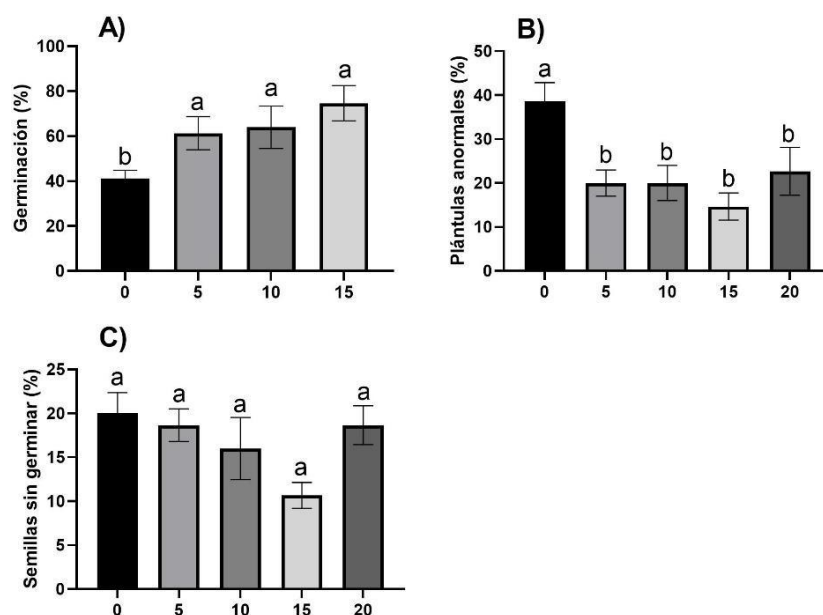


Figura 3. Porcentaje de germinación (A), plántulas anormales (B) y semillas sin germinar (C) en semillas de maíz sometidas a dosis de NPsZnO a concentraciones de 0, 5, 10, 15 y 20 ppm con NPsZnO. Los datos se obtuvieron de cuatro repeticiones (n=5) y la prueba estadística seleccionada fue (Tukey, $p \leq 0.05$).

Algunos estudios han señalado que la aplicación de NPsZnO en semillas promueve la germinación, el crecimiento de plántulas y la acumulación de biomasa (Stałańska *et al.*, 2023). Por ejemplo, en semillas de *Capsicum annuum* y *Solanum lycopersicum* la aplicación de NPsZnO de síntesis verde mejoró la tasa de germinación, mientras que las nanopartículas sintetizadas químicamente, en concentraciones más altas, disminuyeron el porcentaje de germinación. Además, la aplicación de NPsZnO obtenidas mediante síntesis verde fueron más eficaces para generar compuestos bioactivos y activar el sistema de defensa enzimática debido a su mayor biocompatibilidad (Sánchez-Pérez *et al.*, 2023).

La aplicación de NPsZnO durante la germinación de semillas comprende un método fisiológico que, permite mejorar el rendimiento de las semillas, lo que conlleva una germinación más rápida debido a la activación de numerosos procesos metabólicos implicados en las primeras etapas de la germinación (Nawaz *et al.*, 2013; Ibrahim, 2019).

4.3 Polifenoles y propiedades antioxidantes

Para la concentración de fenoles totales (Figura 4A), todos los tratamientos con NPs ZnO presentaron un incremento promedio del 25.8 % en comparación con el control. Los incrementos en la concentración de fenoles totales se reflejaron en mejoras de la capacidad antioxidante por DPPH, superando en promedio con 25.9% al control (Figura 4B).

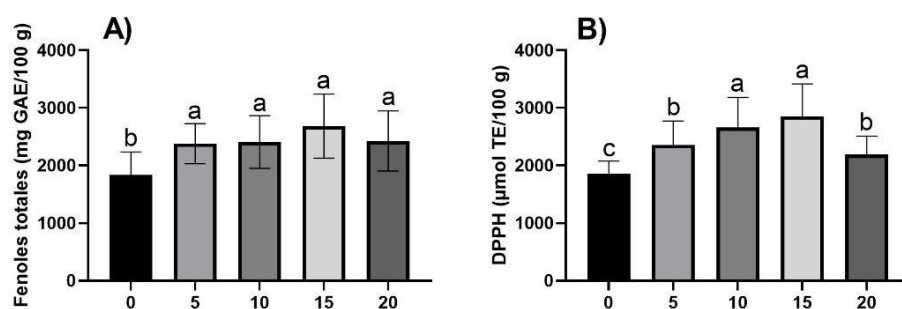


Figura 4. Concentración de fenoles totales (A) y capacidad antioxidante por DPPH (B) en plántulas que provienen de semillas de maíz sometidas a dosis de NPs ZnO a concentraciones de 0, 5, 10, 15 y 20 ppm con NPsZnO. Los datos se obtuvieron de cuatro repeticiones (n=5) y la prueba estadística seleccionada fue (Tukey, $p \leq 0.05$).

La aplicación de NPsZnO durante la germinación de semillas pudo altera notablemente las actividades morfológicas, fisiológicas y bioquímicas en los germinados, tales como germinación concentración de polifenoles y la capacidad antioxidante (Maestri *et al.*, 2010). La mayor acumulación de polifenoles se debe a la generación de especies reactivas de oxígeno (ROS) que es una característica típica de las plantas estresadas (Azim *et al.*, 2022). Algunos estudios han demostrado que la acumulación de polifenoles de tipo flavonoide en la vacuola pueden utilizarse en el sistema para eliminar especies reactivas de oxígeno, especialmente H_2O_2 y de esta forma contrarrestar el estrés oxidativo (Agati *et al.*, 2020). Nuestros resultados concuerdan con los hallazgos Sánchez-Pérez *et al.* (2023), quienes documentaron que la aplicación de nanomateriales de Zn en semillas de hortalizas aumentó la de fenoles totales, flavonoides y la capacidad antioxidante,

argumentando que este tipo de fertilizantes pueden ser utilizados como promotores abióticos para inducir la biosíntesis de metabolitos secundarios y enzimas antioxidantes.

5. CONCLUSIONES

Este estudio comparó la influencia NPsZnO en la germinación de maíz y la acumulación de polifenoles y capacidad antioxidante en el tejido vegetal de plántulas. Las observaciones indican que las NPsZnO afectaron positivamente la germinación de las semillas, por lo que se presentó una disminución en el porcentaje de las plántulas anormales. Además, la aplicación de NPsZnO durante la germinación aumentó la concentración metabolitos secundarios como los polifenoles, con incrementos de la capacidad antioxidante en tejido vegetal debido a la activación del sistema de defensa antioxidante no enzimático.

6. LITERATURA CITADA

- Agati, G., Brunetti, C., Fini, A., Gori, A., Guidi, L., Landi, M., and Tattini, M. 2020. Are flavonoids effective antioxidants in plants? Twenty years of our investigation. *Antioxidants*, 9(11), 1098.
- Azim, Z., Singh, N. B., Khare, S., Singh, A., Amist, N., Yadav, R. K., and Hussain, I. 2022. Potential role of biosynthesized zinc oxide nanoparticles in counteracting lead toxicity in *Solanum lycopersicum* L. *Plant Nano Biology*, 2, 100012.
- Barton, E.T., Barton, E.A., Barton, S., Boyer, C.R., Brosnan, J., Hill, P., and Stafne, E. 2017. Using technology to enhance extension education and outreach. *HortTechnology*, 27(2), 177-186.
- Bhardwaj, D., Ansari, MW, Sahoo, RK 2014. Los biofertilizantes son clave en la agricultura sostenible al mejorar la fertilidad del suelo, la tolerancia de las plantas y la productividad de los cultivos. *Microb Cell Fact* 13 ,66.
- Bonicatto, M.; May, M.P. y Tamagno, N. 2020. Las semillas: base biológica y cultural de la diversidad cultivada. En Sarandón S. (Coord.) Biodiversidad, agroecología y agricultura sustentable. La Plata: EDULP.
- Casenave, E. C., and Toselli, M. E. 2007. Hydropriming as a pre-treatment for cotton germination under thermal and water stress conditions. *Seed Science and Technology*, 35(1), 88-98.
- Doria, J. (2010). Generalidades sobre las semillas: su producción, conservación y almacenamiento. *Cultivos tropicales*, 31(1),00-00.
- Faizan, M.; Hayat, S. and Pichtel, J. 2020. Effects of zinc oxide nanoparticles on crop plants: a perspective analysis. *Sustainable Agriculture Reviews*. (41):83-99.
- Galindo-Guzmán, Alma Patricia, Fortis-Hernández, Manuel, De La Rosa-Reta, Claudia Verónica, Zermeno-González, Héctor y Galindo-Guzmán, Magdalena. (2022). Síntesis química de nanopartículas de óxido de zinc y su evaluación en plántulas de *Lactuca sativa*. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 13(spe28), 299-308.

Gardea-Torresdey, JL, Peralta-Videa, JR y Tiemann, KJ. 2014. Nanopartículas: Su interacción con las plantas. *Ciencia del Medio Ambiente Total*, 487. 538-544.

Ibrahim, E.A.A. 2019. Fundamental processes involved in seed priming. In *Priming and Pretreatment of Seeds and Seedlings: Implication in Plant Stress Tolerance and Enhancing Productivity in Crop Plants* (pp. 63-115). Singapore: Springer Singapore.

Javed, M., Bashir, S., and Imran, M. 2020. Nanopartículas en la agricultura: Panorama de sus aplicaciones e impacto en las plantas. *Revista de Nutrición Vegetal*, 43(5), 698-715.

Lagiotis, G., Madesis, P., and Stavridou, E. 2023. Echoes of a stressful past: abiotic stress memory in crop plants towards enhanced adaptation. *Agriculture*, 13(11), 2090.

Leon Araya, A. 2018. Estudios agrarios críticos: Tierras, semillas, soberanía alimentaria y derechos de las y los campesinos. Marc Edelman, Quito, Ecuador: Editorial IAEN. 2016. *Anuario de Estudios Centroamericanos* [online]. vol.44, pp.555-560. ISSN 2215-4175. <http://dx.doi.org/10.15517/aeca.v44i0.34085>.

Lira Saldivar, R.H., Méndez Argüello, B., Santos Villarreal, G.D.L., y Vera Reyes, I. 2018. Potencial de la nanotecnología en la agricultura. *Acta universitaria*, 28(2), 9-24.

López-Moreno, M., Avilés, L., Pérez, N., Irizarry, B., Perales, O., Cedeno-Mattei, Y., and Román, F. 2016. Effect of cobalt ferrite (CoFe₂O₄) nanoparticles on the growth and development of *Lycopersicon lycopersicum* (tomato plants). *Science of the Total Environment*, 550, 45-52.

M. Katie Hailer, Christopher P. Peck, Michael W. Calhoun, Robert F. West, Kyle J. James, Steven D. Siciliano. 2017. Evaluación de acumulaciones de metales en humanos en un sitio urbano de superfondo. *Toxicología y farmacología ambiental*, 54, 112-119,

Maestri, E., Marmioli, M., Visioli, G., and Marmioli, N. 2010. Metal tolerance and hyperaccumulation: costs and trade-offs between traits and environment. *Environmental and Experimental Botany*, 68(1), 1-13.

Monroy-Vázquez, María E., Peña-Valdivia, Cecilia B., García-Nava, José R., Solano-Camacho, Eloy, Campos, Huitziméngari, and García-Villanueva, Eduardo. 2017. Imbibición, viabilidad y vigor de semillas de cuatro especies de *Opuntia* con grado distinto de domesticación. *Agrociencia*, 51(1), 27-42.

Nawaz, J., Hussain, M., Jabbar, A., Nadeem, G.A., Sajid, M., Subtain, M.U., and Shabbir, I. 2013. Seed priming a technique. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 6(20), 1373.

Paparella S, Araújo SS, Rossi G, Wijayasinghe M, Carbonera D, Balestrazzi A. Seed priming: state of the art and new perspectives. *Plant Cell Rep*. 2015 Aug;34(8):1281-93.

- Pérez Mendoza, C., Carrillo Castañeda, G., Vidal Lezama, E., and Ortiz García, E. (2016). Efecto de la imbibición en la calidad fisiológica de semillas de jitomate. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 7(7), 1765-1773.
- Pérez-Camacho, Ignacio, Ayala-Garay, Óscar J., González-Hernández, Víctor A., Carrillo-Salazar, José A., Peña-Lomelí, Aureliano, y García-de los Santos, Gabino. 2008. Indicadores morfológicos y fisiológicos del deterioro de semillas de tomate de cáscara. *Agrociencia*, 42(8), 891-901
- Prasad, R., Shivay, Y. S., and Kumar, D. 2014. Agronomic biofortification of cereal grains with iron and zinc. *Advances in agronomy*, 125, 55-91.
- Rai, M., Yadav, A., and Gade, A. 2009. Silver nanoparticles as a new generation of antimicrobials. *Biotechnology advances*, 27(1), 76-83.
- Ramírez Rodríguez, S. C., Ortega Ortiz, H., Fortis Hernández, M., Nava Santos, J. M., Orozco Vidal, J. A., y Preciado Rangel, P. 2021. *Nanopartículas de quitosano mejoran la calidad nutracéutica de germinados de triticale*. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(4), 579-590
- Rivera-Gutiérrez, Rubén Guadalupe, Preciado-Rangel, Pablo, Fortis-Hernández, Manuel, Betancourt-Galindo, Rebeca, Yescas-Coronado, Pablo, and Orozco-Vidal, Jorge Arnaldo. 2021. Nanopartículas de óxido de zinc y su efecto en el rendimiento y calidad de melón. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 12(5), 791-803.
- Robledo, D.A.R. 2020. Effects of halopriming on seed germination and seedling emergence of *Capsicum frutescens*. *Journal of Botany Research*, 3(1), 114-118.
- Sánchez-Pérez, D.M., Márquez-Guerrero, S.Y., Ramírez-Moreno, A., Rodríguez-Sifuentes, L., Galindo-Guzmán, M., Flores-Loyola, E., and Marszałek, J. E. 2023. Impact of biologically and chemically synthesized zinc oxide nanoparticles on seed germination and seedlings' growth. *Horticulturae*, 9(11), 1201.
- Savvides, A., Ali, S., Tester, M., and Fotopoulos, V. 2016. Chemical priming of plants against multiple abiotic stresses: mission possible?. *Trends in plant science*, 21(4), 329-340.
- Sharma, R., Garg, R., and Kumari, A. 2020. A review on biogenic synthesis, applications and toxicity aspects of zinc oxide nanoparticles. *EXCLI journal*, 19, 1325.
- Singh, A., Sengar, R. S., Rajput, V. D., Agrawal, S., Ghazaryan, K., Minkina, T., and Habeeb, T. 2023. Impact of zinc oxide nanoparticles on seed germination characteristics in rice (*Oryza sativa* L.) under salinity stress. *Journal of Ecological Engineering*, 24(10), 142-156.
- Taiz, L. and Zeiger 2010. *Plant physiology*. 3rd edn. Ann Bot. 2003 May;91(6):750–1.
- Zulfiqar, F., Navarro, M., Ashraf, M., Akram, N.A., and Munné-Bosch, S. 2019. Nanofertilizer use for sustainable agriculture: Advantages and limitations. *Plant science*, 289, 110270.