

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE BOTÁNICA



Efecto de Dos Fuentes de Nanopartículas de Zinc en el Rendimiento
y Calidad del Elote

Por:

MARÍA LORENA BÁRCENAS MAYA

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN AGROBIOLOGÍA

Saltillo, Coahuila, México

Diciembre, 2024

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO DE BOTÁNICA

Efecto de Dos fuentes de Nanopartículas de Zinc en el Rendimiento
y Calidad del Elote

Por:

MARÍA LORENA BÁRCENAS MAYA

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN AGROBIOLOGÍA

Aprobada por el Comité de Asesoría:



Dr. Alonso Méndez López
Asesor Principal



Dra. Juana Cruz García Santiago
Asesor Principal Externo



Dra. Aida Isabel Leal Robles
Coasesor



Dra. Silvia Yudith Martínez Amador
Coasesor



Dr. Alberto Sandoval Rangel
Coordinador de la División de Agronomía



Saltillo, Coahuila, México

Diciembre, 2024

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:

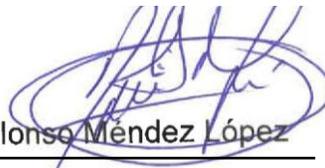
Reproducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (corta y pega); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio); comprar, robar o pedir prestados los datos o la tesis para presentarla como propia; omitir referencias 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


María Lorena Bárcenas Maya
Firma y Nombre

Asesor principal


Dr. Alonso Méndez López
Firma y Nombre

AGRADECIMIENTOS

A Dios, “por todo lo que es y representa en mi vida”. “Yo sé que veré a Dios actuar en mi vida, en mis circunstancias y siento gratitud”. Por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y por brindarme una vida llena de salud, aprendizajes, experiencias y sobre todo felicidad.

A mi Alma Terra Mater, siento un infinito amor y un privilegio el haber pertenecido a esta humilde institución. Porque llegué sin nada y me voy con más de lo que me pudo ofrecer. Por siempre en mi corazón.

A mi asesor; Dr. Alonso Méndez López, cuyo apoyo y disposición fueron esenciales para la culminación de esta tesis. Aprecié profundamente su confianza en mi trabajo y el ambiente de aprendizaje que me ofreció.

A mis padres, quienes, con su confianza, cariño y apoyo, me han convertido en persona de provecho, ayudándome al logro de una meta más “Mi carrera profesional”.

A mis hermanos; Bernardo, Javier, José Luis, Heriberto, Gerardo, porque de alguna u otra manera estuvieron apoyándome económicamente para poder terminar mi carrera profesional. Agradezco a Dios por tenerlos en mi vida, porque a pesar de la distancia y de no vernos desde hace tantos años, nunca me dejaron sola. Anhele volver a verlos, los extraño y siempre los llevo en mi corazón.

A mis profesores de preparatoria:

Jaime Alarcón, porque fue una de las primeras personas que influyó en estudiar en esta universidad. Gracias, siempre será una de las mejores decisiones de mi vida.

Oscar Lira, porque una vez que salí de mi casa y llegué a esta universidad me dijo que nunca tuviera miedo, que no extrañara nada y diera lo mejor de mí. Gracias por la frase “No hay muchos genios alrededor nuestro” nunca la olvidé y eso me hacía creer que podía lograrlo.

A mis amigos:

La Ing. María Guadalupe Gutiérrez Bocanegra, gracias por estar desde el día uno conmigo, tu apoyo fue muy importante para mí porque mucho de lo que logré también te lo debo a ti. Y después de 5 años viviendo juntas, siempre serás como una hermana para mí.

La Ing. Aleyda Aguilera Ramón, te encontré en el camino buscando un mismo sueño y te convertiste en una persona muy importante en mi vida. Gracias por tan bonita amistad te llevaré en mi corazón siempre.

A los Ing. Sheila Pérez, Isaac Hernández, Andrea Juárez, Dalay Jasso, María Fernanda Pérez y Miguel Amador, por todos los momentos vividos durante la carrera (risas, bailes, cumpleaños, estrés de exámenes y un montón de cosas más) fueron como mi otra familia. Cada uno de ustedes tiene un lugar muy especial en mi corazón.

A los Ing.

Daniela Ontiveros, por estar, escucharme, darme un consejo cada que lo necesitaba y (darme de comer cuando no tenía nada). Qué bonito encontrarte en el camino. Deseo que la vida te premie con todo lo bueno, te lo mereces.

Jennifer Morales, porque por diferentes personas coincidimos en la Narro y te volviste también una amistad importante en mi vida. Te quiero y extrañaré mucho.

Ezequiel Fraustro, sin querer nos conocimos y te volviste uno de mis mejores amigos, gracias por estar siempre. A pesar de la distancia cuentas conmigo y te desearé lo mejor en todo lo que te propongas.

Luis Salgado, porque también fue coincidencia nuestra amistad, gracias por los todos los momentos vividos y hacernos reír siempre, te recordaré con mucho cariño.

Sergio Bonilla, te conocí casi al final de la carrera, pero fuiste un amigo que aprecié demasiado. Nos dejaste muy pronto y tu recuerdo lo llevaré por siempre en el corazón. Te mando mil abrazos hasta el cielo.

DEDICATORIAS

A mis padres:

Julio Bárcenas Aguilar y Florina Maya Cano, porque, aunque con mucho miedo de soltarme decidieron confiar en mí y motivarme a creer que podía lograrlo. Perdón por haberles hecho tener una preocupación más y hacerlos derramar más de una lagrima cada que salía de casa. No sé cómo pagarles cada una de las cosas que hacen por mí. Este logro se los dedico porque también es suyo, les prometo que los haré sentir orgullosos. Los adoro con mi alma.

A mis hermanos:

La Ing. Laura Olibia Bárcenas Maya, porque has estado cuando más te he necesitado, y para mí has sido mi mayor ejemplo a seguir, yo también estoy orgullosa de todo lo que has logrado, es por eso que me motiva a dar más de mí. Te quiero mucho, es un privilegio tenerte como hermana.

María Verónica Bárcenas Maya, por cada mensaje y preocuparte todos los días por mí, porque así me hacías sentir que estabas siempre cerca de mí, te extraño tanto, espero con ansias el día que nos volvamos a ver.

Marisol Bárcenas Maya, a pesar de la distancia, has estado en momentos en donde necesité de tu ayuda y nunca me la negaste. De ti aprendí a ser valiente y enfrentar lo difícil que es la vida, pero que de alguna u otra manera se tiene que salir adelante, estoy muy agradecida por todo lo que has hecho por mí.

Alejandro Jesús Bárcenas Maya, el más pequeño de la familia y con quién más momentos he vivido, me demostraste que no importa la edad para poder lograr lo que queremos en la vida, lo importante es luchar por lo que se quiere. Me costó verte crecer muy rápido y me hubiera encantado darte más de lo que ahora tú me das. Gracias por siempre ir por mí a la central cuando regresaba de vacaciones, los juegos de Xbox, las retas de futbol y todas las salidas que hacíamos, aunque no lo creas se extraña tu ruido de canciones en casa. Te extraño siempre y en Dios esperemos volvernos a ver; también lo logré gracias a ti.

Finalmente me dedico esta tesis a mí; fueron 5 años de muchas emociones, días enteros sin dormir, muchos días buenos con cada una de las personas que me encontré en el camino y tantos años de estar lejos de mi familia. Siento mucho orgullo pertenecer a la Narro y estaré eternamente agradecida por que fue mi segunda casa; finalmente se cumple una meta más. ¡Buitres por siempre!

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDO

ÍNDICE DE CUADROS	IX
ÍNDICE DE FIGURAS	X
RESUMEN.....	XI
1. INTRODUCCIÓN	12
1.1 Objetivo General.....	14
1.2 Objetivos específicos.....	14
1.3 Hipótesis	14
2. REVISIÓN DE LITERATURA	15
2.1. Origen y domesticación.....	15
2.2. Descripción botánica	15
2.3. Diversidad genética	15
2.4. Producción de maíz en México y el mundo.....	16
2.5. Aporte nutrimental	18
2.6. Nanotecnología.....	18
2.7. Nanomateriales	19
2.8. Efecto de las NPs	21
2.8.1 Aplicación de NPs de óxido de zinc (NPs-ZnO) en la agricultura	21
2.8.2 Aplicación de NPs de sulfato de zinc (NPs-ZnSO₄) en la agricultura	22
3. MATERIALES Y MÉTODOS	24
3.1. Ubicación del experimento	24
3.2. Análisis de suelo	24
3.3. Material vegetal utilizado.....	24
3.4. Tratamientos evaluados	24
3.5. Diseño experimental.....	25
3.6. Aplicación de las NPs	25
3.7. Siembra y evaluación del cultivo	26
3.7.1. Acondicionamiento del suelo	26
3.7.2. Siembra.....	26
3.8. Labores culturales	26
3.8.1. Riego	26

3.8.2. Control de malezas	26
3.8.3. Cosecha	26
3.9. Variables agronómicas	27
3.9.1. Peso del fruto	27
3.9.2. Diámetro del fruto	27
3.9.3. Longitud del fruto	27
3.9.4. Medición de altura de la planta	27
3.10. Variables bioquímicas.....	28
3.10.1. Sólidos solubles totales (°Brix).....	28
3.10.2. pH y conductividad eléctrica (CE).....	28
3.10.3. Potencial óxido reducción (ORP)	28
3.11. Análisis de varianza	28
4. RESULTADOS.....	29
5. DISCUSIÓN.....	39
5.1. Variables bioquímicas.....	39
5.2. Variables agronómicas	40
6. CONCLUSIONES	42
7. LITERATURA CITADA.....	43
8. ANEXOS	50

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Descripción de los tratamientos evaluados.	25
--	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Representación del acomodo de las repeticiones	25
Figura 2. Sólidos solubles totales en el grano del elote de plantas de maíz tratadas con dos dosis de NPs-ZnO y NPs-ZnSO ₄	29
Figura 3. pH en el grano del elote de plantas de maíz tratadas con dos dosis de NPs-ZnO y NPsZnSO ₄	30
Figura 4. Conductividad eléctrica en el grano de elote de plantas de maíz tratadas de dos dosis de NPs-ZnO y NPsZnSO ₄	31
Figura 5. Potencial óxido reducción en el grano del elote de plantas de maíz tratadas con dos dosis de NPs-ZnO y NPs-ZnSO ₄	32
Figura 6. Peso de elote del cultivo de maíz tratado con dos dosis de NPs-ZnO y NPs-ZnSO ₄	33
Figura 7. Largo del elote del cultivo de maíz tratado con dos dosis de NPs-ZnO y NPs-ZnSO ₄	34
Figura 8. Grosor del elote del cultivo de maíz tratadas con dos dosis de NPs-ZnO y NPs-ZnSO ₄	35
Figura 9. Altura de planta de maíz tratadas con dos dosis de NPs-ZnO y NPs-ZnSO ₄	36
Figura 10. Peso fresco de planta de maíz tratadas con dos dosis de NPs-ZnO y NPs-ZnSO ₄	37
Figura 11. Peso seco de la planta de maíz tratado con dos dosis de NPs-ZnO y NPs-ZnSO ₄	38

RESUMEN

El maíz *Zea mays L.*, es uno de los cultivos con mayor disponibilidad en la actualidad, es considerado uno de los productos alimentarios más importantes, no solo por el rendimiento en la agricultura, sino también por sus propiedades nutricionales, como el contenido de azúcares totales, glucosa, fructosa, sacarosa y triptófano. Las nanopartículas de ZnO también pueden considerarse un preparador de semillas prometedor para mejorar la germinación, los parámetros de crecimiento temprano y el contenido de clorofila y fenoles. El zinc participa en la síntesis de carbohidratos durante la fotosíntesis y en la transformación de los azúcares en almidón, también tiene acción directa en el metabolismo de hormonas al regular el nivel de auxinas a través de la síntesis del aminoácido triptófano, por lo que, su deficiencia puede reducir los rendimientos de los cultivos en un 20 % sin manifestar síntomas. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la aplicación foliar de las NPs-ZnO y NPs-ZnSO₄ sobre el rendimiento y calidad del elote. El estudio se estableció en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, en Saltillo, Coahuila, México. Se utilizó semilla de maíz híbrido A7573. Se utilizó el diseño de bloques completos al azar. Los tratamientos establecidos fueron dos dosis de NPs-ZnO (1000 y 2000 ppm), dos dosis de NPs-ZnSO₄ (1000 y 2000 ppm) y un testigo. Se evaluaron variables agronómicas como: altura de planta, peso fresco y seco de la planta, diámetro, longitud y peso del fruto; variables de calidad como: sólidos solubles totales (°Brix), pH, CE, ORP. Se observó que los tratamientos de NPs-ZnSO₄ de 1000 y 2000 ppm y NPs-ZnO de 2000 ppm mostraron influencia positiva en el rendimiento y calidad del fruto. La aplicación foliar de dos fuentes de NPs de Zn aumentó la calidad de los frutos de elote, principalmente en los parámetros de °Brix, CE y pH. Por lo que, la aplicación de NPs de ZnO y ZnSO₄ puede ser una estrategia prometedora para incrementar los parámetros de calidad en el crecimiento temprano del elote como la síntesis de carbohidratos y mejorar el aporte de zinc.

Palabras clave: Nanopartículas de Zn, Maíz, Agricultura, Rendimiento, Calidad.

1. INTRODUCCIÓN

El maíz (*Zea mays L.*) es un importante cereal originario de América y cuya diversidad genética aún se encuentra bien conservada, especialmente en poblaciones nativas del Centro y Sudamérica (Gálvez, 2020). El maíz es considerado un alimento tradicional y popular en México (Luna *et al.*, 2012).

La producción de maíz tiene ventajas económicas y junto con las innovaciones, mejora la competitividad de los productores en el mercado (Espejel *et al.*, 2020). El maíz proporciona el 85 % del almidón producido en todo el mundo. Mediante su procesamiento se pueden crear diferentes subproductos, de los cuales mediante un proceso tecnológico se pueden obtener nutrientes que varían ampliamente en la composición química, ya sean, proteínas, aceites, carbohidratos y minerales, beneficiosos para el consumo humano (Runyang *et al.*, 2021). Sin embargo, el crecimiento y la productividad del maíz se ve afectado negativamente por la baja fertilidad del suelo (León-Anzueto *et al.*, 2011).

Los fertilizantes inorgánicos son importantes para aportar nutrientes al suelo, los cuales se aplican en grandes cantidades como práctica para mejorar la producción y calidad de los cultivos (Wu *et al.*, 2023); Sin embargo, el excesivo empleo de fertilizantes químicos está teniendo un fuerte impacto negativo en el equilibrio del ecosistema al degradar la calidad del suelo, al reducir su microflora, ocasionando contaminación ambiental y perjudicando la salud humana al introducir restos químicos en la cadena alimentaria (Jha *et al.*, 2023).

Actualmente, los nanofertilizantes están en desarrollo temprano, pero muestran potencial para mejorar la eficiencia de nutrientes y reducir el impacto ambiental (Rodríguez y Díaz, 2024). El uso de nanotecnología permite controlar de mejor manera la liberación de nutrientes en los fertilizantes. En consecuencia, sólo se liberan aquellos nutrientes que la planta realmente absorberá, evitando la pérdida de nutrientes no deseados como en el suelo, el agua y, principalmente, los microorganismos. En los nanofertilizantes, los nutrientes pueden encapsularse en

nanomateriales, de esta manera se cubren con una fina capa protectora o liberarse como emulsiones de nanopartículas (NPs) (Duante, 2022).

El zinc (Zn) es un micronutriente de gran importancia para el desarrollo adecuado de las plantas, ya que participa en la síntesis de carbohidratos durante la fotosíntesis y en la transformación de los azúcares en almidón, también tiene acción directa en el metabolismo de hormonas al regular el nivel de auxinas a través de la síntesis del aminoácido triptófano, por lo que, su deficiencia puede reducir los rendimientos de los cultivos en un 20% sin manifestar síntomas (Carmak *et al.*, 2015).

La poca disponibilidad del Zn en el suelo ha llevado a las ciencias agrícolas a buscar alternativas potenciales que permitan mejorar su disponibilidad. Recientemente, las investigaciones se han enfocado en el estudio de NPs de Zn, debido a que estos han demostrado estimular el crecimiento de los cultivos y ayudar a restaurar suelos pobres (Innalegwu *et al.*, 2023). Se ha reportado que las NPs de Zn tienen el potencial de suministrar de manera eficiente el Zn^{2+} , lo que repercute en un mejor crecimiento y rendimiento de las plantas (Elhaj y Unrine, 2018). Los nanomateriales tienen la capacidad de generar y permitir la administración eficiente de los nutrientes, obteniendo así una resistencia de las plantas en cuanto a factores de estrés, generando nanosensores para la detección de diferentes enfermedades y nutrición baja de los cultivos (Spanos *et al.*, 2021).

Los suelos con alto contenido de fósforo y silicio son más propensos a necesitar el Zn en relación con deficiencia de micronutrientes, ya que el Zn es vital para la nutrición de los cultivos donde se requiere que existan procesos ya sean metabólicos e incluso reacciones de oxidación-reducción (Jabri *et al.*, 2022). Entre las NPs más evaluadas en la agricultura se encuentran las metálicas como Cu, Fe, Ag y Zn; de Zn más evaluadas se encuentran las NPs de óxido de Zn (NPs-ZnO) y NPs de sulfato de Zn (NPs-ZnSO₄) (Lira *et al.*, 2018). Sin embargo, pocos estudios se han realizado para evaluar y ampliar un panorama más extenso en cuanto el efecto de las NPs, a base de Zn, sobre la producción de elote (Usman *et al.*, 2020)

1.1 Objetivo General

Evaluar el efecto de la aplicación foliar de las NPs-ZnO y NPs-ZnSO₄ sobre el rendimiento y calidad del elote.

1.2 Objetivos específicos

1. Determinar el efecto de la aplicación foliar de las NPs-ZnO y NPs-ZnSO₄ sobre en el rendimiento del elote.
2. Determinar el efecto de la aplicación foliar de las NPs-ZnO y NPs-ZnSO₄ sobre la calidad del elote.

1.3 Hipótesis

La aplicación foliar suplementaria de dos fuentes de NPs de Zn (ZnO y ZnSO₄) promoverá el aumento del rendimiento y de la calidad del elote.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Origen y domesticación

El maíz (*Zea mays* L.) comenzó a domesticarse y manipularse hace 10,000 años en Mesoamérica, dando lugar a una agricultura más desarrollada por antiguos agricultores, que con el paso de los años han mejorado la producción de distintas variedades (García y serna, 2023). Bajo la domesticación se obtienen sistemas que son más manejables para mejorar el cambio evolutivo y adaptación de este cultivo (Stitzer y Ross, 2018), centrándose en el estudio de los diferentes factores bióticos y abióticos incluyendo factores genéticos que presentan y que pueden afectar su desarrollo y producción (Gálvez, 2020).

2.2. Descripción botánica

Reino: Plantae

Subdivisión: Magnoliophyta

Clase: Angiosperma

Subclase: Commelinidae

Orden: Poales

Familia: Poaceae

Subfamilia: Panicoideae

Tribu: Andropogoneae

Subtribu: Tripsacinae

Género: *Zea*

Especie: *Zea mays*

2.3. Diversidad genética

Durante décadas el maíz se ha destacado por ser uno de los cultivos más importantes en el mundo, pero a la vez, ha sido afectado por las tecnologías que

desarrollan nuevos métodos de mejoramiento que utilizan información genómica explotando este cultivo (Andorf *et al.*, 2019). La diversidad genética es de vital importancia ya que nos proporciona información sobre las estructuras de las poblaciones en diversos programas de mejoramiento donde se toman ciertos rasgos de interés a evaluar (Boakyewaa *et al.*, 2019). Los recursos genéticos de los cultivos están siendo cuestionados ya que utilizan la diversidad genética para mejorar las características de calidad nutricional, con la finalidad de generar un mayor rendimiento de alimentos para la población (Swarup *et al.*, 2021).

Sekhon *et al.* (2020) mencionan que el mejoramiento genético puede ayudar a prevenir pérdidas y evitar el acame de tallo en plantas de maíz en todo el mundo, pero a pesar de varios estudios genéticos, la falta de financiamiento ha retrasado buenos métodos de fenotipado para evaluar su resistencia. Un problema común que también afecta al maíz es el estrés por sequía, por lo que las estrategias de mejoramiento tradicionales buscan la disección genética de las diferentes etapas de desarrollo logradas a través del mapeo y el mejoramiento molecular (Liu y Qin, 2021).

Se realizó un estudio de 18 líneas de maíz con cruzamiento de individuos de una raza con la finalidad de obtener un conocimiento más enfocado a los parámetros y la diversidad genéticos, así como también evaluar las estrategias de mejoramiento y el rendimiento híbrido. Mediante esto se notó una gran variabilidad entre líneas, donde por fila diferentes rasgos de la mazorca obtuvieron como porcentaje un avance genético, y gracias a esto poder seleccionar genotipos y mejorar el rendimiento del maíz (Bhadru *et al.*, 2020).

2.4. Producción de maíz en México y el mundo

El maíz como alimento básico es considerado uno de los productos alimentarios más importantes debido a que su producción es principalmente para el consumo humano, animal e industrial. Sin embargo, los agricultores y comerciantes en México temen que pueda conducir a un aumento o que el precio disminuya en el futuro (López *et al.*, 2022).

Otro aspecto es que los productores deben asociarse con la certificación de sus productos desde el punto de vista de calidad y comercialización, ya que la pérdida por el clima es una de las principales afectaciones y con esto se evita que se pierda del todo y que no afecte su economía (Aguilar *et al.*, 2021).

En todo el mundo existen tecnologías de producción, desde las tradicionales hasta las más modernas, que ayudan a aplicar grandes cantidades de fertilizante por hectárea con semillas de gran tamaño, ayudando así a obtener mejores ganancias del cultivo del maíz (Vargas *et al.*, 2021). En Ucrania existe un problema con respecto al análisis global del maíz en comparación con EE. UU. y el Golfo de México, ya que el uso de fertilizantes y nuevas tecnologías crea una alternativa para mejorar la producción de maíz, pero las condiciones climáticas afectarán negativamente la seguridad alimentaria de Ucrania (Dibrova *et al.*, 2022).

Ramírez *et al.* (2017) realizaron un experimento para determinar la calidad física de granos y mazorcas de maíz rojo y amarillo. Los resultados mostraron que no existe diferencia estadística entre las variedades y mostraron que el grano con mejor endospermo es el amarillo (80.82%), la semilla morada (11.61%); y la variedad amarilla tiene granos más grandes (largo 10.09 mm y ancho 4.31 mm), concluyendo que el maíz amarillo da mayor calidad y rendimiento.

Se realizó un estudio para recopilar datos de porcentaje de preferencia con variedades locales de maíz en Chiapas, México, utilizando un modelo longit-multinomial con 200 agricultores, clasificándolo y dando como resultado tres tipos de agricultores: conservadores (10%), en transición (29.4%) e innovadores con (60.5%), con esto indicando que la mayoría de agricultores se enfocan más en alternativas criollas ya que este genera una mayor producción y tamaño de la mazorca, así como una mejor resistencia en cuanto a enfermedades (Sánchez *et al.*, 2017).

Se realizó un ensayo de validación de tecnología en el estado de Campeche entre los meses de julio y noviembre para integrar material genético en el rendimiento de grano, utilizando cuatro estimaciones de diferentes sitios, resultando en existencia 27 híbridos de grano blanco y 14 híbridos de grano amarillo que se pueden utilizar

para obtener buenos resultados y estimar un rendimiento de 4.1 a 6.0 t-ha (Medina *et al.*, 2019).

2.5. Aporte nutrimental

El maíz es uno de los granos más importantes y se caracteriza por su alto contenido en minerales y vitaminas importantes para la nutrición. Se ha logrado que el almidón de maíz para la alimentación del ganado ahora es casi 100 % digerible gracias a la modificación genética (Loy y Lundy, 2019).

Liu *et al.*, 2019 mencionan que el uso de fertilizantes de ácido húmico y compost de lombrices aumenta la tolerancia de las plantas de maíz a las sales de las raíces y permite que las plantas utilicen mejor los nutrientes del suelo.

Yao *et al.*, (2019) realizaron un experimento con el hongo negro (*Auricularia auricula*) del maíz utilizando tallos para observar si las plantas crecían sin problemas. Los resultados indicaron que los tallos de maíz contribuyeron al aumento del contenido de ceniza, proteína, Cu y Fe en el hongo, pero afecta negativamente los niveles de Zn, Mg y Mn, mientras que en los tallos altera los efectos sobre la melanina, agua, azúcares totales, azúcares reductores, fibra cruda y flavonoides totales, concluyendo que es producible, pero tiene bajos aportes de nutrientes tanto de hongos como de plantas.

Se realizó un estudio en Lacanjá Chansayab, Chiapas, México, donde se cosechó, pesó y calculó el contenido de nutrientes de Milpa durante tres años según prácticas agroforestales. Los datos arrojaron que contenían calorías, grasas, carbohidratos, fibra, azúcar, proteínas, vitaminas A y C, y gracias a estas prácticas de manejo de la selva lacandona han permitido a los agricultores de la zona adoptar buenas prácticas agrícolas que mejoren calidad y rendimiento, así como contribuir a la conservación de la biodiversidad y otros ecosistemas (Falkowski *et al.*, 2019).

2.6. Nanotecnología

La aplicación de la nanotecnología en la agroalimentación es una de las áreas de mayor crecimiento de la investigación. La nanotecnología ha revolucionado diversos sectores, enfocándose a la aplicación de la ciencia y la tecnología a escala

nanométrica. Creando innovación y tecnología para producir cantidad y calidad de alimentos para alimentar a la población mundial en rápido crecimiento actual (Lira *et al.*, 2018).

La nanotecnología aplicada al agro se ha estudiado desde hace 15 años y ahora existen muchas investigaciones sobre los avances de la nanotecnología agrícola. La nanotecnología incluye la síntesis de materiales en nanorégimen (1-100 nm) con propiedades físicas y químicas únicas (Robles y Cantú, 2017). Mediante esto existe una amplia aplicación de sistemas nanoestructurados en el campo de la agricultura que genera una diversidad en cuanto a materiales que contienen formas y tamaños tanto sintéticos como de forma natural que aplicados, dependiendo de la concentración y morfología, pueden beneficiar o crear efectos adversos en los cultivos (Araya *et al.*, 2021).

La nanotecnología surge en respuesta a los desafíos que enfrenta la agricultura moderna, como el aumento de la demanda de alimentos, la escasez de recursos y el impacto ambiental. Marín *et al.* (2021) indican que la nanotecnología tiene el potencial de transformar las prácticas agrícolas actuales disminuyendo la exposición de pesticidas cancerígenos al consumir alimentos altamente expuestos a estas sustancias, gracias a esto mantiene la seguridad alimentaria y previene el desarrollo de resistencia microbiana al exceso de químicos agrícolas. La dosificación y liberación controlada de agroquímicos en NPs aumenta su efectividad y produce alimentos más resistentes a los ataques de plagas por más tiempo que los cultivos producidos con métodos tradicionales. Vázquez (2023) menciona que el uso de nanotecnología (nanopesticidas y nanofertilizantes) puede tener efectos positivos en el crecimiento y el rendimiento de los cultivos, y mediante esto ayudar a conocer más a fondo factores importantes de las diferentes especies de plantas, las comunidades microbianas del suelo y sus propiedades físicas y químicas.

2.7. Nanomateriales

Los nanomateriales son materiales que tienen la capacidad de generar y permitir la administración eficiente de los nutrientes, obteniendo así una resistencia de las

plantas en cuanto a factores de estrés, generando nanosensores para la detección de diferentes enfermedades y nutrición baja de los cultivos (Spanos *et al.*, 2021).

Los nanomateriales se consideran como una alternativa atractiva a los materiales tradicionales que normalmente se emplean en la agricultura. Dentro de esto entran los pesticidas y fertilizantes donde se ha demostrado que tienen un gran potencial cuando se fabrican a nanoescala, lo que muestra una eficiencia alta en la liberación selectiva y controlada de agroquímicos, lo que resulta en una mayor biodisponibilidad, mejores rendimientos y productividad en general (Vázquez, 2023).

Se puede orientar a los agricultores en cuanto a la mejora y toma de decisiones sobre las tecnologías a aplicar, fomentando el uso de nanomateriales promoviendo sus beneficios y creando una cultura de uso de nuevas tecnologías para próximas generaciones de los agricultores, pero mediante esto se debe considerar la inversión que esta demanda y la disponibilidad de los agricultores para utilizar estas nuevas tecnologías (Oropeza *et al.*, 2023).

Rodríguez y Díaz (2024) mencionan que los nanomateriales proporcionan una alta capacidad para controlar el uso excesivo de fertilizantes, regulando los contaminantes en el agua y el aire y controlando algunos microorganismos patógenos de plantas. La síntesis de nanomateriales existentes y su evaluación de manera global es importante para capacitar a una nueva generación de técnicos y científicos para desarrollar nuevas tecnologías y transformar la agricultura.

Actualmente, las principales aplicaciones de nanomateriales se están desarrollando en diferentes cultivos, mediante esto se espera que en un futuro sea uno de los principales y más importantes en el campo agroalimentario por medio de nanoencapsulados y de nanocompuestos mediante aplicaciones con nuevos aditivos, biocidas, pesticidas y materiales que entren en contacto con más alimentos (Fúnez *et al.*, 2016).

2.8. Efecto de las NPs

Las NPs son materiales que se pueden clasificar en orgánicos o inorgánicos con tamaños desde 1 a 100 nanómetros (Faizan y Pichtel, 2020). Las NPs tienen propiedades avanzadas como alta reactividad, resistencia, superficie, sensibilidad, estabilidad, etc. Gracias a su diminuto tamaño estas se sintetizan utilizando una variedad de métodos para investigación y uso comercial que pueden ser utilizadas en procesos físicos, químicos y mecánicos (Ealia y Saravanakumar, 2017).

Las NPs son materiales alternativos aplicadas en lugar del uso excesivo de productos químicos, pesticidas y fungicidas en cultivos agrícolas ya que estas ayudan a generar resistencia a diversas enfermedades y plagas de las plantas, demostrando que la aplicación de NPs es eficaz ayudando también a diversos estreses bióticos por los que pueden pasar los cultivos ya sea la sequía, el calor y la salinidad, de esta manera mejora la tolerancia en las plantas (Moneim *et al.*, 2021).

La mayoría de los cultivos están expuestos a diversos estreses abióticos como calor, frío, sequía, salinidad, inundaciones y metales pesados si no son monitoreados de una manera adecuada. En general, los factores estresantes abióticos generan efectos negativos sobre el crecimiento y desarrollo de las plantas, afectando la productividad agrícola, y también causando problemas alimentarios que provocan pérdidas económicas a los productores. Las NPs pueden ayudar a estimular la actividad de ciertas enzimas, que generan el aumento de clorofila, eficiencia fotosintética y ayudar a controlar los patógenos de las plantas (Saadony *et al.*, 2022).

2.8.1 Aplicación de NPs de óxido de zinc (NPs-ZnO) en la agricultura

Las NPs-ZnO están surgiendo como herramientas potenciales en la ciencia vegetal, y otra de sus funciones es generar un mejor crecimiento y rendimiento de las plantas. Sin embargo, también causan ciertos efectos nocivos en cultivos si se aplican en dosis altas, y la duración varía entre diferentes plantas, así como el

tamaño y la forma de ellas; mediante esto se han realizado extensos estudios para superar la incompatibilidad de las NPs-ZnO, ya que se ha descubierto que dosis bajas y tiempos de exposición bajos eran beneficiosos para las plantas (Thounaojam *et al.*, 2021).

Se ha informado que algunos tipos de NPs, principalmente las NPs-ZnO, pueden impedir la producción de bacterias, levaduras y hongos filamentosos dañinos en las plantas. Gracias a que posee propiedades fisicoquímicas y biológicas únicas, lo que lo hacen atractivo para la industria alimentaria como un agente antifúngico prometedor (Sun y Le, 2018).

En la agricultura, las NPs-ZnO se utilizan como nanofertilizantes, nanoreguladores del crecimiento temprano y nanopesticidas. Mediante esto se tiene una interacción que mejora las vías de absorción y transporte de las NPs-ZnO en las plantas, donde los principales mecanismos son el crecimiento, desarrollo y resistencia, pero si se exceden dosis puede llegar a ser tóxico (Liu y Lian, 2022).

Estrada (2019) realizó un estudio donde se evaluó la aplicación de NPs-ZnO sobre la mejora de la calidad fisiológica y sanitaria de una raza Mexicana de maíz nativo rojo, mediante las pruebas de germinación con respecto a la calidad fisiológica, se encontró un incremento significativo en la germinación de las semillas con el uso de las NPs-ZnO, mediante esto se obtuvieron características de la plántula de maíz como la longitud y diámetro de la plúmula, la longitud de la raíz y el número de raíces secundarias siendo más notorio en un 90%. En el cultivo de arroz los valores SPAD, potenciales fotosintéticos, rendimiento, la acumulación de materia seca, la calidad del arroz y los contenidos de Zn en los granos, incrementaron significativamente con las NPs-ZnO (Zhang *et al.*, 2021).

2.8.2 Aplicación de NPs de sulfato de zinc (NPs-ZnSO₄) en la agricultura

Las NPs-ZnSO₄ pueden mejorar la transcripción de genes de capacidad antioxidante, mediante esto ayuda a que las aplicaciones en ciertos cultivos mejoren la respuesta de defensa al aumentar las enzimas antioxidantes, aunque si se tiene una toxicidad en estas se puede obtener un contenido mínimo de clorofila y una limitación en cuanto a la fotosíntesis ocasionando disminución de biomasa (Wang *et al.*, 2018).

Se realizó un experimento en invernadero donde se cultivó plantas de café el cual se hicieron dos aplicaciones foliares de 10 mg/L de Zn como NPs-ZnSO₄ y se compararon con las plantas testigo. A los 45 días de aplicación las NPs-ZnSO₄ mostraron resultados positivos en el peso fresco y el peso seco de raíces y hojas, aumentando el peso fresco en un 37% en raíz y un 95% en hojas, en comparación con el control (Rossi *et al.*, 2019).

García *et al.* (2019) realizaron otro experimento para evaluar las respuestas fisiológicas de plantas de chile habanero con diferentes aplicaciones foliares de NPs-ZnSO₄ en condiciones de invernadero. Las plantas de chile habanero se cultivaron hasta la madurez y durante las primeras etapas de desarrollo fenológico se hicieron aplicaciones foliares en concentraciones de 1000 y 2000 mg L⁻¹; como resultado obtenido, NPs-ZnSO₄ a una concentración de 1000 mg L⁻¹ mostraron cambios significativos en la altura de la planta, el diámetro del tallo y el contenido de clorofila. Las NPs-ZnSO₄ en concentraciones de 2000 mg L⁻¹ tuvo efectos negativos en cuanto al crecimiento de las plantas, aunque aumentaron significativamente la calidad del fruto.

Las cantidades excesivas de boro pueden frenar el crecimiento y desarrollo de plantas de algodón, afectando la calidad y rendimiento de un cultivo altamente comercial a nivel mundial. Mediante esto se hizo una prueba para mostrar la eficacia de las NPs-ZnSO₄ para aliviar la toxicidad del boro. Las plantas con aplicaciones mostraron aumentos significativos en el peso fresco total, con un 75.97%, el peso fresco de la raíz 39.64% y el peso fresco de la hoja 69.91% y mejorando parámetros de fotosíntesis (Nassarawa *et al.*, 2024).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ubicación del experimento

El experimento se llevó a cabo en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, en Saltillo, Coahuila, en el Área Agroecológica del Departamento de Botánica. El clima prevaleciente es templado semiseco, con una temperatura promedio de 17 °C.

3.2. Análisis de suelo

Se realizó un análisis de suelo para determinar la composición nutrimental del suelo donde se establecería el cultivo. Se identificó que el terreno presenta niveles moderados de Fe y Zn.

3.3. Material vegetal utilizado

Se utilizaron semillas de maíz del híbrido A7573 de la empresa Asgrow. Las características principales del híbrido son las siguientes:

Híbrido: cruza triple

Madurez: intermedio precoz

Altura promedio de planta: 2.10 a 2.50 mts.

Días de cosecha: 100 a 110 días

Color de grano: blanco

3.4. Tratamientos evaluados

Se evaluaron dos NPs (ZnO y ZnSO₄), dos dosis de cada NPs (1000 y 2000 mg L⁻¹) y un testigo, tal como se observa en el cuadro 1.

Cuadro 1 Descripción de los tratamientos evaluados.

Tratamientos	NPs-ZnO (mg L ⁻¹)	NPs-ZnSO ₄ (mg L ⁻¹)
T1	1000	-
T2	2000	-
T3	-	1000
T4	-	2000
T5	Testigo (sin NPs)	

3.5. Diseño experimental

El experimento se estableció bajo un diseño experimental de bloques completos al azar, con 5 tratamientos y 4 repeticiones cada uno. En total se sembraron 8 plantas de maíz por unidad experimental, dando un total de 32 plantas por tratamiento. En todo momento se procuró la competencia completa entre las plantas, por tal razón se sembró un surco en cada lado utilizado como barrera. Para la distribución de los tratamientos se trazaron 4 bloques utilizando surcos de 2 m de largo y calles de 1.0 m de longitud entre cada bloque como se observa en la Figura 1.

R1	T ₁	T ₃	T ₂	T ₅	T ₄
R2	T ₄	T ₃	T ₅	T ₁	T ₂
R3	T ₄	T ₃	T ₅	T ₂	T ₁
R4	T ₅	T ₄	T ₁	T ₃	T ₂

Figura 1. Distribución de los tratamientos y repeticiones.

3.6. Aplicación de las NPs

Las dosis de NPs se solubilizaron en agua. En el caso específico de las NPs-ZnO, fueron previamente sonicadas en un equipo Ultrasonic (Vevor) durante 20 min para dispersar las partículas. La aplicación de las NPs-ZnO y NPs-SO₄ se realizó de

forma foliar, empapando las hojas de la planta de maíz cada 15 días durante 2 meses, realizando la primera aplicación a los 30 días después de la siembra.

3.7. Siembra y evaluación del cultivo

3.7.1. Acondicionamiento del suelo

Se llevó a cabo la preparación del terreno realizando un barbecho y rastreo para aflojar el suelo y eliminar malezas. Posteriormente se realizaron los surcos, con una distancia de 0.80 m entre surcos. Se incorporó materia orgánica (estiércol seco) en proporción de 5 ton ha⁻¹. 3

3.7.2. Siembra

Las semillas se sembraron de forma directa en el terreno, colocando una semilla por golpe a una profundidad de 3 cm, dejando un espacio entre planta de 0.25 m.

3.8. Labores culturales

3.8.1. Riego

Se instaló un sistema de riego por goteo, colocando cintilla con gotero integrado, los cuales se encontraban a una distancia de 30 cm entre goteros. El riego se realizó cada tercer día para obtener la humedad adecuada para el cultivo, considerando las condiciones ambientales y las características físicas del suelo.

3.8.2. Control de malezas

La maleza se eliminó de forma manual, con ayuda de azadón. Esta práctica se realizó a los 30 y 50 días después de la emergencia del maíz.

3.8.3. Cosecha

La cosecha fue realizada manualmente alrededor de los 85 días después de la emergencia, en etapa de grano masoso/lechoso del elote, cosechando 1 planta por tratamiento de cada repetición tomando un fruto de cada una dando un total de 20 frutos de todas las repeticiones.

3.9. Variables agronómicas

3.9.1. Peso del fruto

A los 4 frutos cosechados por tratamiento se les determinó el peso fresco. Esta determinación se realizó en frutos sin brácteas con la ayuda de una balanza analítica. Esta variable se reportó en gramos por fruto.

3.9.2. Diámetro del fruto

Se determinó el diámetro del elote tomando la medición en la parte media del fruto sin quitarle las brácteas, evaluando 4 frutos por tratamiento. La evaluación se determinó con ayuda del Vernier digital (Truper). Los valores del diámetro de fruto se reportaron en mm por fruto.

3.9.3. Longitud del fruto

Se determinó la longitud de los 4 frutos cosechados por tratamiento con ayuda de un vernier. Para esta determinación se tomó medida del ápice hasta la base del fruto sin brácteas. Los resultados se reportaron en cm por fruto.

3.9.4. Medición de altura de la planta

Se midió la altura de la planta con ayuda de una cinta métrica. Se midió de la base del tallo hasta el ápice de la espiga. Para esta variable se evaluaron 5 plantas por repetición. Los datos se reportaron en centímetros por planta.

3.9.5. Peso fresco de la planta

Para determinar esta variable, se pesó el tallo y hojas con ayuda de una balanza digital; posteriormente, se sumó el peso fresco de tallo y hojas para obtener el peso fresco de la planta. Se evaluaron 5 plantas por repetición. Los datos se reportaron en gramos por planta.

3.9.6. Peso seco de la planta

Para esta variable, se evaluaron 5 plantas por repetición. Se cortó el tallo y hoja en trozos pequeños de cada planta y se dejaron secar por dos meses, posteriormente,

se llevaron a pesar en una balanza digital. Para obtener el peso seco de la planta se sumó el peso seco de tallo y hojas. Los datos se reportaron en gramos por planta.

3.10. Variables bioquímicas

Para determinar parámetros bioquímicos, se evaluaron 5 elotes por repetición.

3.10.1. Sólidos solubles totales (°Brix)

Para determinar este parámetro se desgranó 1 elote de cada uno de los tratamientos (un elote por planta) y se martajaron en un mortero para obtener el jugo de los granos del elote, después se colocó una gota de la muestra en un refractómetro manual (ATAGO) cubriendo completamente el orificio de este, debidamente calibrado con agua destilada. Obteniendo así los °Brix.

3.10.2. pH y conductividad eléctrica (CE)

La medición de estas variables se llevó a cabo con un potenciómetro (HANNA). Se obtuvo el jugo de los granos para evaluar el pH y CE con ayuda de un potenciómetro (Hanna). La CE se reportó en mS cm^{-1} .

3.10.3. Potencial óxido reducción (ORP)

El ORP se midió en el jugo obtenido de los granos, el cual se determinó con un equipo ORP (Gain Express).

3.11. Análisis de varianza

Para el análisis estadístico de los datos, se realizó un análisis de varianza con comparación de medias de tukey ($\alpha \leq 0.05$) con el programa estadístico InfoStat versión 2021.

4. RESULTADOS

Sólidos solubles totales

La prueba de comparación de medias de Tukey ($\alpha \leq 0.05$) mostró diferencias estadísticas entre los tratamientos. En este, el T4 (2000 ppm de NPs-ZnSO₄) fue el que mostró el mejor comportamiento y fue significativamente superior al T3 (1000 ppm de NPs-ZnSO₄) y al testigo (Figura 2); dicho tratamiento (T4) mejoró el contenido de sólidos solubles totales (12.25 °Brix) en el grano del elote, impactando de manera positiva en el sabor del elote. Los tratamientos T1 y T2 (1000 y 2000 ppm NPs-ZnO, respectivamente) fueron estadísticamente similares al tratamiento T4 (2000 ppm de NPs-ZnSO₄), estos tratamientos incrementaron el contenido de sólidos solubles totales del grano (10.5 °Brix), comparado con el testigo (8.5 °Brix).

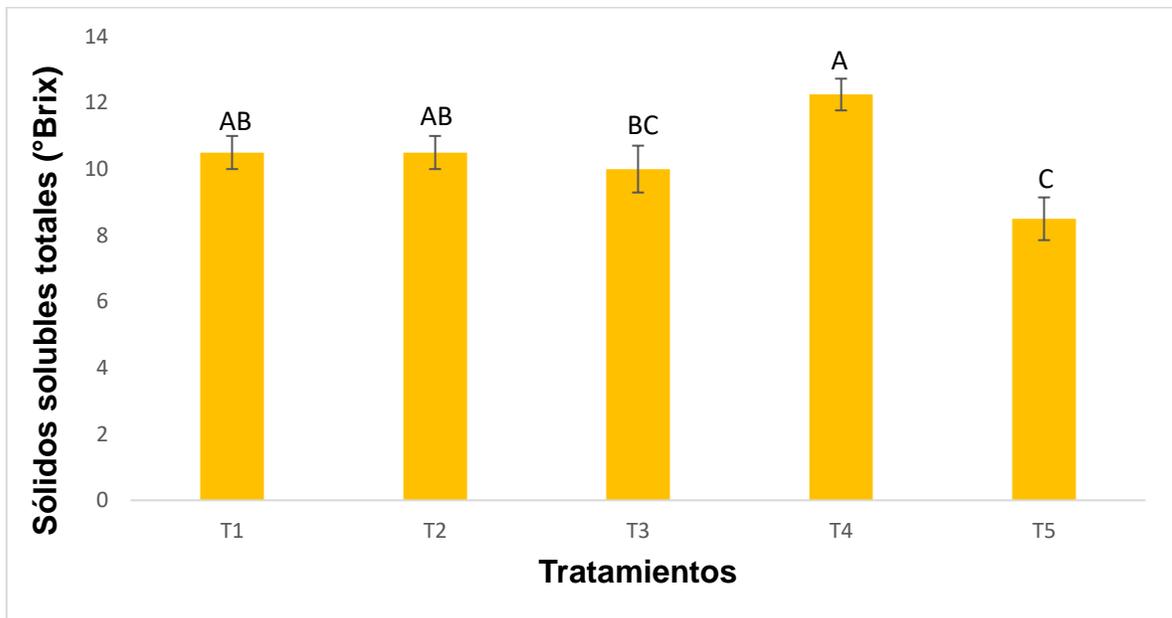


Figura 2. Sólidos solubles totales en el grano del elote de plantas de maíz tratadas con dos dosis de NPs-ZnO y NPs-ZnSO₄. T1: 1000 ppm de NPs-ZnO; T2: 2000 ppm NPs-ZnO; T3: 1000 ppm de NPs-ZnSO₄; T4: 2000 ppm NPs-ZnSO₄; T5: testigo. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con la prueba de comparación múltiple de Tukey ($p \leq 0.05$).

pH

El análisis estadístico por medio de la prueba de comparación de medias de Tukey ($\alpha \leq 0.05$) mostró diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos en la variable pH del grano de elote (Figura 3). En dicho parámetro, los tratamientos T1, T3, T4 y T5 (1000 ppm NPs-ZnO, 1000 ppm NPs-ZnSO₄, 2000 ppm NPs-ZnSO₄ y testigo) fueron estadísticamente iguales entre ellos, manteniéndose en un rango de 7.5 hasta 7.3 de pH y por lo tanto neutro. El tratamiento T2 (2000 ppm de NPs-ZnO) estimuló una reducción del pH del grano de elote, estabilizándose en 6.7, lo que puede modificar el sabor del fruto.

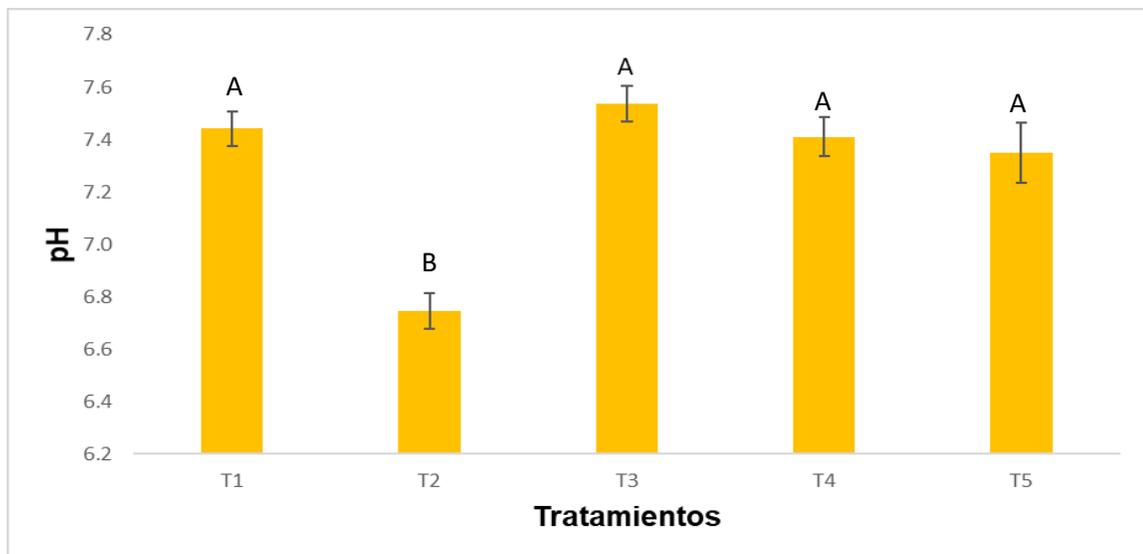


Figura 3. pH del grano del elote de plantas de maíz tratadas con dos dosis de NPs-ZnO y NPsZnSO₄. T1: 1000 ppm de NPs-ZnO; T2: 2000 ppm NPs-ZnO; T3: 1000 ppm de NPs-ZnSO₄; T4: 2000 ppm NPs-ZnSO₄; T5: testigo. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

Conductividad eléctrica

El análisis estadístico por medio de la prueba de comparación de medias de Tukey ($\alpha \leq 0.05$) mostró diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos en la variable conductividad eléctrica en el grano del elote (Figura 4). Sin embargo, la conductividad eléctrica en los granos de elote obtenido con el testigo (5.89 mS cm^{-1}) no fue superada estadísticamente por las dosis evaluadas de NPs-ZnO y NPs-ZnSO₄; aunque, se pudo observar que entre los tratamientos en los que se adicionó alguna de las NPs, se alcanzó una conductividad eléctrica con el tratamiento T2 (2000 ppm de NPs-ZnO⁴) (6.1 mS cm^{-1}) ligeramente mayor que el resto de los tratamientos con NPs.

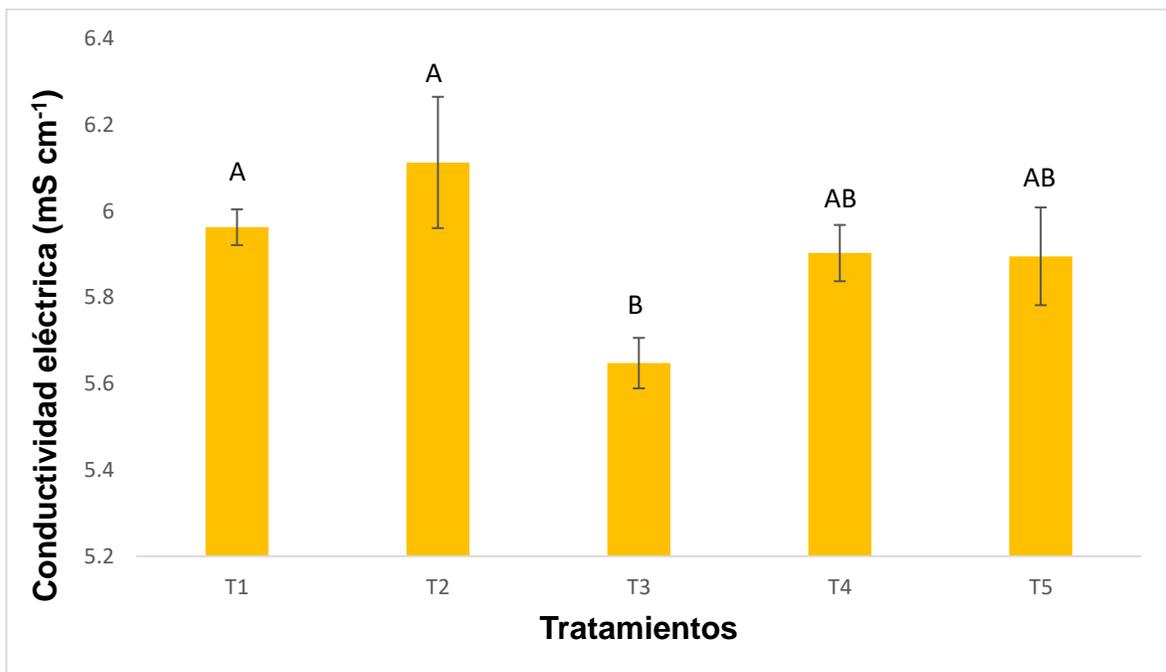


Figura 4. Conductividad eléctrica en el grano de elote de plantas de maíz tratadas de dos dosis de NPs-ZnO y NPsZnSO₄. T1: 1000 ppm NPs-ZnO; T2: 2000 ppm NPs-ZnO; T3: 1000 ppm NPs-ZnSO₄; T4: 2000 ppm NPs-ZnSO₄; T5: testigo. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con LSD Fisher ($p \leq 0.05$).

Potencial óxido reducción (ORP)

El análisis estadístico por medio de la prueba de comparación de medias de Tukey ($\alpha \leq 0.05$) mostró diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos en la variable de potencial óxido reducción del grano del elote, donde el tratamiento T2 fue estadísticamente más bajo en comparación con los demás tratamientos (Figura 5).

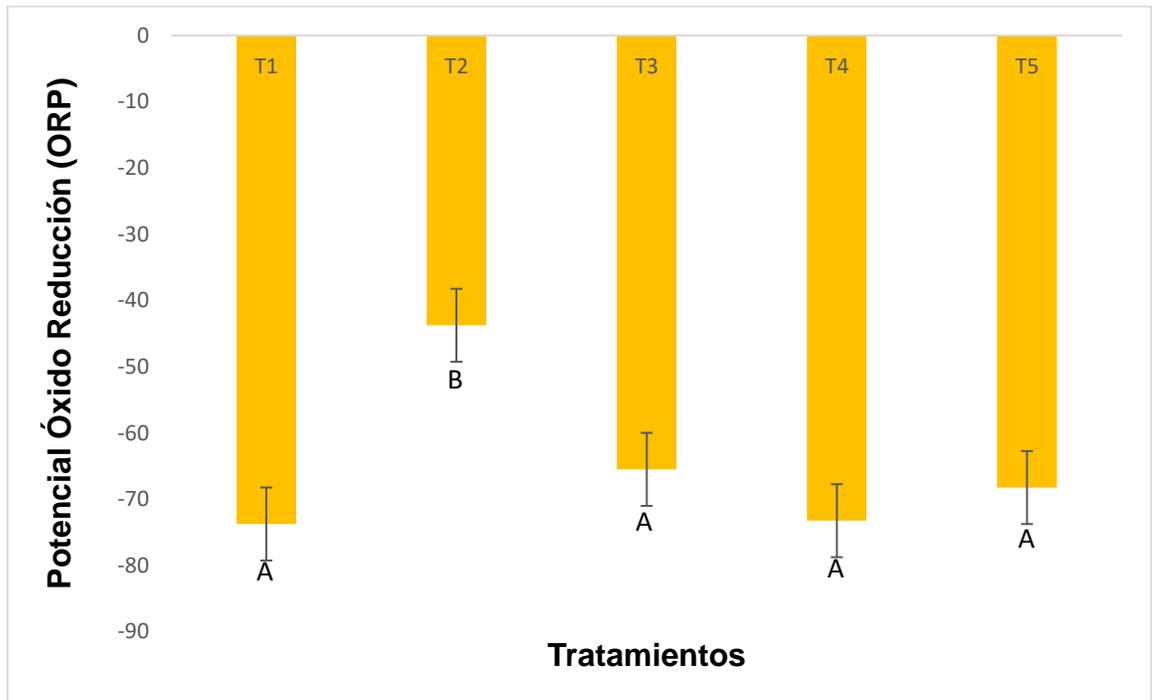


Figura 5. Potencial óxido reducción en el grano del elote de plantas de maíz tratadas con dos dosis de NPs-ZnO y NPs-ZnSO₄. T1: 1000 ppm NPs-ZnO; T2: 2000 ppm NPs-ZnO; T3: 1000 ppm NPs-ZnSO₄; T4: 2000 ppm NPs-ZnSO₄; T5: testigo. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

Peso del elote

El análisis estadístico por medio de la prueba de comparación de medias de Tukey ($\alpha \leq 0.05$) no mostró diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos en la variable de peso de elote (Figura 6). Aunque, entre los tratamientos evaluados se observó un ligero incremento en el peso de elote en el tratamiento T2 (2000 ppm de NPs-ZnO) (286.2 g elote⁻¹); mientras que, el tratamiento T5 (testigo) presentó un ligero detrimento en el valor de peso de elote (235.7g fruto⁻¹).

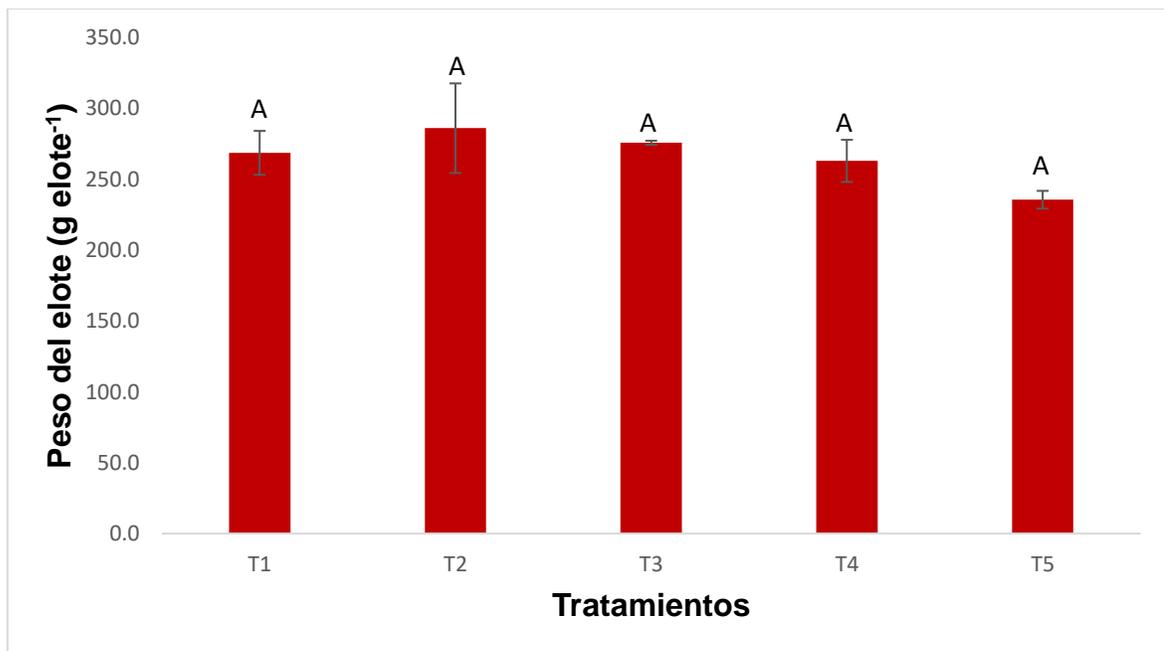


Figura 6. Peso de elote del cultivo de maíz tratado con dos dosis de NPs-ZnO y NPs-ZnSO₄. T1: 1000 ppm NPs-ZnO; T2: 2000 ppm NPs-ZnO; T3: 1000 ppm NPs-ZnSO₄; T4: 2000 ppm NPs-ZnSO₄; T5: testigo. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

Largo del elote

El análisis estadístico por medio de la prueba de comparación de medias de Tukey ($\alpha \leq 0.05$) mostró diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos en la variable de largo de elote (Figura 7). Observando que los tratamientos T1, T3, T4 y T5 (1000 ppm NPs-ZnO, 1000 ppm NPs-ZnSO₄, 2000 ppm NPs-ZnSO₄ y testigo) presentaron un valor del largo de fruto similar estadísticamente entre ellos; mientras que, el tratamiento T2 (2000 ppm de NPs-ZnO) presentó el mayor valor de largo de fruto (26 cm fruto⁻¹), superando al resto de los tratamientos en los que se aplicó NPs y al testigo.

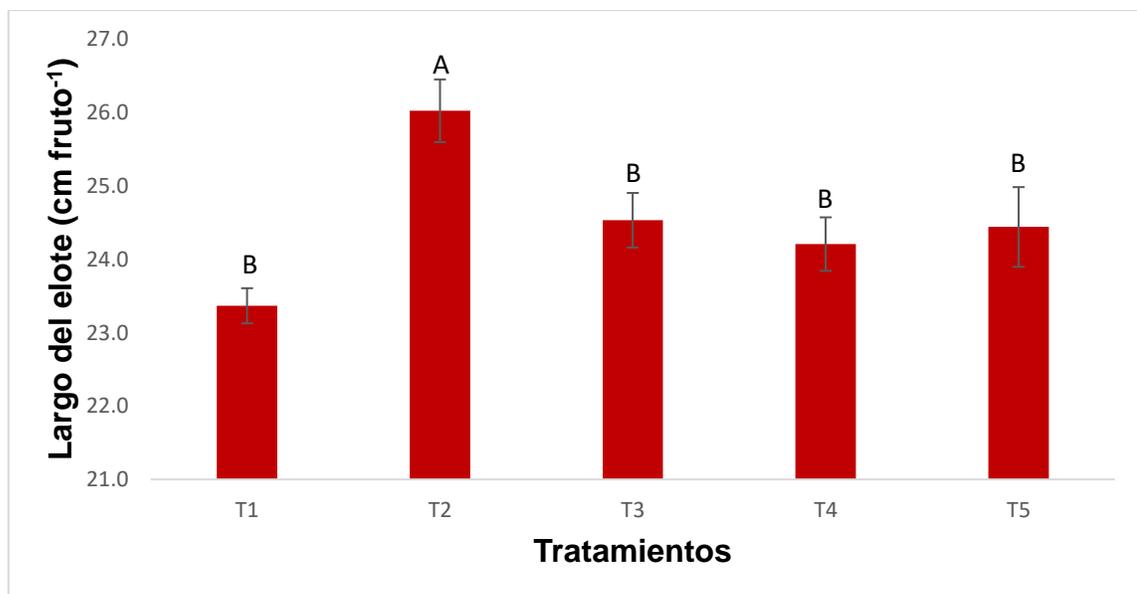


Figura 7. Largo del elote del cultivo de maíz tratado con dos dosis de NPs-ZnO y NPs-ZnSO₄. T1: 1000 ppm NPs-ZnO; T2: 2000 ppm NPs-ZnO; T3: 1000 ppm NPs-ZnSO₄; T4: 2000 ppm NPs-ZnSO₄; T5: testigo. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

Diámetro del elote

El análisis estadístico por medio de la prueba de comparación de medias de Tukey ($\alpha \leq 0.05$) no mostró diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos en la variable de diámetro de elote (Figura 8). Sin embargo, el tratamiento T3 (1000 ppm de NPs-ZnSO₄) presentó un ligero incremento en el diámetro de elote (53.1 cm de fruto⁻¹); mientras que, el tratamiento T5 (testigo) presentó un mayor detrimento en esta variable (50.4 cm fruto⁻¹).

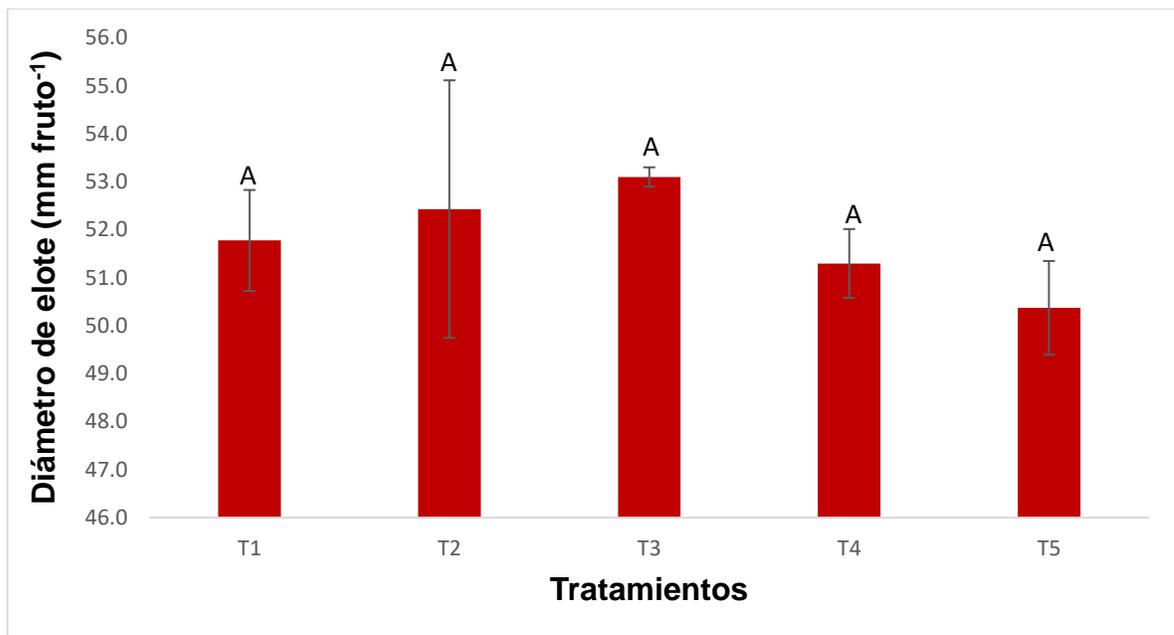


Figura 8. Grosor del elote del cultivo de maíz tratadas con dos dosis de NPs-ZnO y NPs-ZnSO₄. T1: 1000 ppm NPs-ZnO; T2: 2000 ppm NPs-ZnO; T3: 1000 ppm NPs-ZnSO₄; T4: 2000 ppm NPs-ZnSO₄; T5: testigo. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

Altura de la planta

El análisis estadístico por medio de la prueba de comparación de medias de Tukey ($\alpha \leq 0.05$) mostró diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos en la variable de altura de planta (Figura 9). Sin embargo, estadísticamente ninguno de los tratamientos en los que se adicionó NPs-ZnO (T1 y T2) y NPs-ZnSO₄ (T3 y T4) superó al tratamiento testigo (T5). Aunque, el tratamiento T4 (2000 ppm de NPs-ZnSO₄) presentó un ligero incremento en la altura de planta (159.9 cm planta⁻¹); además, se observó un detrimento en la altura de planta con el tratamiento T2 (2000 ppm de NPs-ZnO) (127.1 cm planta⁻¹), respecto al tratamiento T5 (testigo) (145.3 cm planta⁻¹).

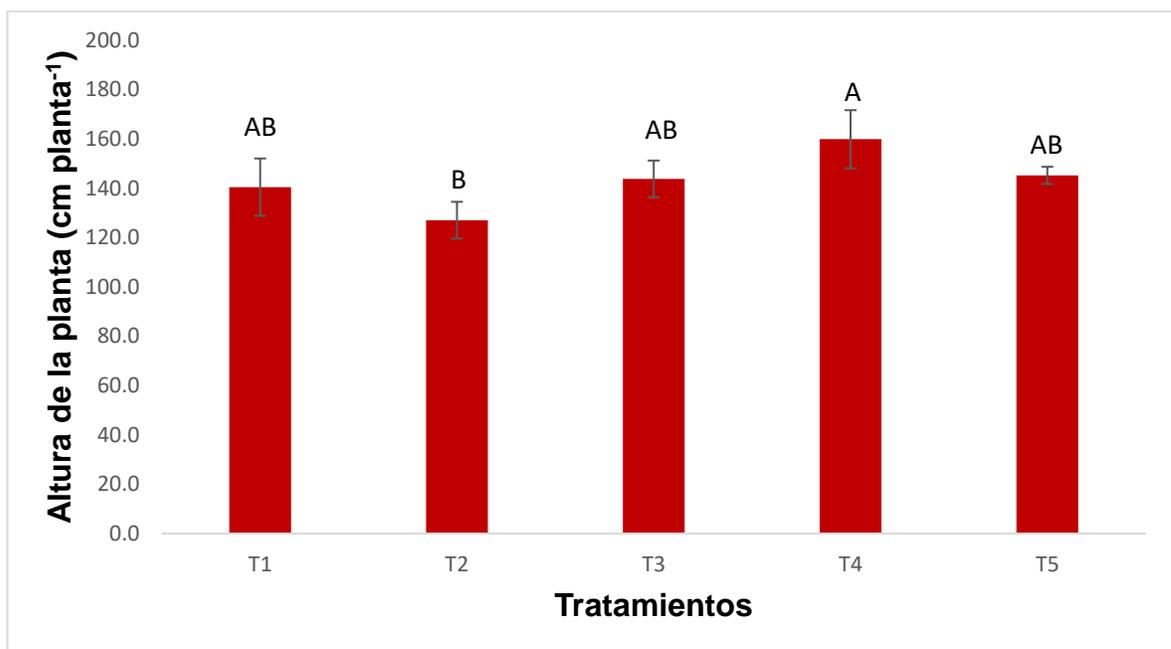


Figura 9. Altura de planta de maíz tratadas con dos dosis de NPs-ZnO y NPs-ZnSO₄. T1: 1000 ppm NPs-ZnO; T2: 2000 ppm NPs-ZnO; T3: 1000 ppm NPs-ZnSO₄; T4: 2000 ppm NPs-ZnSO₄; T5: testigo. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

Peso fresco de la planta

El análisis estadístico por medio de la prueba de comparación de medias de Tukey ($\alpha \leq 0.05$) no mostró diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos en la variable de peso fresco de planta (Figura 10). Sin embargo, comparado al tratamiento T5 (testigo), se observó un ligero incremento en el peso fresco de planta en los tratamientos T1 y T4 (1000 ppm NPs-ZnO y 2000 ppm NPs-ZnSO₄) (412.7 y 424.2 g planta⁻¹, respectivamente), superando ligeramente al tratamiento testigo por un 4.56 y 7.47 %, respectivamente.

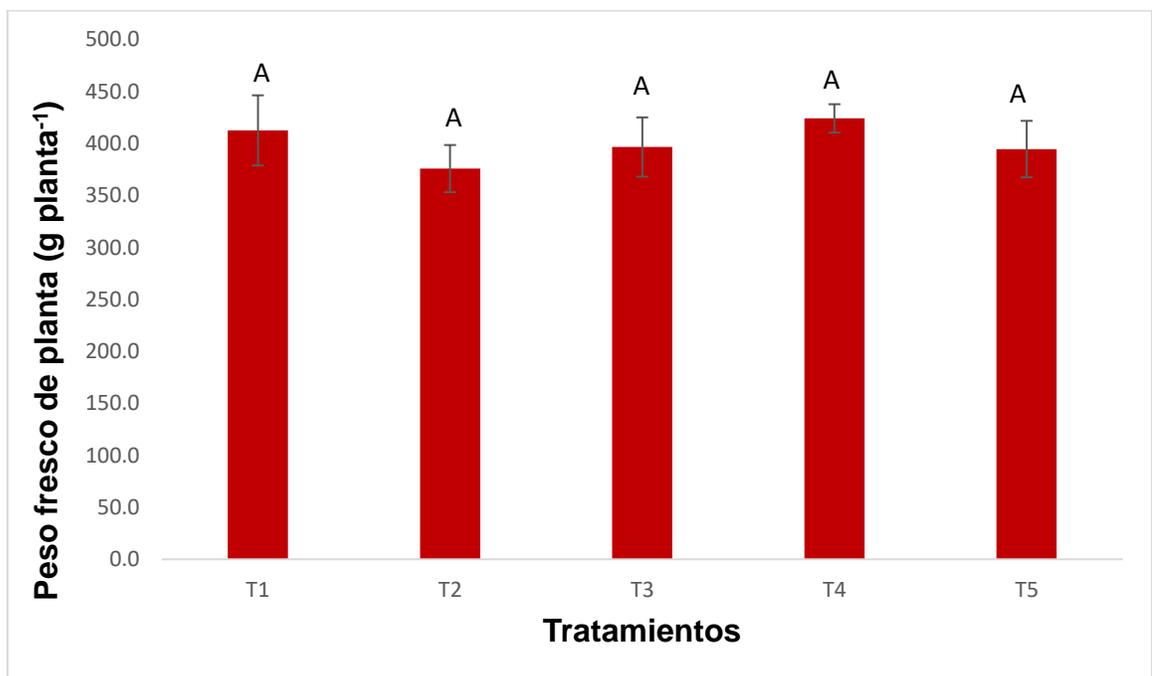


Figura 10. Peso fresco de planta de maíz tratadas con dos dosis de NPs-ZnO y NPs-ZnSO₄. T1: 1000 ppm NPs-ZnO; T2: 2000 ppm NPs-ZnO; T3: 1000 ppm NPs-ZnSO₄; T4: 2000 ppm NPs-ZnSO₄; T5: testigo. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

Peso seco de la planta

El análisis estadístico por medio de la prueba de comparación de medias de Tukey ($\alpha \leq 0.05$) mostró diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos en la variable de peso seco de planta (Figura 11). Aunque, ninguno de los tratamientos en los que se aplicó NPs (T1, T2, T3 y T4) superaron estadísticamente al T5 (testigo). Así mismo, se observó que entre los tratamientos en los que se aplicó NPs, el tratamiento T4 (2000 ppm NPs-ZnSO₄) (127.8 g planta⁻¹) superó al tratamiento T1 (1000 ppm NPs-ZnO) (109.7 g planta⁻¹).

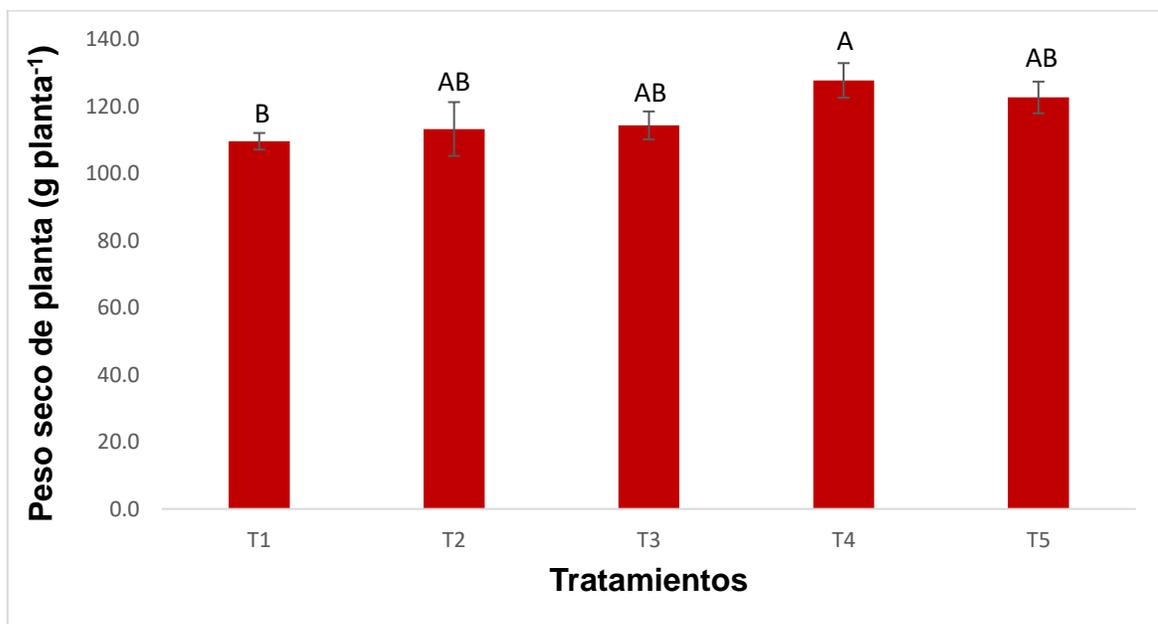


Figura 11. Peso seco de la planta de maíz tratado con dos dosis de NPs-ZnO y NPs-ZnSO₄. T1: 1000 ppm NPs-ZnO; T2: 2000 ppm NPs-ZnO; T3: 1000 ppm NPs-ZnSO₄; T4: 2000 ppm NPs-ZnSO₄; T5: testigo. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

5. DISCUSIÓN

5.1. Variables bioquímicas

El contenido de sólidos solubles totales en el elote mostró el mayor valor con el tratamiento de 2000 mg L⁻¹ de NPs-ZnSO₄; no obstante, este tratamiento fue similar a los tratamientos en los que se aplicó NPs-ZnO, superando al testigo (Figura 2). Estos resultados difieren con López *et al.* (2018), quienes encontraron que el control presentó el valor más alto con 5.4° Brix, superando por 5.55% al tratamiento de 500 ppm de NP Cu. La disminución puede deberse al uso de azúcares simples en la respiración celular.

La conductividad eléctrica en los elotes en los que se les aplicó NPs (T1, T2, T3 y T4) fueron similar al tratamiento testigo (T5). Contrario a nuestros resultados, López *et al.*, (2018) reportaron los valores más bajos de CE en los frutos Control, mientras que, los frutos en un tratamiento con 250 mg L⁻¹ NPs-Cu mostraron aumentos en la CE de 17.39%. Esto puede atribuirse al aumento de K, ya que este elemento es uno de los solutos inorgánicos más importantes en las plantas.

El pH del fruto incrementó con las dosis de 1000 mg L⁻¹ de NPs-ZnSO₄, sin embargo, cuando es aplicado a 2000 mg L⁻¹ de NPs-ZnO acidifica el elote (Figura 4). López *et al.* (2018) registraron un aumento del pH del 2.79% en frutos de tomate con la aplicación de NPs-Cu + quitosano en dosis de 125 y 50 mg L⁻¹. El aumento del pH de los frutos se debe a la transformación de los ácidos orgánicos de las vacuolas de los vegetales en azúcares simples que luego se utilizan en la respiración celular para obtener energía. Esto provoca una disminución de la acidez y, por tanto, un aumento del pH.

En cuanto a la medición de ORP la dosis de 2000 ppm de NPs-ZnO fue la que obtuvo niveles más bajos en comparación con los tratamientos restantes donde no hubo diferencias (Figura 5). En comparación Juárez *et al.* (2016) donde indican que con el tratamiento de 250 mg L⁻¹ con un 5.7% de NPs-Cu + quitosano obtuvo de disminución en el ORP con la aplicación. Un ORP con valores bajos indica una mejor calidad de la fruta, lo que puede traducirse en un mayor potencial

antioxidante. Esto indica un efecto beneficioso de la aplicación de NPs-Cu sobre la calidad de la fruta.

5.2. Variables agronómicas

En el peso del elote el gráfico muestra que no hubo diferencias significativas entre los tratamientos (Figura 6). En la evaluación del largo del elote tuvo un gran aumento con el tratamiento de 2000 ppm de NPs-ZnO, con respecto a los demás tratamientos que comparten similitud donde no hubo diferencias (Figura 7).

En cuanto diámetro del elote el gráfico muestra que no hubo

diferencias significativas entre los tratamientos (Figura 8). Comparando datos con López *et al.* (2021) mencionan que en dosis de 2.5 mg de las NPs-Se con relación a las plantas de pepino donde la longitud, diámetro y peso de fruto, presentaron los valores más altos a esta concentración, aunque sin diferencias significativas. Los datos obtenidos en la altura de la planta de maíz nos indican que se obtuvo un aumento con el tratamiento de 2000 ppm de NPs-ZnSO₄ siendo así el de valores más altos, pero de igual manera todos los tratamientos fueron buenos y comparten similitud (Figura 9).

Vargas *et al.* (2023) mencionan que en plantas de tomate a altura de la planta no mostro diferencias significativas en plantas de tomate, con los tratamientos con NPs-ZnO por diferentes vías de aplicación, siendo la dosis de 30 mg·L⁻¹ de NPs en combinación con 10 mL⁻¹ de microorganismos la que promovió 5.53% de incremento respecto al control. Con este tipo de NPs la asimilación de fósforo y nitrógeno ayuda en la interacción entre planta y microorganismos tiene efecto positivo en la salud y productividad de los cultivos.

En cuanto al peso fresco de la planta no hubo diferencias significativas entre tratamientos (Figura 10). Morales *et al.* (2023) señalaron que al aplicar extractos de algas de algas NPs-ZnO de manera foliar en una concentración de 1 mL⁻¹ incrementó 83.3% el peso fresco de las plántulas de pimiento esto se debe a que

extracto de algas de NPs-ZnO y microorganismos, funcionan como bioestimulantes de plantas, mejorando el crecimiento vegetativo.

El peso seco de la planta tuvo un mayor aumento en la concentración de 2000 ppm de NPs-ZnSO₄, pero los tratamientos restantes también tuvieron un aumento significativo teniendo similitud entre ellos (Figura 11). Morales *et al.* (2023) también indican que la aplicación de 2 ppm en plantas de maíz aumentó el desarrollo y el peso seco de las plantas. En tanto que, esto se debe a que los microorganismos estimulan el crecimiento de las plantas mediante la síntesis de sustancias reguladoras del crecimiento vegetal, fijación de nitrógeno y solubilización de nutrimentos.

6. CONCLUSIONES

La aplicación foliar de dos fuentes de NPs de Zn aumentó la calidad de los frutos de elote, principalmente en los parámetros de °Brix, CE y pH. Por lo que, la aplicación de NPs de ZnO y ZnSO₄ mostraron influencia positiva en la acumulación de los parámetros de calidad en el crecimiento temprano del elote, en la síntesis de carbohidratos y transformación de los azúcares presentes.

Se observó que los tratamientos de NPs-ZnSO₄ de 1000 y 2000 ppm y NPs-ZnO de 2000 ppm mostraron influencia positiva en el rendimiento y calidad del fruto mostrando así que se recomienda la aplicación de estas dos fuentes en las dosis proporcionadas; por lo tanto, la aplicación foliar de NPs muestra tener efectos mejoradores de germinación y crecimiento en las plantas de maíz, aumentando el rendimiento y no teniendo un impacto negativo en el ambiente.

7. LITERATURA CITADA

Aguilar-Curiel, A. J., Quintero-Ramírez, J. M., Sangerman-Jarquín, D. M., & Omaña Silvestre, J. M. (2021). Situation and challenges of corn production and commercialization in Tulantepec, Hidalgo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(7), 1319-1324.

Andorf, C., Beavis, WD, Hufford, M., Smith, S., Suza, WP, Wang, K., ... y Lübberstedt, T. (2019). Avances tecnológicos en el mejoramiento del maíz: pasado, presente y futuro. *Genética teórica y Aplicada*, 132, 817-849.

Araya-Matthey, J., Sandoval, J., & Rojas-Carrillo, O (2021). Nanomateriales en aplicaciones agrícolas. Recientes avances en la agroindustria bananera. *Nanomaterials in agricultural applications. Recent advances in the banana industry.*

Bhadru, D., Swarnalatha, V., Mallaiah, B., Sreelatha, D., Kumar, MV y Reddy, ML (2020). Estudio de la variabilidad y diversidad genética en líneas puras de maíz (*Zea mays* L.). *Revista actual de Ciencia y Tecnología Aplicadas*, 39 (38), 31-39.

Boakyewaa Adu, G., Badu-Apraku, B., Akromah, R., Garcia-Oliveira, AL, Awuku, FJ y Gedil, M. (2019). Diversidad genética y estructura poblacional de líneas puras de maíz tropical de maduración temprana usando marcadores SNP. *14 (4)*, e0214810.

Cakmak, I. 2015. Zinc para la Producción Global Sustentable de Cultivos y mejores Dietas Nutricionales.

Dibrova, A., Dibrova, L. y Dibrova, M. (2022) Determinantes del desarrollo del mercado del maíz en Ucrania en el contexto de los desafíos globales.

Duante, C. (2022). Utilización de la nanotecnología En el Desarrollo de Fertilizantes Orgánicos y Pesticidas. *Influence: international journal of science review*, 4(2), 172-178.

Ealia, S. A. M., & Saravanakumar, M. P. (2017, November). A review on the classification, characterisation, synthesis of nanoparticles and their application. In

IOP conference series: materials science and engineering (Vol. 263, No. 3, p. 032019). IOP Publishing.

Elhaj Baddar, Z., & Unrine, J. M. (2018). Functionalized-ZnO-nanoparticle seed treatments to enhance growth and Zn content of wheat (*Triticum aestivum*) seedlings. *Journal of agricultural and food chemistry*, 66(46), 12166-12178.

Espejel García, A., Jauregui García, C. Z., & Hernández Montes, A. (2020). Caracterización, innovación y competitividad de la producción de elotes en el Estado de Jalisco, México. *Económicas CUC*, 41(2), 49-64.

Estrada Urbina, J. (2019). Influencia de las nanopartículas de óxido de zinc sobre la calidad fisiológica y sanitaria de la semilla de maíz nativo (*Zea mays* L.) (Bachelor's thesis, Universidad Autónoma de Guerrero (México)).

Faizan, M., Hayat, S., & Pichtel, J. (2020). Effects of zinc oxide nanoparticles on crop plants: A perspective analysis. *Sustainable agriculture reviews 41: nanotechnology for plant growth and development*, 83-99.

Falkowski, TB, Chankin, A., Diemont, SA y Pedian, RW (2019). Más que maíz y calorías: una evaluación integral del rendimiento y el contenido nutricional de una milpa maya lacandona tradicional. *Seguridad Alimentaria* 11, 389-404.

Fúnez, P. M., Duaso, A. Á., & Gómez, A. I. H. (2016). Nanotecnología en la industria alimentaria I: aplicaciones/Nanotechnology in the food industry I: applications. *Rev. Complut. Ciencias Vet*, 10, 1.

Gálvez Ranilla, L. (2020). La aplicación de la metabolómica para el estudio del cereal de maíz (*Zea mays* L.). *Metabolitos*, 10 (8), 300.

García-Lara, S., & Serna-Saldivar, SO (2019). Historia y cultura del maíz. *Maíz*, 1-18.

García-López, J. I., Niño-Medina, G., Olivares-Sáenz, E., Lira-Saldivar, R. H., Barriga-Castro, E. D., Vázquez-Alvarado, R., ... & Zavala-García, F. (2019). Foliar application of zinc oxide nanoparticles and zinc sulfate boosts the content of bioactive compounds in habanero peppers. *Plants*, 8(8), 254.

Innalegwu; D., Keyster, M., & Klein, A. (2023). Biogenic zinc oxide nanoparticles: A viable agricultural tool to control plant pathogenic fungi and its potential effects on soil and plants. *Science of the Total Environment*, 165483.

Jabri, H., Saleem, M. H., Rizwan, M., Hussain, I., Usman, K., & Alsafran, M. (2022). Zinc oxide nanoparticles and their biosynthesis: overview. *Life*, 12(4), 594.

Jha, A., Pathania, D., Damathia, B., Raizada, P., Rustagi, S., Singh, P., ... & Chaudhary, V. (2023). Panorama of biogenic nano-fertilizers: A road to sustainable agriculture. *Environmental Research*, 116456.

Juárez-Maldonado, A., Ortega-Ortíz, H., Pérez-Labrada, F., Cadenas-Pliego, G., & Benavides-Mendoza, A. (2016). Cu Nanoparticles absorbed on chitosan hydrogels positively alter morphological, production, and quality characteristics of tomato. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 89.

León-Anzueto E., M. Abud-Archila, L. Dendooven, L. M. C. Ventura-Canseco and F. A. Gutiérrez-Miceli (2011). Effect of vermicompost, worm-bed leachate and arbuscular mycorrhizal fungi on lemongrass (*Cymbopogon citratus* (DC) Stapf.) growth and composition of its essential oil. *Electronic Journal of Biotechnology* 14: 1-11.

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

Liu, L., Nian, H., & Lian, T. (2022). Plants and rhizospheric environment: Affected by zinc oxide nanoparticles (ZnO NPs). A review. *Plant Physiology and Biochemistry*, 185, 91-100.

Liu, M., Wang, C., Wang, F. y Xie, Y. (2019). Crecimiento de maíz (*Zea mays*) y absorción de nutrientes después de la mejora integrada de vermicompost y fertilizante de ácido húmico en suelos salinos costeros. *Ecología del Suelo Aplicada*, 142, 147-154.

Liu, S. y Qin, F. (2021). Disección genética de la tolerancia a la sequía del maíz para la mejora de rasgos. *Mejoramiento Molecular*, 41 , 1-13.

López, E. A. T., Sandoval-Rangel, A., Mendoza, A. B., Ortiz, H. O., Pliego, G. C., & de la Fuente, M. C. (2021). Nanopartículas de selenio absorbidas en hidrogeles de quitosán-polivinil alcohol en la producción de pepino injertado. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, (26), 159-169.

López-García, M. D. R., Martínez-Damián, M. Á., & Arana-Coronado, J. J. (2022). Predictors of the price of white corn in Jalisco and Michoacán. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 13(2), 261-272.

López-Vargas, E. R., Ortega-Ortiz, H., Cadenas-Pliego, G., de Alba Romenus, K., Cabrera de la Fuente, M., Benavides-Mendoza, A., & Juárez-Maldonado, A. (2018). Foliar application of copper nanoparticles increases the fruit quality and the content of bioactive compounds in tomatoes. *Applied Sciences*, 8(7), 1020.

Loy, D. D., & Lundy, E. L. (2019). Nutritional properties and feeding value of corn and its coproducts. In *Corn* (pp. 633-659). AACC International Press.

Luna Mena, B. M., Hinojosa Rodríguez, M. A., Ayala Garay, Ó. J., Castillo González, F., & Mejía Contreras, J. A. (2012). Perspectivas de desarrollo de la industria semillera de maíz en México. *Revista fitotecnia mexicana*, 35(1), 1-7.

Marín-Bustamante, M. Q., Hernández-Flores, A., & Cásarez-Santiago, R. G. (2021). Nanotecnología y Agricultura: Detección, Monitoreo y Remediación de Contaminantes. *Revista Salud y Administración*, 8(23), 29-35.

Medina-Méndez, J., Soto-Rocha, JM, Villalobos-González, A., Volke-Haller, VH, & Gómez-Tejero, J. (2019). Productividad de Maíces de Grano Blanco y Amarillo en Campeche, México. *Ciencias Agrícolas*, 10 (09), 1255.

Moneim, D. A., Dawood, M. F., Moursi, Y. S., Farghaly, A. A., Afifi, M., & Sallam, A. (2021). Positive and negative effects of nanoparticles on agricultural crops. *Nanotechnology for Environmental Engineering*, 6(2), 21.

Morales-Meléndez, R., Betancourt-Galindo, R., Juárez-Maldonado, A., Hernández-Pérez, A., González-Fuentes, J. A., Puente-Urbina, B., & Méndez-López, A. (2023). Aplicación de extractos de algas, NP'SZnO y microorganismos sobre la biomasa vegetal en tomate. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 10(2).

Nassarawa, I. S., Li, Z., Xue, L., Li, H., Muhammad, U., Zhu, S., ... & Zhao, T. (2024). Zinc Oxide Nanoparticles and Zinc Sulfate Alleviate Boron Toxicity in Cotton (*Gossypium hirsutum* L.). *Plants*, 13(9), 1184.

Oropeza¹, O. T. D., Alexandre, B. B., & Fidelio, C. R. (2023) análisis del estado del arte de la agricultura de precisión para su aplicación en México analysis of the state of the art of precision agriculture for its application in Mexico. *Ramírez Reynoso, O.,*

Ramírez, M., Borrego, EJ, DeWitt, TJ, Kolomiets, MV y Bernal, JS (2017). La morfología de las plántulas de maíz y los perfiles de hormonas de defensa, pero no la tolerancia a la herbivoría, estuvieron mediados por la domesticación y el mejoramiento moderno. *Anales de Biología aplicada*, 170 (3), 315-332.

Robles, F. C., & Cantú, A. M. (2017). Nanoplaguicidas, ¿un verdadero avance para la agricultura? *Revista Bio Ciencias*, 4(3), 164-178.

Rodríguez-González, V., & Díaz-Cervantes, E. (2024). Potencial de los nanomateriales en la agricultura: retos y oportunidades. *Mundo nano. Revista interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología*, 17(32).

Rossi, L., Fedenia, L. N., Sharifan, H., Ma, X., & Lombardini, L. (2019). Effects of foliar application of zinc sulfate and zinc nanoparticles in coffee (*Coffea arabica* L.) plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 135, 160-166.

Runyang Zhang, Sen Ma, Li Li, Minghui Zhang, Tian Shuangqi, Rey., ... (2021). Aprovechamiento integral de los subproductos del procesamiento del almidón de maíz, 89-107.

Saadony, M. T., Saad, A. M., Soliman, S. M., Salem, H. M., Desoky, E. S. M., Babalghith, A. O., ... & AbuQamar, S. F. (2022). Role of nanoparticles in enhancing

crop tolerance to abiotic stress: A comprehensive review. *Frontiers in plant science*, 13, 946717.

Sánchez, BI, Kallas, Z. y Gil Roig, JM (2017). Preferencia de los agricultores por semillas mejoradas de maíz en Chiapas, México: un enfoque de experimento de elección. *Revista Española de Investigaciones Agrarias*, 15 (3).

Sekhon, RS, Joyner, CN, Ackerman, AJ, McMahan, CS, Cook, DD y Robertson, DJ (2020). La resistencia a la flexión del tallo está fuertemente asociada con la incidencia del alojamiento del tallo del maíz en múltiples entornos. *Investigación de cultivos de campo*, 249, 107737.

Spanos, A., Athanasiou, K., Ioannou, A., Fotopoulos, V., & Krasia-Christoforou, T. (2021). Functionalized magnetic nanomaterials in agricultural applications. *Nanomaterials*, 11(11), 3106.

Stitzer, MC y Ross-Ibarra, J. (2018). Domesticación del maíz e interacción génica. *Nuevo Fitólogo*, 220 (2), 395-408.

Sun, Q., Li, J., & Le, T. (2018). Zinc oxide nanoparticle as a novel class of antifungal agents: current advances and future perspectives. *Journal of agricultural and food chemistry*, 66(43), 11209-11220.

Swarup, S., Cargill, EJ, Crosby, K., Flagel, L., Kniskern, J. y Glenn, KC (2021). La diversidad genética es indispensable para el fitomejoramiento para mejorar los cultivos. *Ciencia de cultivos*, 61 (2), 839-852.

Thounaojam, T. C., Meetei, T. T., Devi, Y. B., Panda, S. K., & Upadhyaya, H. (2021). Zinc oxide nanoparticles (ZnO-NPs): a promising nanoparticle in renovating plant science. *Acta Physiologiae Plantarum*, 43, 1-21.

Usman, M., Farooq, M., Wakeel, A., Nawaz, A., Cheema, S. A., ur Rehman, H., ... & Sanaullah, M. (2020). Nanotechnology in agriculture: Current status, challenges and future opportunities. *Science of the total environment*, 721, 137778.

Vargas-Martinez, G., Betancourt-Galindo, R., Juárez-Maldonado, A., Sandoval-Rangel, MSVA, & López, AM (2023). Impacto de NPsZnO y microorganismos

rizosféricos en el crecimiento y biomasa del tomate. *Agroecosistemas tropicales y subtropicales*, 26, 010.

Vargas-Salgado, M., Portillo-Vázquez, M., Brambila-Paz, JDJ, Martínez-Damián, M. Á., & Medina-Cuellar, SE (2021). Óptimos económicos de fertilizantes en la producción de maíz blanco en Valles Altos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12 (8), 1391-1400.

Vázquez-Núñez, E. (2023). Uso de nanomateriales en la agricultura y sus implicaciones ecológicas y ambientales. *Mundo nano. Revista interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología*, 16(30).

Wang, XP, Li, QQ, Pei, (2018). Efectos de las nanopartículas de óxido de zinc en el crecimiento, las características fotosintéticas y las enzimas antioxidantes en plantas de tomate. *Biol Plant* 62, 801–808.

Wu Q., J. Zhang, X. Liu, T. Chang, Q. Wang, H., Shaghaleh and Y. A. Hamoud (2023) Effects of biochar and vermicompost on microorganisms and enzymatic activities in greenhouse soil. *Frontiers in Environmental Science* 10:1060277.

Yao, H., Liu, Y., Ma, ZF, Zhang, H., Fu, T., Li, Zhang, X. (2019). Análisis de la calidad nutricional del hongo negro cultivado con tallo de maíz. *Revista de Calidad Alimentaria*, 2019, 1-5.

Zhang, H., Wang, R., Chen, Z., Cui, P., Lu, H., Yang, Y., & Zhang, H. (2021). Theeffect of zinc oxide nanoparticles for enhancing rice (*Oryza sativa* L.) yield and quality. *Agriculture*, 11(12), 1247.

8. ANEXOS