TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TORREÓN

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADOS E INVESTIGACIÓN

NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE ZINC PARA BIOFORTIFICAR E INCREMENTAR CALIDAD NUTRIMENTAL EN MAÍZ GRANO

Tesis que presenta:

EUNICE ANAZARETH VIZCARRA GALLEGOS

Como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS EN SUELOS

Director de tesis:

DR. MANUEL FORTIS HERNÁNDEZ

Torreón, Coahuila, México, 2025.

Enero, 2025

Tesis elaborada bajo la dirección del Comité Particular de tesis la cual ha sido aprobada y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS EN SUELOS

COMITÉ PARTICULAR

Director de tesis: _____

Dr. Manuel Fortis Hernández

Co-director de tesis: _____ ASE

Dr. Alberto Sánchez Estrada

Asesor: _____

Dr. Pablo Preciado Rangel

Asesor: _____

M.C Leticia Alfaro Hernández

Torreón, Coahuila, México 2025.

DEDICATORIA

A **mis padres,** por estar en todo momento apoyándome y motivándome a seguir adelante.

A **mis hermanos,** por su apoyo, consejos y que este logro sea una motivación de que cada cosa que se proponen la pueden lograr.

AGRADECIMIENTOS

Agradecida primeramente con **Dios,** por haberme brindado la vida, por darme las fuerzas, la sabiduría, paciencia para poder obtener este grado de estudio.

Al **Consejo Nacional de Humanidades Ciencia y Tecnología (CONAHCYT),** por haberme brindado el apoyo económico, con el cual se pudo llevar a cabo la realización de mis estudios de posgrado.

Al **Instituto Tecnológico de Torreón (ITT),** por abrirme las puertas y darme la oportunidad de realizar mis estudios en la Maestría en Ciencias en Suelo, de igual manera al cuerpo académico que integran este posgrado.

Al **Dr. Manuel Fortis Hernández**, por ser mi director de tesis, quien me dio la oportunidad de formar parte de su equipo de trabajo, por la paciencia, sus enseñanzas, consejos y el apoyo brindado para poder llevar a cabo este trabajo.

A mi comité de asesores el **Dr. Alberto Estrada Sánchez, Dr. Pablo Preciado Rangel** y **M.C. Leticia Alfaro Hernández,** por su colaboración y aportaciones en la realización de la investigación.

A mi amiga y compañera **Jessica,** por acompañarme y ser mi apoyo en este proceso, por hacer mi estancia más amena.

A **Alma, Alexis,** quienes dedicaron de su valioso tiempo en asesorarme y apoyarme en trabajo de campo y laboratorio. A **Yazmin, Lupita, Mary,** por brindarme su amistad y apoyo. A la **Dra. Magdalena Galindo Guzmán,** por ser mi ejemplo a seguir, por apoyarme con las instalaciones y análisis de laboratorio para que se pudiera llevar a cabo la investigación.

ÍNDICE DE CONTENIDO

Pág.

DEDICATORIA ..... **III**

AGRADECIMIENTOS ..... **IV**

ÍNDICE DE CONTENIDO ..... **V**

ÍNDICE DE CUADROS ..... **VIII**

ÍNDICE DE FIGURAS ..... **IX**

RESUMEN ..... **XI**

SUMMARY ..... **XII**

1. INTRODUCCIÓN **1**

1.1 Objetivos 4

1.1.1 General 4

1.1.2 Específicos 4

1.2 Hipótesis 5

2. REVISIÓN DE LITERATURA **6**

2.1 El cultivo de Maíz 6

2.1.1 Etapas fenológicas 6

2.1.2 Condiciones para el cultivo de maíz 8

2.1.3 Producción del maíz 9

2.2 Suelo 12

2.2.1 Propiedades físicas del suelo 13

2.2.2 Componentes del suelo 14

2.2.3 Tipos de suelo 15

2.2.4 Zinc en el suelo 16
2.3 La nutrición de las plantas 17
2.3.1 Macronutrientes y micronutrientes 18
2.3.2 Fertilización foliar 18
2.4 Relevancia del zinc en el maíz 20
2.4.1 Deficiencia del zinc en el maíz 20
2.5 Biofortificación 21
2.5.1 Biofortificación en cultivos 21
2.5.2 Calidad nutricional / bromatológicos de los alimentos 22
2.5.3 Alimentos funcionales 22
2.5.4 Compuestos bioactivos de los alimentos 23
2.6 Actividad enzimática en la planta 24
2.6.1 Enzimas en el maíz 24
2.7 Relevancia del zinc en los seres humanos 25
2.8 Nanotecnología 26
2.8.1 Nanotecnología en la agricultura 26
2.8.2 Nanopartículas en cultivos agrícolas 28
3. MATERIALES Y MÉTODOS 30
3.1 Localización del área de estudio 30
3.2 Características edáficas del sitio experimental 31
3.3 Material vegetativo 32
3.4 Labores culturales 32
3.5 Manejo Integrado de Plagas (MIP) 32
3.6 Tratamientos evaluados 33

3.7 Nanopartículas de óxido de zinc aplicadas 33
3.8 Aplicación de las nanopartículas 34
3.9 Diseño experimental 35
3.10 Variables evaluadas 36
3.10.1 Variables agronómicas y morfológicas del grano de maíz 36
3.10. 2 Calidad nutricional del grano de maíz 39
3.10.3 Compuestos bioactivos en el grano de maíz 46
3.10.4 Actividad enzimática 47
3.10.5 Concentración de zinc 49
3.11 Análisis estadístico 49
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 51
4.1 Variables agronómicas y calidad del grano del maíz 51
4.2 Análisis bromatológicos 52
4.3 Compuestos bioactivos 54
4.4 Actividad enzimática 57
4.5 Concentración de zinc en los granos de maíz 59
5. CONCLUSIONES 62
6. LITERATURA CITADA 57

ÍNDICE DE CUADROS

Pág.

Cuadro 2.1 Etapas de crecimiento en el cultivo del maíz. 7

Cuadro 2.2 Tipos de horizontes diagnóstico de los suelos (Spaargaren., 1999)……15

Cuadro 2.3 Interpretación de resultados de zinc (Zn) de acuerdo a la NOM-021……17

Cuadro 3.1. Características químicas del suelo del sitio experimental CAE-FAZ-UJED (2022). 31

Cuadro 3.2 Tratamientos evaluados 33

Cuadro 4.1 Variables agronómicas de la planta de maíz grano con aplicaciones de NPs de zinc. 51

Cuadro 4.2 Variables de calidad del grano de maíz por efecto de la aplicación de NPs de ZnO 51

Cuadro 4.3 Análisis bromatológico en el grano de maíz, por efecto de la aplicación de las NPs de ZnO..... 54

ÍNDICE DE FIGURAS

Pág.

Figura. 2.1 Proyección de cosecha para los principales productores mundiales de maíz y soya – campaña 2023/24 versus ciclo 2022/202. Elaborado por el Departamento de Economía e Inteligencia de Mercados con datos de FAS - USDA. 10

Figura 2.2 México: Actor clave en el mercado de maíz y principal centro de Desarrollo Tecnológico y Mejoramiento Genético de maíz a Nivel Mundial. (Govaerts *et al*., 2019). 11

Figura 2.2 Estructura típica de la hoja de una dicotiledónea incluyendo los tejidos vasculares de una nervadura (Fernández & Brown, 2013). 19

Figura 2.3 Compuestos bioactivos importantes en el cultivo de maíz (García-Reyes *et al.,* 2022). 23

Figura 2.4 Aplicación de la nanotecnología (NT) en el sector de la agricultura (Lira-Saldivar *et al.,* 2018). 27

Figura 3.1 Ubicación geográfica del campo Agrícola Experimental (CAE-FAZ-UJED) (Fuente: Google Maps). 7

Figura 3.2 Acetato de zinc y NPs ZnO sintetizadas a través de precipitación controlada. 34

Figura 3.3 Aplicación vía foliar de las NPs ZnO en el cultivo de maíz grano en la variedad San Lorenzo. 35

Figura 3.4 Croquis de campo del experimento de maíz grano con aplicaciones de NPs-ZnO. 36

Figura 3.5 Determinación de cenizas en una mufla a temperatura de 550 °C. .. 40

Figura 3.6 Determinación de Fibras Neutras y Fibras Acidas en maíz grano, a través de un digestor marca Labconco. 41

Figura 3.7 Determinación de grasas en grano de maíz a través de un extractor Goldfish..... 43

Figura 3.8 Digestión/mineralización (a), Destilación de Nitrógeno Total (b) y valoración (c) por el método de Kjeldahl en maíz grano. 44

Figura 4.2 Actividad enzimática en el grano de maíz (Polifenoloxidasa (a), catalasa (b), Peroxidasa (c) y Proteína (d)). *Valores con letras distintas indican diferencia significativa de acuerdo con la prueba de Tukey (p≤ 0.05). 58

Figura 4.3 Concentración de Zn en grano de maíz (*Zea mays L*.) por efecto de la aplicación foliar de las nanopartículas de óxido de zinc. PS: Peso seco. Valores con letras distintas indican diferencia significativa de acuerdo con la prueba de Tukey (p≤ 0.05)..... 60

RESUMEN

El maíz es un cultivo esencial con múltiples usos, pero que enfrenta problemas de calidad debido a deficiencias de algunos micronutrientes. Para enfrentar estos problemas, la biofortificación con nanoparticulas (NPs) se presenta como una solución efectiva, especialmente al incrementar el contenido de zinc, un micronutriente clave, las NPs actúan como bioestimulantes o elicitores para mejorar el metabolismo y defensa de las plantas. El objetivo de la presente investigación fue evaluar el efecto de la aplicación foliar de nanoparticulas de óxido de zinc (NPs ZnO), y su efecto en calidad nutrimental y actividad enzimática y la bioacumulación de zinc en maíz grano. Se evaluaron cinco tratamientos (Testigo, 100, 200, 300, 400 mg L^{-1}) bajo un diseño de bloques completamente al azar. Los resultados muestran un impacto positivo en las dosis de 300 y 400 mg L^{-1} en cenizas, fibras detergente neutras y grasa del grano de maíz. La dosis de 100 y 200 mg L^{-1} fue significativamente mayor en flavonoides y capacidad antioxidante. La mayor concentración de contenido de zinc en los granos aumento significativamente en la dosis de 400 mg L^{-1}, esta dosis resultó un aumento significativo del 26% en la cantidad de zinc en comparación con respecto al control con un valor de 102.75 µg g^{-1} PS. La aplicación de NPs ZnO resulta ser una herramienta prometedora para mejorar la biofortificación, ofreciendo un grano más nutritivo que puede contribuir a mayor ingesta de zinc en la dieta humana.

Palabras clave: Bioestimulante, catalasa, grasas, micronutrientes, *Zea Mays L.*

SUMMARY

Corn is an essential crop with multiple uses, but it faces quality problems due to deficiencies of some micronutrients. To address these problems, biofortification with nanoparticles (NPs) is presented as an effective solution, especially by increasing the content of zinc, a key micronutrient, NPs act as biostimulants or elicitors to improve plant metabolism and defense. The objective of this research was to evaluate the effect of foliar application of zinc oxide nanoparticles (ZnO NPs), and their effect on nutritional quality and enzyme activity and zinc bioaccumulation in grain corn. Five treatments (Control, 100, 200, 300, 400 mg $^{L-1}$) were evaluated under a completely randomized block design. The results showed a positive impact of the 300 and 400 mg $^{L-1}$ doses on ash, neutral detergent fibers and fat in corn grain. The doses of 100 and 200 mg $^{L-1}$ were significantly higher in flavonoids and antioxidant capacity. The highest concentration of zinc content in the grains increased significantly at the dose of 400 mg $^{L-1}$, this dose resulted in a significant increase of 26% in the amount of zinc compared to the control with a value of 102.75 µg $^{g-1}$ PS. The application of ZnO NPs turns out to be a promising tool to improve biofortification, offering a more nutritious grain that can contribute to a higher intake of zinc in the human diet.

Key words: Biostimulant, catalase, fats, micronutrients, *Zea Mays L.*

1. INTRODUCCIÓN

El maíz (*Zea mays*) pertenece a la familia de las Poáceas, es una especie de tallo simple, su altura variable desde uno hasta más de tres metros. Este importante cultivo está dentro de los tres cereales básicos debido a que es utilizado para diferentes fines como la alimentación, forraje, energía y apoyo a la producción industrial (Ramazan *et al.*, 2023; Wei *et al.*, 2023).

La composición química y calidad nutricional del grano de maíz varía dependiendo del genotipo, las condiciones edafoclimáticas y manejo del cultivo. En promedio, el maíz contiene alrededor del 10% de proteínas, de las cuales una parte importante se encuentra en el germen. Asimismo, tanto el endospermo como el pedicelo pueden contener hasta un 9% de proteínas (albúminas, globulinas, prolaminas y glutelinas) (Chan-Chan *et al., 2021*).

La población mundial para el año 2050 se estima que se alcanzara los 9.7 millones de habitantes, que demandaran volúmenes más grandes de alimentos de mayor calidad comercial y fitoquímica (Kurniawati *et al*., 2023). Sin embargo, la agricultura en los últimos años se ha estado enfrentando a problemas como el estancamiento en el rendimiento de los cultivos, la baja eficiencia en el uso de

macro y micronutrientes, la disminución de la materia orgánica del suelo, teniendo carencias multinutricionales en los alimentos (Lira-Saldivar *et al.,* 2018).

Estas deficiencias pueden provocar baja producción y rendimiento de cualquier cultivo, así como disminuir su aporte nutricional (Javed *et al.,* 2022). El Zinc es uno de los elementos benéficos tanto para la planta como para el ser humano. El zinc es un mineral esencial para el crecimiento, la función y la expresión genética. Además, juega un papel importante en las enzimas, la fotosíntesis, el desarrollo del polen, la conversión del azúcar, la síntesis de proteínas y la permeabilidad de la membrana. Siendo el cultivo del maíz el tercer cereal más importante a nivel global, es el primero que muestra señales de deficiencias de este micronutriente (Hacisalihoglu, 2020).

La biofortificación con micronutrientes en los cultivos básicos se utilizan como una herramienta para así poder afrontar los problemas de bajos niveles de nutrientes. La biofortificación busca incrementar el contenido de nutrientes en los cultivos, y sea que se incremente mediante técnicas de fertilización, fitomejoramiento tradicional o fitomejoramiento utilizado con la biotecnología (Gaucin-Delgado *et al.,* 2021).

En la agricultura la utilización de la nanotecnología permite generar alternativas para la mejora del suelo y aumentar su fertilidad, así como el aumento de macro y micronutrientes en suelo o en planta (Urquilla, 2023).

Trabajos recientes de nanopartículas han reportado que a bajas concentraciones estas influyen en el crecimiento, sin embargo, a concentraciones altas, se genera una fitotoxicidad (Méndez-Argüello *et al*., 2016). En cultivos como el trigo se utilizaron nanopartículas de óxido de zinc en concentraciones de 40, 80 y 120 ppm con la finalidad de tener rendimientos mejorados, siendo la de 80 ppm la que tuviera un rendimiento de 19.94 g, siendo significativamente mayor al control (4.38 g) (Sheoran *et al*., 2021). En arroz han aplicado nanopartículas de óxido de zinc en concentraciones de 0.3, 0.6, 1.2, 2.4, y 4.8 g de Zn por macetas para evaluar el rendimiento, la acumulación de materia seca, calidad y contenido de Zn del grano, aumentando el contenido del zinc entre un 16.67 y 35.35% (Zhang *et al.,* 2021).

Por lo que el objetivo del presente trabajo fue evaluar la aplicación foliar de diferentes concentraciones de nanopartículas de óxido de zinc (NPs ZnO) sobre la biofortificación, calidad nutrimental y actividad enzimática en maíz grano.

1.1 Objetivos

1.1.1 General

Evaluar el efecto de la aplicación foliar de nanopartículas de óxido de zinc (NPs ZnO), sobre la biofortificación, calidad nutrimental y actividad enzimática en el cultivo de maíz grano.

1.1.2 Específicos

- Evaluar el efecto de las NPs-ZnO en la calidad morfológica del grano de maíz

- Evaluar el efecto de la aplicación foliar de NPs-ZnO, sobre la calidad nutricional, compuestos bioactivos y actividad enzimática de la catalasa, peroxidasa y polifenoloxidasa en los granos de maíz.

- Determinar la concentración de Zn en los granos de maíz.

1.2 Hipótesis

La biofortificación por medio de Nanopartículas de óxido de zinc (NPs ZnO) a concentraciones superiores de los 100 mg L^{-1} incrementaran la calidad de grano y nutricional en los granos de maíz, además de activar el sistema antioxidante enzimático.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 El cultivo de Maíz

El maíz (*Zea mays L.),* perteneciente a la familia de las *Poaceas*. El maíz cultivado es una de las especies más productivas de plantas alimenticias, es uno de los cereales más importantes del mundo. Fisiológicamente es una planta C_4 con un alto índice de fotosíntesis. El maíz se cultiva en una amplia diversidad de ambientes, pudiendo ser desde 58 °N en Canadá a 40 °S en Argentina (García-Lara y Serna-Saldivar, 2019).

Es originario de América, se difundió rápidamente en Europa, Asia y África. El Maíz es uno de los principales alimentos que se consume en el mundo, compuesto por pequeñas cantidades de compuestos bioactivos, los cuales brindan beneficios en la salud. El maíz es uno de los alimentos más populares en América del Norte, su consumo se extiende cada vez más (Siyuan *et al.,* 2018).

2.1.1 Etapas fenológicas

El cultivo del maíz tiene un ciclo de desarrollo el cual consiste en distintas etapas o fases ya establecidas, las cuales van desde la germinación de la semilla hasta la floración y formación del fruto en el cultivo. Este ciclo está comprendido por dos etapas: desarrollo vegetativo y desarrollo reproductivo:

Las etapas de crecimiento se pueden agrupar en cuatro periodos, Cuadro 2.1

- Crecimiento de las plántulas (etapas VE y V1)
- Crecimiento vegetativo (etapas V2, V3… Vn)
- Floración y la fecundación (etapas VT, R0, y R1)
- Llenado de grano y la madurez (etapas R2 a R6)

Cuadro 2.1 Etapas de crecimiento en el cultivo del maíz.

Etapas	DAS	Características
VE	5	El coleoptilo emerge de la superficie del suelo.
V1	9	Es visible el cuello de la primer hoja.
V2	12	Es visible el cuello de la segunda hoja.
Vn		Es visible el cuello de la hoja número “n” (“n” es igual al número definitivo de hojas que tiene la planta; “n” generalmente fluctúa entre 16 y 22, pero para la floración se habrán perdido las 4 a 5 hojas de más abajo.
VT	55	Es completamente visible la última rama de la panícula.
R0	57	Antesis o floración masculina. El polen se comienza a arrojar.
R1	59	Son visibles los estigmas.
R2	71	Etapa de ampolla. Los granos se llenan con un líquido claro y se puede ver el embrión
R3	80	Etapa lechosa. Los granos se llenan con un líquido lechoso blanco.
R4	90	Etapa masosa. Los granos se llenan con una pasta blanca. El embrión tiene aproximadamente la mitad del año del grano.
R5	102	Etapa dentada. La parte superior de los granos se llena con almidón sólido y cuando el genotipo es dentado, los granos adquieren la forma dentada. En los tipos tanto

		cristalinos como dentados es visible una “línea de leche” cuando se observa el grano desde el costado.
R6	112	Madurez fisiológica. Una capa negra es visible en la base del grano. La humedad del grano es generalmente de alrededor del 35%.

Nota: **DAS** números aproximados de días después de la siembra en tierras bajas tropicales, donde las temperaturas máxima y mínima pueden ser de 33 y 22 °C, respectivamente. En los ambientes más fríos, se amplían estos tiempos (Conahcyt,). https://conahcyt.mx/cibiogem/index.php/maiz

2.1.2 Condiciones para el cultivo de maíz

El maíz tiene necesidades de agua que cambian a lo largo de su cultivo. Durante la germinación, requiere menos agua, pero una humedad constante. Durante el crecimiento vegetativo, necesita más agua, mientras que la fase de floración es crítica debido a que afecta al desarrollo, polinización y llenado de los granos, lo cual influye en el rendimiento de las plantas. Además, el maíz se adapta fácilmente a diferentes tipos de suelo (Kato *et al*., 2009).

De acuerdo a estudios ya realizados, para lograr una cosecha con un grano de maíz de madurez media, se necesitan entre 500 y 800 mL de agua, considerando que es el grano con mejor rendimiento (Zamora-Salgado, 2011).

La calidad nutritiva del maíz como alimento, está determinada principalmente por la composición de aminoácidos de sus proteínas. Entre los aminoácidos esenciales y limitantes del maíz está el triptófano (Vázquez *et al*., 2012). Si bien no existen valores absolutos de lisina o triptófano que definan a un maíz con calidad proteínica, Twumasi-Afiyie *et al.* (2016) sugirieron que maíces con más de 0.075% de triptófano en muestras de grano entero, puede ser considerado con calidad de proteína (Broa-Roja *et al*., 2019).

2.1.3 Producción del maíz

Nivel mundial

Se prevé que la producción mundial de maíz aumentará en 193 Mt y alcanzará los 1315 Mt en la próxima década (OECD/FAO, 2022). Los mayores incrementos se espera que sucedan en China, Estados Unidos, Brasil, Argentina y Ucrania. En el caso de China (Figura 2.1), se proyecta que el crecimiento en la producción de maíz será más lento (2.1% al año), comparado con la década anterior (3.1% al año), debido a cambios en las políticas públicas implementadas en 2016, que eliminaron el apoyo al precio del maíz y su programa de almacenamiento de reservas asociado.

Estos instrumentos fueron reemplazados por subsidios directos a las granjas y compras orientadas al mercado. Como resultado, en el corto plazo, las áreas de siembra en China cambiarán del maíz a otros cultivos, como la soya y el trigo, aunque podrían volver nuevamente al maíz en unos pocos años, a medida que las reservas disminuyan a niveles más sostenibles. En Estados Unidos, se espera que la superficie de siembra de maíz se mantenga estable y que los aumentos en la producción se deban principalmente a un mayor rendimiento.

El incremento en la producción de Brasil y Argentina se sustentará en superficies de siembra ligeramente más grandes y un aumento en la productividad, impulsado por políticas internas favorables (por ejemplo, préstamos con tasas preferenciales) y la depreciación de las respectivas monedas. La producción de Ucrania se mantendrá gracias al cultivo de variedades nacionales de alto rendimiento, producidas en sistemas de secano (OECD/FAO, 2022).

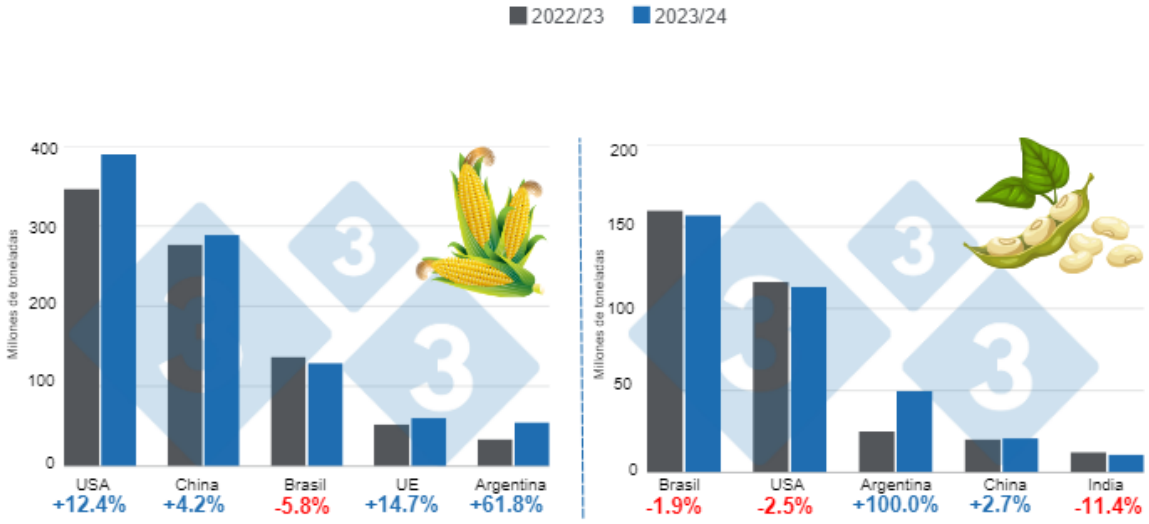

Figura. 2.1 Proyección de cosecha para los principales productores mundiales de maíz y soya – campaña 2023/24 versus ciclo 2022/202. Elaborado por el Departamento de Economía e Inteligencia de Mercados con datos de FAS - USDA.

Nivel nacional

De acuerdo a las previsiones que se dieron en el año 2023, se espera que la producción nacional de maíz sea de 28.4 millones de toneladas, divididas en 23.3 millones de toneladas de maíz blanco y 5.1 millones de toneladas de maíz amarillo. Aunque la producción total no aumentará más del 15%, la producción de maíz amarillo experimentará un incremento del 51%. Sin embargo, en términos absolutos, la proporción de maíz amarillo y maíz blanco seguirá siendo la misma en relación al total. En 2015, el 86% de la producción fue de maíz blanco y el 14% fue de maíz amarillo, mientras que para el año 2030 se prevé que el 84% sea de maíz blanco y el 16% sea de maíz amarillo (Govaerts *et al*., 2019) (Figura 2.2).

Figura 2.2 México: Actor clave en el mercado de maíz y principal centro de Desarrollo Tecnológico y Mejoramiento Genético de maíz a Nivel Mundial. (Govaerts *et al*., 2019).

Los **principales Estados productores** son Sinaloa (22%), Jalisco (14%), México (8%), Michoacán (7%), Guanajuato (6%), Guerrero (5%), Veracruz (5%), Chiapas (5%), Chihuahua (4%), Puebla (4%) y el resto de los Estados representan el (20%) restante.

En México la superficie sembrada en el 2022 fue de 6 904 042 ha con un rendimiento de 3.9 toneladas por hectárea y específicamente en la Comarca

Lagunera se estableció una superficie de 112 904 ha, con una producción de 3.9 y 1.08 toneladas por hectárea, para los estados de Durango y Coahuila, respectivamente (SIAP, 2022).

2.2 Suelo

Se le considera suelo a la capa superior de la corteza terrestre, es formado por el desgaste natural de las piedras y por la descomposición de restos orgánicos, lo que conocemos como humus. El tiempo es un factor importante en la formación del suelo ya que puede tardar millones de años para formarse, en san solo un año se forman 0.1 mm de suelo nuevo (Porta-Casanellas, 2014).

La formación y evolución del suelo dependen tanto de factores bióticos como abióticos. El suelo es una mezcla de minerales, bacterias, materia orgánica, agua y aire. Una composición idónea del suelo es 45 % minerales (estos son derivados de la roca), 25 % de aire, 25 % de agua y 5 % de materia orgánica. El proceso de formación de suelo se debe a la constante influencia de cinco factores principales que son el clima, organismos vivos, el relieve, el tiempo, y el material parental o roca madre (Montaño-Arias *et al.,* 2018).

Los suelos del Norte de México son zonas áridas y semiáridas, estos suelos tienen características de baja fertilidad para la agricultura, escaso y lento desarrollo, debido a que son bajos en materia orgánica, con textura arenosa y pedregosa, tienen contenido de sales solubles, tienen poca disponibilidad de intercambio catiónico y baja capacidad de retención de humedad (Ayala-Niño *et al.,* 2018).

2.2.1 Propiedades físicas del suelo

Textura

La distribución respectiva de los tamaños de partículas en la muestra de suelo se define como textura del suelo, clasificando las partículas en arena, limo y arcilla según su tamaño. Esta textura del suelo impacta en aspectos como la presencia de poros, la tasa de descomposición de la materia orgánica, la solidez, la capacidad de intercambio catiónico, la percolación, los nutrientes y la retención de agua (Javed *et al*., 2022).

Fertilidad

El suelo tiene la disposición para dar las sustancias necesarias en cantidades correctas que la planta necesite. Un suelo fértil contendrá todos los nutrientes necesarios para un cultivo, es decir tendrá tanto macronutrientes como micronutrientes. La fertilidad tiene una importancia en la productividad del suelo.

pH

Se utiliza una escala de pH de 0 a 14 para analizar las reacciones y procesos del suelo, determinando su acidez o alcalinidad. Un pH de 7 se considera neutro, por debajo de 7 es ácido y por encima de 7 es alcalino.

Permeabilidad

La permeabilidad se refiere a la capacidad del suelo de retener agua en contra de la gravedad, también puede ser llamada la cantidad de agua atrapada en los poros del suelo, luego de que el agua gravitacional se filtre hacia capas más abajo.

Estructura

La estructura del suelo se ve determinada por los grupos estables de partículas del suelo, conocidos como agregados, los cuales están fuertemente unidos entre sí. Estos agregados pueden unirse con otros para formar agrupaciones más grandes, denominadas peds.

Salinidad

La composición de los suelos difiere según la cantidad de sales solubles acumuladas presentes en ellos. Este fenómeno puede ocurrir de manera natural o como resultado de acciones humanas.

Porosidad

La porosidad se refiere a la cantidad de espacios porosos en el suelo, que se clasifica en macro y microporos. Los suelos de textura fina suelen tener un alto porcentaje de porosidad, con una mayor proporción de microporos, lo que favorece la retención de humedad en comparación con los suelos arenosos.

2.2.2 Componentes del suelo

Hans Jenny en 1941 mencionó en su libro “Factors of Soil Formation: A System of Quantitative Pedology” que la formación del suelo está influenciada por cinco factores independientes, pero que interactúan entre ellos para generar suelo. Estos factores incluyen: la materia prima o roca madre, el clima, el relieve o topografía, la biota (organismos) y el tiempo.

2.2.3 Tipos de suelo

La clasificación más ampliamente utilizada a nivel mundial es la Soil Taxonomy de la USDA (*United States Departament of Agriculture*), que se centra en los horizontes diagnósticos de los suelos y distingue 12 órdenes con subórdenes y series específicas (Spaargaren., 1999) (Cuadro 2.2).

Cuadro 2.2 Tipos de horizontes diagnóstico de los suelos (Spaargaren., 1999).

Tipos horizontes diagnósticos	Descripción
Alfisol	Están en climas húmedos y se caracterizan por su fertilidad, por lo que son suelos con un gran desarrollo de la agricultura y la silvicultura. Tienen horizontes formados por arcilla.
Andisol	Se formaron luego de erupciones volcánicas y la característica que los diferencia de otros suelos es que están compuestos por minerales como imogolita y ferrihidrita.
Aridisol	Están en climas áridos o semiáridos en ecosistemas como desiertos. Se caracterizan por la baja presencia de materia orgánica y vegetación debido a las pocas precipitaciones que reciben.
Entisol	Están en zonas secas y frías y su principal característica es que no tienen horizontes desarrollados.
Espodosol	Están en zonas de clima frío y húmedo y se caracterizan por su baja fertilidad, por tener un color rojizo y ser suelos ácidos.
Gelisol	Están en climas fríos, por lo que son suelos helados y que contienen permafrost. Se suelen encontrar en zonas de alta montaña o en el Ártico.

Histosol	Están en zonas frías y pantanosas y están constituidos principalmente por materia orgánica.
Inceptisol	Están presentes en muchas zonas del planeta, ya que son un tipo de suelo muy común. Se caracterizan por ser suelos jóvenes y con poco desarrollo de horizontes.
Molisol	Están en zonas semihúmedas de pastizales y se caracterizan por su color oscuro y su fertilidad, lo que los convierte en suelos adecuados para las prácticas agrícolas.
Oxisol	Están en zonas tropicales y se caracterizan por su color naranja o rojo y por la presencia de minerales oxidados (de allí su nombre).
Ultisol	Están en zonas húmedas y cálidas y se caracterizan por su color rojizo, por tener arcilla en sus horizontes y por un nivel bajo de algunos nutrientes.
Vertisol	Están en zonas tropicales o mediterráneas y se caracterizan por una gran presencia de arcilla en su composición y por grietas que dificultan las prácticas agrícolas.

2.2.4 Zinc en el suelo

Se ha podido comprobar que más del 50 % de los suelos presentan una deficiencia de Zinc, mientras que solo una pequeña proporción cuenta con niveles suficientes o altos para garantizar una nutrición adecuada de los cultivos. Sin embargo, muchos cultivos como el maíz y el sorgo, que son exigentes en Zinc y buscan altos rendimientos, requieren de la adición de Zinc al suelo o de forma foliar, a pesar de que el nivel de Zinc en el suelo sea considerado aceptable (INTAGRI, 2015).

La situación del Zinc en muchos suelos mexicanos se encuentra en niveles intermedios o bajos, lo que puede ocasionar deficiencias en los cultivos sin que se presenten signos evidentes. Esto puede llevar a una reducción de hasta el 20% en los rendimientos (Boonchuay *et al.,* 2013).

Cuadro 2.3 Interpretación de resultados de zinc (Zn) de acuerdo a la NOM-021.

Clase	**Zn**
	mg kg^{-1}
Deficiente	< 0.5
Marginal	0.5 – 1.0
Adecuado	>1.0

2.3 La nutrición de las plantas

La nutrición de las plantas es esencial para su desarrollo y funcionamiento, por lo tanto, se investigan los elementos minerales presentes en ellas, en los suelos y en los ecosistemas para garantizar la seguridad alimentaria de una población en expansión (Horst, 2017).

Para que los cultivos crezcan de forma adecuada, se requiere que cuenten con los nutrientes básicos y esenciales en cantidades adecuadas y equilibradas. En caso de que falte o haya un exceso de algún nutriente, las plantas mostrarán señales de desnutrición que impactarán negativamente en su crecimiento y desarrollo (PROAIN, 2021).

2.3.1 Macronutrientes y micronutrientes

Los nutrientes esenciales para las plantas se dividen en macronutrientes, que son necesarios en grandes cantidades, como el nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre (S) y micronutrientes, como el boro (Br), cloro (Cl), cobalto (Co), cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn), molibdeno (Mo) y zinc (Zn), que son necesarios en cantidades mínimas. Es fundamental que las plantas reciban una correcta cantidad de todos estos elementos para un crecimiento adecuado (PROAIN, 2020).

2.3.2 Fertilización foliar

La fertilización foliar es una herramienta importante utilizada para lograr un manejo sostenible y productivo de los cultivos. Se considera más amigable con el ambiente que la aplicación de nutrientes por vía radicular, ya que la aplicación foliar va aplicada directamente al tejido vegetal durante las etapas del crecimiento, de esta manera los nutrientes quedan más asimilables para la planta (Fernández *et al.,* 2015).

Los procesos mediante los cuales una solución de nutrientes que se aplica al follaje de un cultivo es asimilada por las plantas incluyen: contacto con la hoja y adsorción a la superficie de la misma, penetración cuticular/estomática/a través de otras estructuras epidérmicas, absorción celular y penetración en los compartimentos celulares metabólicamente activos en la hoja, y finalmente, en su caso, la translocación y la utilización de los nutrientes absorbidos por la planta (Fernández *et al.,* 2015).

Figura 2.2 Estructura típica de la hoja de una dicotiledónea incluyendo los tejidos vasculares de una nervadura (Fernández y Brown, 2013).

El corte trasversal de una hoja típica de una angiosperma consta de una cutícula que cubre la parte superior e inferior de las células epidérmicas, las que encierran el mesófilo tal como se ilustra en la Figura 2.2. Las hojas de distintas especies difieren en su estructura, pero en general consisten en un parénquima en empalizada cerca de la epidermis superior y parénquima esponjoso en la parte inferior (también conocido como mesófilo esponjoso) (Fernández *et al.,* 2015).

Las NPs pulverizadas a través de la vía foliar tienen la capacidad de ingresar a las hojas por las estomas, la endocitosis y la absorción directa, sin embargo, el tamaño de las partículas desempeña un papel crucial en la absorción de las hojas. La cera y la pared celular de la hoja pueden dificultar la absorción de las NPs, una

vez absorbidas, la mayoría se acumulan en las vacuolas. La absorción y el transporte se ven afectados por múltiples factores, siendo los más importantes las características de la planta (estructura de hojas, composición del tejido vegetal), las propiedades físicas de las NPs (por su tamaño, estructura, pureza) y las condiciones ambientales como la luz, temperatura y humedad (Hong *et al.,* 2021).

2.4 Relevancia del zinc en el maíz

De acuerdo a investigaciones realizadas el zinc es uno de los elementos utilizado en el cultivo del maíz, es un micronutriente esencial para el crecimiento y desarrollo de la planta, al llevar acabo aplicaciones foliares de zinc se ha aumentado su rendimiento (Sacón *et al.,* 2018). La importancia del zinc para las plantas está relacionada con su capacidad de actuar como estabilizador de la estructura de las proteínas o como un cofactor (ión inorgánico) necesario para la activación de las enzimas involucradas en diferentes procesos metabólicos.

2.4.1 Deficiencia del zinc en el maíz

La deficiencia de Zn en maíz frecuentemente aparece en las primeras semanas del cultivo. Se puede manifestar como fajas de color amarillento entre nervaduras de la lámina foliar. Los síntomas generalmente pueden aparecer en la segunda o tercera semana del ciclo y se caracterizan por su corta duración. Solo en algunas situaciones, en lotes de suelos arenosos se ha presenciado que los síntomas de deficiencia de zinc persisten hasta la floración. La aplicación foliar de Zn a controlado en todas las situaciones los problemas de deficiencia (Ratto y Miguez, 2006).

2.5 Biofortificación

La biofortificación se le conoce como el proceso en el cual se aumenta el valor nutricional dentro de los cultivos alimentarios (Preciado-Ranfel *et al.,* 2022). La biofortificación es una solución que se necesita para resolver problemas de la malnutrición de micronutrientes. La biofortificación ha existido desde la economía verde. Actualmente más de 20 millones de personas consumen alimentos biofortificados (Lockyer, y Buttriss, 2018).

2.5.1 Biofortificación en cultivos

Los micronutrientes tales como hierro (Fe), zinc (Zn), selenio (Se), yodo (I), carotenoides y folatos son nutrientes esenciales para el crecimiento y desarrollo humano, ya que desempeñan un papel importante en funciones metabólicas en humanos (Jha & Warkentin, 2020). La biofortificación no solo presenta beneficios para los seres humanos al consumirlas, sino también para las plantas, ya que los cultivos biofortificados aumentan su contenido de micronutrientes mejorando su calidad nutricional, aumentando su rendimiento, resistencia a estrés abiótico (resisten a sequias, salinidad, a temperaturas extremas), suelen ser más resistentes a plagas y enfermedades (INTAGRI, 2018).

De acuerdo a Jha y Warkentin (2020), la biofortificación se lleva a cabo mediante diferentes intervenciones

- **Intervención agronómica:** Se realiza mediante la aplicación de fertilizantes minerales al suelo (sustancias inorgánicas que contienen minerales esenciales), fertilización foliar e inoculación del suelo microorganismos benéficos (rizobios, hongos micorrizicos).

- **Ingeniería genética:** Este método es utilizado cuando no se encuentra variación en los rasgos deseados de forma natural en el germoplasma disponible, cuando un micronutriente específico no está presente de forma natural en los cultivos, o cuando el mejoramiento convencional no permite alcanzar las modificaciones necesarias como es el caso de los cultivos transgénicos.
- **Mejoramiento vegetal:** Métodos utilizados para desarrollar nuevas variedades de plantas, con ciertas características deseables. Estos métodos mejoran el rendimiento, la resistencia a enfermedades, la adaptación a un ambiente en específico.

2.5.2 Calidad nutricional / bromatológicos de los alimentos

La demanda de alimentos nutritivos y seguros está creciendo en todo el mundo, y una ingesta equilibrada de alimentos es la forma correcta de prevenir o incluso remediar problemas de salud, como la obesidad, diabetes, desnutrición, cardiopatías y otros, que en gran medida se origina a partir de errores dietéticos. Mediante análisis específicos se puede determinar la composición exacta del alimento, sabiendo así su contenido en macronutrientes (hidratos de carbono y azúcares, grasas y ácidos grasos, proteínas, y fibra soluble e insoluble), micronutrientes (vitaminas y minerales) y otras sustancias como polifenoles, fructooligosacáridos, bacterias probióticas, (Márquez-Villacorta y Prettel-Vásquez, 2018).

2.5.3 Alimentos funcionales

Se les conoce como alimentos funcionales a aquellos que aportan nutrientes básicos y que cuentan ya sea con uno o más elementos diferenciados que mejoran las funciones fisiológicas de quien lo consuma. El avance de estos

alimentos se logra gracias a la incorporación de estos elementos o compuestos bioactivos. Esta incorporación puede ser natural, modificada o mejorada con el objetivo de promover beneficio para la salud (Arias *et al.,* 2018).

2.5.4 Compuestos bioactivos de los alimentos

Los nutracéuticos son compuestos bioactivos de origen natural que se usan como complementos en la dieta, se puede usar para beneficios de la salud o complemento de algunos fármacos (Meléndez-Sosa *et al*., 2020). Estas sustancias químicas o biológicas pueden encontrarse de forma natural o adicionarse, los nutracéuticos son los componentes de los alimentos que disminuyen o evitan cierta enfermedad en las personas (Valenzuela *et al*., 2014).

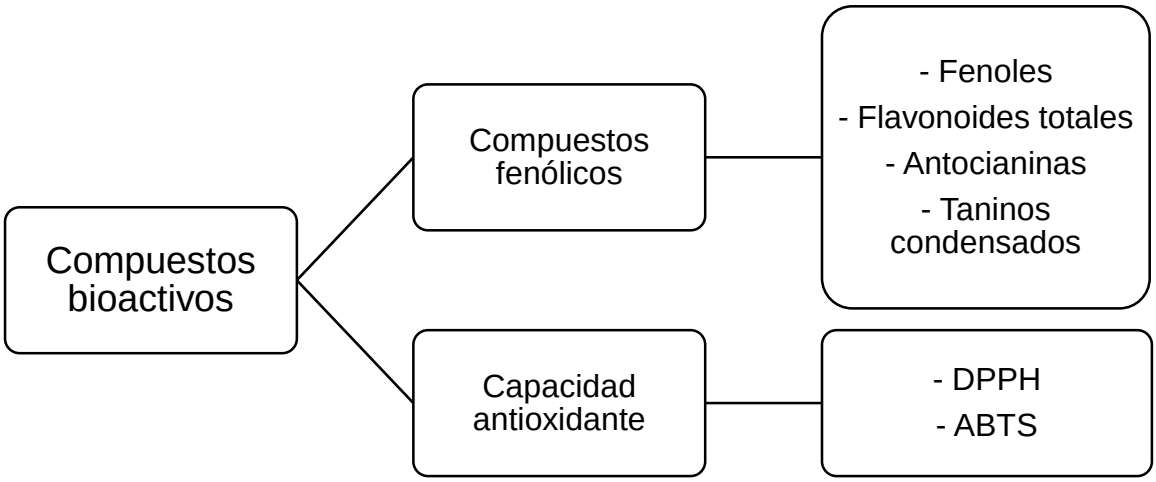

Figura 2.3 Compuestos bioactivos importantes en el cultivo de maíz (García-Reyes *et al.,* 2022).

2.6 Actividad enzimática en la planta

Debido a que las enzimas son proteínas, por su estructura pueden ser fácilmente desnaturalizadas por calor, acidez, alcalinidad, por sustancias oxidativas y por un amplio rango de diferentes procesos. la estabilidad por lo tanto es una de las más importantes características que debe reunir una enzima para ser utilizada en la industria.

Las plantas presentan un sistema de protección de componentes antioxidantes enzimáticos como catalasas (CAT), peroxidasas (POD), superóxido dismutasas (SOD), enzimas del ciclo ascorbato-glutatión como la ascorbato peroxidasa (APX) y la glutatión reductasa (GR), esta gran gama de mecanismos de defensa celular suprime las moléculas reactivas de oxígeno o examinan su exceso antes de causar daños en el metabolismo y la estructura celular (López-Blancas *et al*., 2014).

Fortis-Hernández *et al*. (2024); realizaron una investigación utilizando NPs de ZnO con concentraciones de 10, 20, 30 y 40 mg L^{-1} en el cultivo de Lechuga donde evaluaron las enzimas catalasa y peroxidasa, para la actividad enzimática de la catalasa el tratamiento de 40 mg L^{-1} incrementó la actividad de esta enzima hasta un 46%, respecto al tratamiento control. En la enzima de peroxidasa no se presentaron diferencias estadísticas entre las concentraciones, pero si con el tratamiento control, aumentando su actividad enzimática con nanopartículas.

2.6.1 Enzimas en el maíz

La catalasa es una enzima oxidoreductasa, esta enzima interviene en la degradación del peróxido de hidrogeno (H_2O_2) convirtiéndola en oxígeno y agua,

este compuesto tiene una función protectora contra microorganismos patógenos (Farinango *et al*., 2021).

La enzima peroxidasa es oxidoreductasa, utiliza como donador al (H_2O_2), dentro de esta se puede clasificar en tres grupos, ácidas, neutras y básicas. Tienen la función de catalizar reacciones bisustratos de carácter redox, en donde utilizan el peróxido como oxidante y otro sustrato que tenga características reductoras el cual es oxidado por el peróxido (Ojeda *et al.,* 2020).

Las polifenoloxidasas (PFO) que se encuentran en las plantas son las responsables de las reacciones de pardeamiento enzimático que ocurren durante el almacenamiento, manipulación y procesamiento de frutas y vegetales. Catalizan la hidroxilación de monofenoles a ortodifenoles, posteriormente oxidados a ortoquinonas, las cuales se polimerizan dando lugar a pigmentos que presentan color marrón, rojo o negro, dependiendo de los componentes naturales presentes en los tejidos vegetales (Gasull & Becerra, 2006).

2.7 Relevancia del zinc en los seres humanos

Entre todas las vitaminas y minerales, es el zinc el que causa el efecto más poderoso en nuestro sistema inmunológico. Desempeña un rol fundamental en más de 300 enzimas que mantienen el funcionamiento del metabolismo; es vital para la división, crecimiento y desarrollo de las células. Nuestro organismo no produce zinc, por lo que se debe obtener por medio de una dieta balanceada o mediante suplementos. Las cantidades diarias recomendadas son 5 mg para bebés, 10 mg para niños, 12 mg para mujeres y 15 mg para varones (Barbarán & Vela, 2016).

2.8 Nanotecnología

En 1959 se hace la primera mención sobre la nanotecnología, durante una conferencia impartida por el Dr. Richard Fenynman, en la cual hablo sobre la posibilidad de manipular directamente átomos y moléculas, pero a principios de los años 1970 fue el Dr. Norio Taniguichi el primero en utilizar el término nanotecnología para describir sus investigaciones (Risk, 2015).

La nanotecnología (NT) es definida como el campo de la ciencia que está dedicada al control y manipulación de la materia a escala de átomos y moléculas, en el cual el tamaño se mide en millonésimas de un milímetro (Espinoza., 2011). La materia se mide a escala nanométrica, se ha estudiado esta tecnología mediante resultados de avances científicos y tecnológicos, los cuales se han ido desarrollando en los últimos años. La NT es uno de los desarrollos tecnológicos más importantes del siglo XXI (Saldívar-Tanaka, 2020).

2.8.1 Nanotecnología en la agricultura

Durante los años se ha ido introduciendo la idea de la NT en diferentes disciplinas, dentro de estas ha sido en la agricultura. La nanotecnología ha sido de gran ayuda en la agricultura, poco a poco se ha ido mejorando la producción agrícola teniendo así un aumento de eficiencia en los insumos y minimizando perdida de estos. Los nanomateriales (nm) son más específicos para fertilizantes y pesticidas, siendo estos portadores exclusivos en agroquímicos, los cuales llegan a facilitar la entrega controlada de nutrientes en el sitio, y así los cultivos tienen una mayor protección (Shang *et al*., 2019).

Las nanopartículas NPs es una de las últimas innovaciones tecnológicas que han sido usadas en la agricultura. Las cuales son materiales orgánicos, inorgánicos e híbridos, con al menos dimensiones entre 1 y 100 nm. Las NPs se encuentran en el mundo naturalmente, ya pueden ser obtenidas de procesos fotoquímicos, de erupciones volcánicas, incendios forestales, de plantas, animales e inclusive de microorganismos (Shang *et al.,* 2019).

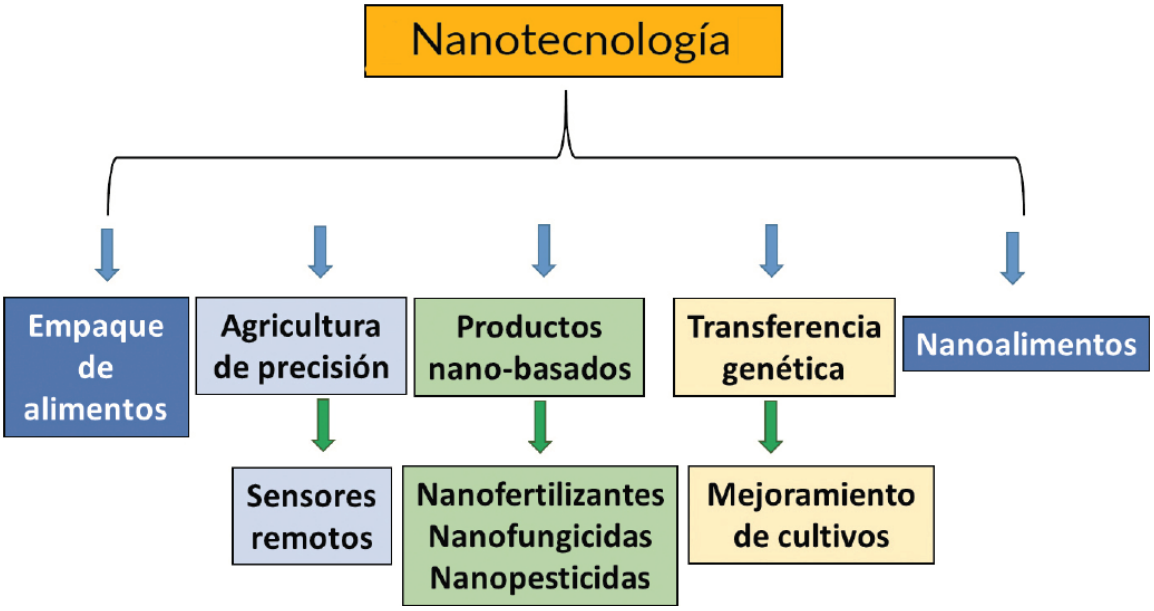

Figura 2.4 Aplicación de la nanotecnología (NT) en el sector de la agricultura (Lira-Saldivar *et al.,* 2018).

Las NPs han sido utilizadas para distintas aplicaciones en la agricultura siendo algunas de ellas como plaguicidas, herbicida, como fertilizante y promotores del crecimiento vegetal (Lira-Saldivar *et al.,* 2018).

2.8.2 Nanopartículas en cultivos agrícolas

Nanopartículas de óxido de zinc (NPs ZnO)

Al realizar una aplicación de zinc en el suelo, así como de forma foliar, los resultados serán igualmente eficientes por lo que habrá un aumento de la concentración de Zn y crecimiento en la planta. La mejora del crecimiento y de la cantidad de Zn en las plantas que son tratadas con nanopartículas de Zinc indican una notable penetración y translocación del Zn dentro de los vegetales, por lo que las partículas más pequeñas, muestran mayor área superficial y buena densidad de carga superficial haciendo que las NPs ZnO sean más reactivas y aumenten su capacidad de absorción por medio de las raíces y las hojas (Umar *et al.,* 2020).

Nanopartículas de cobre (NPs Cu)

Las NPs Cu en la agricultura han sido usadas por tener propiedades antimicrobianas, también presentan funciones en el crecimiento, fotosíntesis y respuestas antioxidantes de algunas hortalizas. En un estudio realizado en melón con una aplicación de nanopartículas de cobre (NPs Cu^{2+}) en forma foliar en una concentración de 9 mg L^{-1}, presenta efectos positivos en el rendimiento y calidad de los frutos, por lo que las condiciones de firmeza y solidos solubles fueron adecuados para canalizarlos al mercado nacional (López *et al.,* 2019).

Nanopartículas de plata (NPs Ag)

Las nanopartículas de plata (NPsAg) son un material que muestra alta capacidad en la eliminación de microorganismos. El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de las NPsAg como auxiliar en la desinfección de ápices de gladiolo y en la desinfección del medio de cultivo. Las NPsAg se aplicaron como auxiliar en la desinfección de explantes, en cuatro concentraciones (25, 50, 100 y

200 mg L^{-1}) y se combinaron con cuatro tiempos de inmersión (5, 10, 15 y 20 min). Por otro lado, las NPsAg se utilizaron en cinco concentraciones (0, 25, 50, 100 y 200 mg L^{-1}), como parte del medio de cultivo para evitar el crecimiento de microorganismos. Con 50 mg L^{-1} de NPsAg se obtuvo el mayor porcentaje de asepsia (91.67 %) y la mejor longitud del brote (28.62 mm). El tiempo de inmersión de 5 a 20 min de los explantes en NPsAg no tuvo efecto en la asepsia de los mismos, pues el resultado fue similar en los cuatro tiempos de inmersión (Chavez-García *et al.,* 2020).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Localización del área de estudio

El experimento se llevó a cabo durante el ciclo agrícola intermedio verano-otoño 2022, en el campo Agrícola Experimental de la Facultad de Agricultura y Zootecnia de la Universidad Juárez del Estado de Durango (CAE-FAZ-UJED). El cual se localiza en el km 35 de la carretera Gómez Palacio-Tlahualilo, en el poblado ejidal Venecia, con coordenadas 25°46’56’’ Latitud Norte y 103°21’02’’ Longitud al oeste (Figura 3.1).

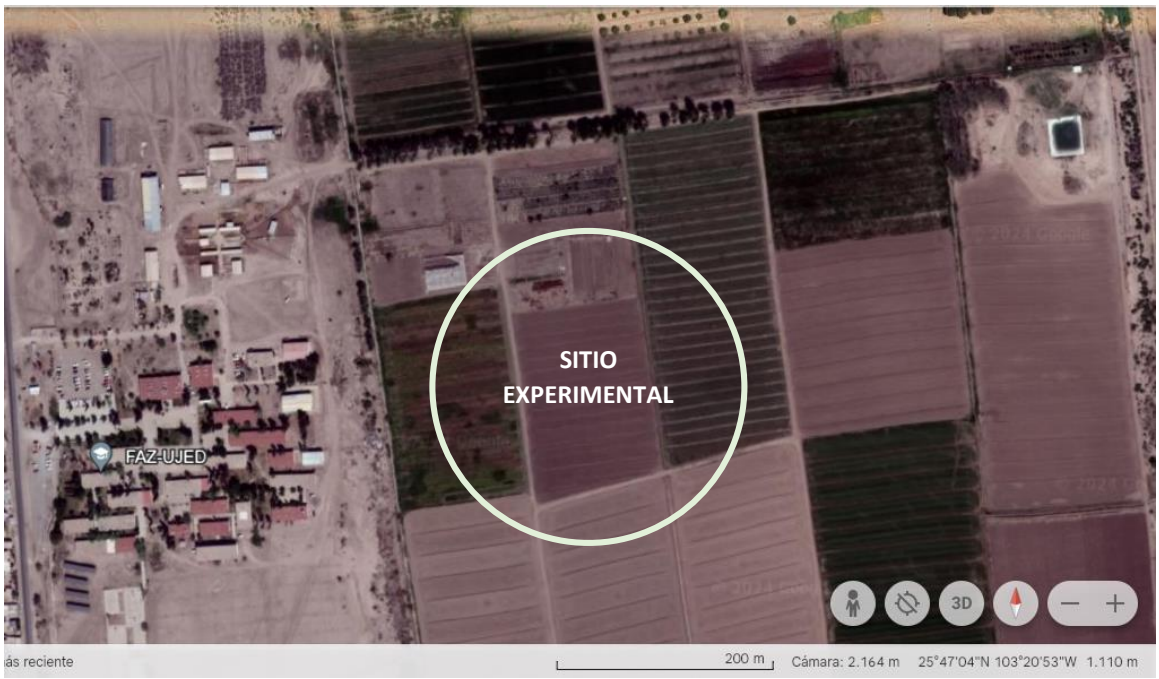

Figura 3.1 Ubicación geográfica del campo Agrícola Experimental (CAE-FAZ-UJED) (Fuente: Google Maps).

3.2 Características edáficas del sitio experimental

Los suelos típicos de la región son de aluvión, tipo Aridisol, con un contenido pobre de materia orgánica (0.9%); pH neutros a poco alcalinos y ricos en carbonatos (Flores-Sánchez *et al.,* 2015). El pH inicial (7.2) es un valor común de los suelos calcáreos de la Comarca Lagunera (Salazar- Sosa *et al.,* 2010). El contenido de zinc en el suelo es de 0.09 mg kg^{-1} y de acuerdo a la NOM-021, es un suelo deficiente en zinc. En el Cuadro 3.1, se observan las características químicas del suelo donde fue establecido el experimento.

Cuadro 3.1. Características químicas del suelo del sitio experimental CAE-FAZ-UJED (2022).

Profundidad	**pH**	**CE**	**MO**	**P**	**NO_3^-**	**Ca**	**Mg**	**Cl**	**HCO_3**	**Zn**
cm		dS m^{-1}	%	----------mg kg^{-1}----------						
0-15	7.75	1.56	1.63	15.70	7.30	6.5	1.78	3.64	2.46	0.09

*pH= reacción del suelo; CE= conductividad eléctrica; MO= materia orgánica; P= fósforo= NO_3= nitratos; Ca= calcio; Mg= magnesio; Cl=cloruros; HCO_3= bicarbonato; Zn= Zinc.

La región se caracteriza por tener un clima seco y semiseco, con una temperatura promedio anual de 24 °C, en la época de verano puede alcanzar temperaturas mayores a los 40 °C. Con lluvias que se presentan en los meses de junio, julio y agosto, teniendo una precipitación media anual de 220 mm (Quiroz-Mercado *et al.,* 2023).

3.3 Material vegetativo

El material vegetativo utilizado para el experimento fue maíz blanco cremoso de la variedad “San Lorenzo”, está variedad presenta notables características agronómicas, muestra alta capacidad de establecimiento en el campo, teniendo plántulas vigorosas, raíces fuertes y profundas (Valenzuela *et al.,* 2001). La variedad fue sembrada en seco, el 15 de julio del 2022 a una distancia de 0.15 m entre plantas y 0.75 m entre surcos, teniendo una densidad de siembra de ±70,000 plantas.

3.4 Labores culturales

Para la preparación del terreno se llevó a cabo un barbecho, posteriormente un rastreo y con la escrepa se eliminaron los terrones para facilitar la preparación de las melgas. Se establecieron melgas de una longitud de 80 m de largo por 12 m de ancho, donde se establecieron 16 surcos con una distancia entre surcos de 0.75 m. Se aplicaron riegos por gravedad durante todo el ciclo del cultivo para sumar una lámina total de 86 cm.

3.5 Manejo Integrado de Plagas (MIP)

Se consideró el manejo Integral de Plagas, se aplicó Malathion (1000-E) para el gusano cogollero (*Helicoverpa armígera*), a los 15 días después del trasplante se hizo la aplicación de 0.5-1 L ha^{-1}. Este insecticida tiene como ingrediente aditivo el Dietil (dimetoxifosfinotioiltio) succinato.

3.6 Tratamientos evaluados

Se evaluaron cuatro tratamientos de NPs-ZnO y un tratamiento control (Cuadro 3.2). Los tratamientos fueron elegidos teniendo como referencia investigaciones ya realizadas en otros cultivos establecidos (Subbaiah *et al.,* 2016; Rivera-Gutiérrez *et al.,* 2021; Azam *et al.,* 2022).

Cuadro 3.2 Tratamientos evaluados

Tratamientos	Descripción
T1	Testigo
T2	100 mg L^{-1} NPs ZnO
T3	200 mg L^{-1} NPs ZnO
T4	300 mg L^{-1} NPs ZnO
T5	400 mg L^{-1} NPs ZnO

3.7 Nanopartículas de óxido de zinc aplicadas

Las NPs-ZnO se sintetizaron siguiendo la metodología de Galindo *et al*. (2022); utilizando acetato de zinc $Zn(CH_3COO)_2$ como precursor (Figura 3.2), la síntesis de estas nanopartículas fue precipitación controlada con Hidróxido de Sodio (NaOH). Las nanopartículas utilizadas fueron de un tamaño entre 67 y 71 nm. Tienen una morfología semiesférica y poligonal y una pureza del 99%.

Figura 3.2 Acetato de zinc y NPs ZnO sintetizadas a través de precipitación controlada.

3.8 Aplicación de las nanopartículas

Las nanopartículas fueron suministradas en aplicaciones foliares, entre las 8:00 y 9:00 am antes de que saliera el sol, se utilizaron rociadores multiusos marca HDX de capacidad de 3.78 L. En los rociadores se colocaron 2 litros de las nanopartículas ya sintetizadas en las distintas concentraciones y se le agrego 2 a 4 mL de surfactante y adherente INEX-A no iónico de la empresa Cosmocel®. Este producto presenta poder de humectación (penetración) y dispersión el cual sirve como coadyuvante y está diseñado para asegurar y mejorar la efectividad de los agroquímicos donde es requerida una humectación y cobertura mayor (Figura 3.3).

Figura 3.3 Aplicación vía foliar de las NPs ZnO en el cultivo de maíz grano en la variedad San Lorenzo.

3.9 Diseño experimental

La evaluación de los tratamientos en campo, se llevó a cabo bajo un diseño de bloques completamente al azar con tres repeticiones. El croquis de campo de los tratamientos evaluados se presenta en la Figura 3.4.

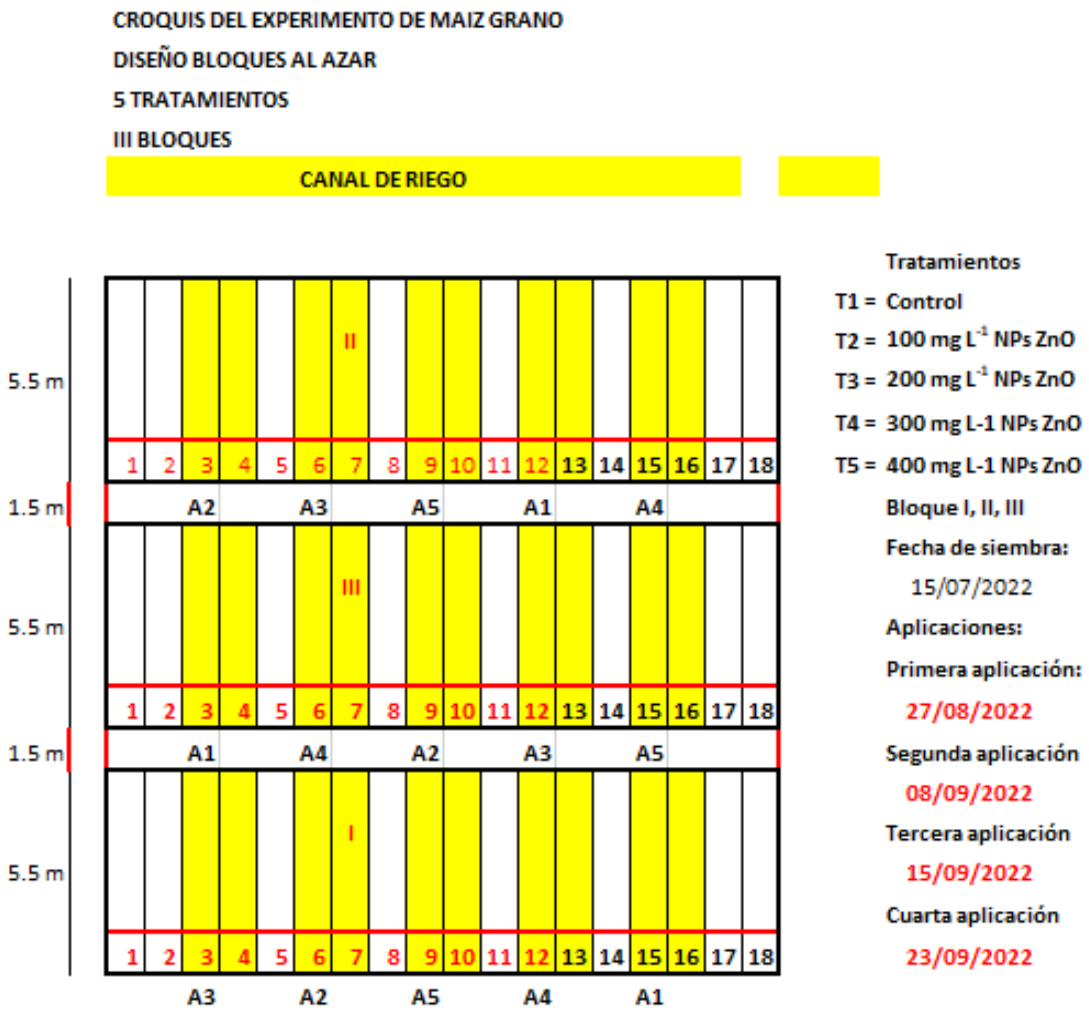

Figura 3.4 Croquis de campo del experimento de maíz grano con aplicaciones de NPs-ZnO.

3.10 Variables evaluadas

3.10.1 Variables agronómicas y morfológicas del grano de maíz

De acuerdo con Borroel-García *et al*. (2018); estas variables son importantes debido a que proporcionan valiosa información sobre la productividad de las

plantas de maíz, las cuales pueden ayudar a investigadores y agricultores a tomar decisiones sobre el manejo y mejoramiento del cultivo.

Altura de planta

Se midió con una cinta métrica la altura de la planta al final del ciclo del cultivo, el cual fue expresado en centímetros.

Diámetro de tallo

El diámetro del tallo se midió con un vernier al final del ciclo del cultivo. El resultado fue reportado en centímetros.

Numero de mazorcas

A los 107 días se llevó a cabo la cosecha de las mazorcas, la cual se realizó cosechando las mazorcas de las plantas que estaban en 3 metros lineales. Posteriormente se determinó el rendimiento de maíz grano por unidad experimental y por hectárea, considerando la separación de los surcos de 0.75 m.

Peso de mazorca y olote

Se seleccionaron al azar dos mazorcas de cada tratamiento, contemplando los bloques como repeticiones, es decir seis mazorcas por tratamiento, las cuales se pesaron utilizando una báscula digital de la marca Balance®. Los resultados se reportaron en gramos.

Se desgranaron manualmente las mazorcas cosechadas, para de esta manera poder determinar el peso del olote utilizando una báscula, los resultados obtenidos fueron reportados en gramos.

Longitud de mazorcas (LM)

Para evaluar la longitud de mazorca se utilizó una cinta métrica y se midieron dos mazorcas por cada tratamiento. El resultado obtenido fue expresado en centímetros.

Diámetro de mazorca (DM) y diámetro de olote (DO)

Se midió con un vernier el diámetro de mazorcas y del olote, reportándose los resultados en centímetros.

Número de hileras (NH)

Número de hileras se evaluó contando las hileras de las mazorcas seleccionadas de cada tratamiento.

Numero de granos por hilera (GH)

Se evaluó contando el número de granos que estaban presentes por hilera de las mazorcas cosechadas por cada uno de los tratamientos evaluados.

Granos totales por mazorca (GTM)

La variable granos totales por mazorca se estimó a partir del número de granos por hilera multiplicado por el número de filas de la mazorca en cada uno de los tratamientos.

Peso de 1000 semillas

El peso de 1000 semillas se obtuvo contando las 1000 semillas de las mazorcas de cada repetición y tratamiento, sé pesó en una báscula digital de la marca Balance®. El resultado obtenido se expresó en gramos.

3.10. 2 Calidad nutricional del grano de maíz

Materia seca

Para materia seca se determinó mediante la evaporación total de la humedad, se secaron 100 gramos de granos de maíz a temperatura ambiente durante 5 días posteriormente se llevaron a un horno estufa de secado marca Memmert® modelo W02WVU, por 24 horas a una temperatura de 70 °C, después se pesó en una balanza analítica y los resultados se expresaron en % utilizando la siguiente formula:

$$\%\, Materia\ seca\ total = \frac{crisol\ con\ muestra\ seca - crisol\ solo}{gramos\ de\ la\ muestra} \times 100$$

Cenizas

Para la determinación de cenizas, se utilizó dos gramos de muestra de materia seca, esta muestra fue molida en un mortero, posteriormente se llevaron a la mufla en crisoles durante 4 horas a una temperatura de 550 °C. Después de este tiempo se dejó enfriar la mufla durante 30 minutos, las muestras fueron pasadas a un desecador dejándolas enfriar durante 15 minutos y se procedió a pesar en una balanza analítica. Se registraron el dato del peso de las muestras (Galicia *et al.,* 2012) (Figura 3.5).

Para determinar los resultados se utilizó la siguiente formula y se expresaron los datos en %:

$$\%\ Cenizas = \frac{crisol\ con\ muestra\ seca - crisol\ solo}{gramos\ de\ la\ muestra} \times 100$$

Figura 3.5 Determinación de cenizas en una mufla a temperatura de 550 °C.

Fibras detergente neutras

Las fibras detergente neutras (SDN, por sus siglas en inglés) fueron llevadas a cabo mediante el método de Van Soest *et al.* (1991). En el cual se utilizó 0.500 gramos de la muestra molida y un digestor de fibra marca Labconco (Figura 3.6) aumentando gradualmente la temperatura de la hornilla en 1 a 5 según la escala del regulador de temperatura, cuando este empieza a hervir se deja 30 minutos y se le agrega 0.5 ml de alfa-amilasa, se procede a dejar enfriar y se filtra en una bomba de vacío agregando 25 ml de acetona, se pone a secar el papel en la estufa a una temperatura de 65 °C durante 24 horas. Los datos obtenidos se expresan en % y se utiliza la siguiente formula:

$$\%\,SDN = \frac{papel\ filtro\ con\ muestra\ seca - papel\ filtro}{gramos\ de\ la\ muestra} \times 100$$

Figura 3.6 Determinación de Fibras Neutras y Fibras Acidas en maíz grano, a través de un digestor marca Labconco.

Fibras detergentes Acidas

El análisis de fibras detergentes acidas (SDA, por sus siglas en inglés) se realizó siguiendo el método de Van Soest & Wine (1968). Se utilizó una muestra molida de 0.500 gramos en un digestor de fibra marca Labconco (Figura 3.6), aumentando gradualmente la temperatura de la hornilla en 1 a 5 según la escala del regulador de temperatura. Una vez que comenzó a hervir, se dejó hervir 30 minutos, después se enfrió, se filtró a través de una bomba de vacío agregando 25 ml de acetona, se puso a secar el papel en la estufa a una temperatura de 65 °C durante 24 horas. Los datos obtenidos se expresan en % y se calculan usando la formula siguiente:

$$\%\,SDA = \frac{papel\ filtro\ con\ muestra\ seca - papel\ filtro}{gramos\ de\ la\ muestra} \times 100$$

Grasas

El contenido de grasa de un alimento se determina mediante el procedimiento 920.39C descrito por la AOAC (1990), utilizando un extractor tipo Goldfish (Figura 3.7) se le agregan de 30 a 40 ml de éter para hacer la extracción de grasas en un vaso con borde esmerilado, el periodo de extracción es de 4 a 5 horas. El porcentaje de grasa bruta se calcula según la siguiente ecuación:

$$\%\,Grasas = \frac{vaso\ con\ muestra\ seca - vaso\ esmerilado}{gramos\ de\ la\ muestra} \times 100$$

Figura 3.7 Determinación de grasas en grano de maíz a través de un extractor Goldfish.

Determinación de Nitrógeno total

La determinación de Nitrógeno se realizó por el método Kjeldahl 1883 (García-Martínez & Fernández-Segovia, 2012). El cual mide el contenido en nitrógeno de una muestra. Este método puede ser dividido, básicamente en 3 etapas: digestión o mineralización, destilación y valoración (Figura 3.8). Los datos obtenidos se presentan en % utilizando la siguiente formula:

$$\%\,N = \frac{(Volumen\ de\ la\ muestra - Volumen\ blanco)N\ ácido\ X\ 14.007\ X100}{mg\ de\ la\ muestra}$$

Figura 3.8 Digestión/mineralización (a), Destilación de Nitrógeno Total (b) y valoración (c) por el método de Kjeldahl en maíz grano.

Proteína

El contenido de proteína se obtuvo multiplicando el resultado obtenido en la determinación de nitrógeno total por un factor ya establecido para alimentos de origen animal o vegetal. En nuestro caso el factor ya establecido es de 6.25. Los datos obtenidos son en % siguiendo la formula siguiente:

$$\%\ Proteina = (\%\ N * 6.25)$$

Carbohidratos totales

Los carbohidratos totales se determinaron utilizando la siguiente formula.

$$\%\ CT = 100 - (PC + Cenizas + E.E.)$$

Dónde: PC: Proteína Cruda

E.E.= Extracto Etéreo

Carbohidratos no estructurales

Los carbohidratos no estructurales (CNE) se determinaron mediante la siguiente formula y son expresados en %:

$$CNE = (CT - FDN)$$

Dónde: CT= Carbohidratos Totales

FDN= Fibra detergente neutra

Los análisis de cenizas, fibras, grasas, nitrógeno y proteínas fueron realizados en el laboratorio de Bromatología en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro-Unidad Laguna.

3.10.3 Compuestos bioactivos en el grano de maíz

Los compuestos bioactivos se realizaron en grano de maíz seco, dichos análisis se realizaron en el laboratorio de química de la Universidad Politécnica de la Región Laguna (UPRL). Ubicada en el Ejido Santa Teresa, San Pedro, Coahuila.

Obtención de extracto para las muestras de compuestos bioactivos

Se mezclaron 1.5 g de muestra fresca en 10 mL de etanol al 80% en tubos de plástico con tapa de rosca, los cuales serán colocados en agitador rotatorio durante 24 h a 20 rpm a 5 °C. Los tubos se centrifugarán a 3 000 rpm durante 5 min, y el sobrenadante fue extraído para su análisis (Salas-Pérez *et al.,* 2016).

Capacidad de antioxidantes

Se utilizó el método $DPPH^+$ (Brand-Williams et al., 1995) para determinar la capacidad antioxidante. Se creó una curva de referencia utilizando Trolox (Aldrich, St. Louis, Missouri, EU), y los resultados se informaron como capacidad antioxidante en miliequivalente de Trolox por gramo de peso fresco (Meq Trolox 100 g^{-1} PF).

Fenoles

El contenido fenólico total fue medido utilizando la técnica de Folin Ciocalteu (Singleton, 1999), a través de la cual se evaluó la cantidad de compuestos fenólicos presentes. Se empleó ácido gálico como sustancia patrón, y a partir de una curva de calibración se determinó el contenido de fenoles, registrando los

resultados en mg de ácido gálico equivalente por g de muestra seca (mg AG g^{-1} PS).

Flavonoides

En el contenido de flavonoides totales se utilizó la técnica descrita por Lamaison y Carnet (1990). Para la cuantificación de la concentración se realizó una curva patrón preparada con quercetina. Los resultados fueron expresados en mg equivalentes de quercetina por g de peso seco (mg g^{-1} PS).

Proteínas

El contenido de proteína soluble en los granos de maíz se analizó de acuerdo con el método Bradford (1976). Para la cuantificación de proteína se realizó una curva de calibración preparada con albumina de suero bovino. Los resultados fueron expresados en g 100 g^{-1} PS.

3.10.4 Actividad enzimática

Obtención de extractos para análisis de la actividad enzimática

Se preparó extracto crudo enzimáticamente activo, el material vegetal se lavó, desinfecto y se secó, luego se cortó y homogeneizo en una licuadora 100 g de material vegetal con 50 mL de buffer fosfatos de potasio al 0.1 M, durante 3 min en intervalos de 30 s. El homogeneizado se conservó a 4° C por 24 h. Se filtró el preparado refrigerado con gasa, para eliminar los residuos vegetales. La parte líquida se centrifugo a 4000 rpm en una centrífuga refrigerada, durante 20 min, a 4° C.

Catalasa

La enzima catalasa se evaluó mediante el método descrito por Luck (1962), usando 3 mL de Tris-HCl (pH 8.5) y 0.1 mL de H_2O_2 al 0.88% en 100 mM de Tris-HCl se colocaron en celdas. La reacción se inicia adicionando 0.1 mL de extracto crudo y se observó el cambio en absorbancia a 240 nm y la actividad enzimática se reportó como U/g de PF, donde U = unidad de actividad enzimática y una unidad igual a la descomposición de 1 umol/min de H_2O_2. Los ensayos fueron realizados a temperatura ambiente (Martinez-Damian *et al.,* 2013).

Peroxidasa

El método utilizado para la enzima peroxidasa se basó en el procedimiento descrito por Pascual *et al* (1983). Este método utiliza guayacol y peróxido de hidrógeno como sustratos. Las condiciones de la prueba consistieron en mezclar 1.0 mL de Tris (HCl) de concentración 0.01 M y pH 7.0, junto con 0.75 mL de guayacol de concentración 100 mM, 0.02 mL de H_2O_2 de concentración 30 mM y 0.1 mL de extracto enzimático.

Las mediciones de absorbancia se llevaron a cabo utilizando un espectrofotómetro UV-visible Jenway® 7305 a una longitud de onda de 470 nm. Las pruebas se realizaron en cubetas de 1 cm de espesor de luz cada 30 y 60 segundos, a temperatura ambiente. Los resultados se expresaron en unidades por gramo de PF.

Polifenoloxidasa

La actividad enzimática de la polifenoloxidasa se evaluó mediante el método propuesto por Lamikanra (1995) en el cual se emplean 3 ml de catecol (60 mM)

disuelto en Buffer Tris-HCl (0.1 M, pH 7.1) y 0.2 mL del sobrenadante, con esta mezcla se evalúa el cambio de absorbancia a 420 nm, tomando las lecturas a los 0, 30 y 60 s. La actividad enzimática es reportada como unidad de actividad enzimática/mg de proteína (U/mg prot), donde una U es igual a la formación de 1 µmol de o-benzoquinona/min.

3.10.5 Concentración de zinc

La concentración de Zn fue analizada en un laboratorio certificado el cual se encuentra en el Instituto Tecnológico de Aguascalientes (ITA). Las muestras fueron digeridas mediante tratamiento térmico empleando ácido nítrico concentrado. La cuantificación de las muestras se realizó por duplicado con un espectrofotómetro de emisión de plasma Thermo Scientific (iCAP7400 Duo) empleando una curva de calibración de Zn. Los resultados se reportaron en µg g^{-1} PS.

3.11 Análisis estadístico

La normalidad y la homogeneidad de las varianzas de los datos obtenidos para cada variable de respuesta se verifico con la prueba de Bartlett y Kolmogorov-Smirnov. Los análisis estadísticos de los datos se realizaron mediante un análisis de varianza utilizando el paquete estadístico Statistical Analysis System 9.0 (SAS, 2004). Cuando se detectaron diferencias entre medias, se realizó la prueba de Tukey al 0.05 de probabilidad. Las variables que se reportan en porcentaje se normalizaron aplicando la transformación de arcoseno y raíz cuadrada.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Variables agronómicas y calidad del grano del maíz

El análisis estadístico para variables agronómicas (número de plantas, número de mazorcas, altura de planta) de las plantas del maíz, no mostraron diferencias significativas, lo cual indica que las aplicaciones foliares de las nanopartículas de ZnO no afectaron estas variables, sin embargo, en las variables de grosor de tallo y peso si se presentó diferencia significativa, siendo 400 mg L^{-1} la concentración en la que se aumenta el grosor del tallo, y con la concentración 200 mg L^{-1} de NPs ZnO se tuvo un mayor peso de mazorca (Cuadro 4.1).

Cuadro 4.1 Variables agronómicas de la planta de maíz grano con aplicaciones de NPs de zinc.

Tratamientos NPs ZnO mg L^{-1}	NM	AP m	Gr tallo cm	PM g
Testigo	7.66 a	2.43 a	2.00 b	945.0 b
100	6.00 a	2.36 a	2.36 ba	943.3 b
200	8.66 a	2.53 a	2.36 ba	1528.0 a
300	5.66 a	2.43 a	2.36 ba	762.3 b
400	8.33 a	2.73 a	2.93 a	1095.3 b

NM= Numero de mazorcas, Gr tallo= Grosor de tallo, PM= Peso de mazorca. *Valores con letras distintas en una misma columna indican diferencia significativa de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

De acuerdo a un trabajo realizado por Sheoran *et al.* (2021) donde evaluaron altura de planta para el cultivo de trigo en las cuales aplicaba concentraciones de Nano-40, Nano-80, Nano-120, zinc químico a granel ($ZnNO_3$) y un control,

obtuvieron diferencias significativas en Nano-80 (66.29), Nano-120 (64.89) en altura de la planta. En el trabajo que se llevó a cabo, no se presentaron diferencias significativas, se considera que el trabajo fue establecido en campo, y no en macetas, por lo tanto, podrían interferir otros factores en el desarrollo. La altura de planta se atribuye a la longitud internodal, es decir los nodos que tiene el tallo de la planta.

Los resultados del análisis estadístico para las variables de calidad del grano de maíz (peso de dos mazorcas, longitud de mazorcas, diámetro de mazorca, número de hileras, granos por hileras, peso del olote y peso de mil semillas) en las mazorcas no muestran diferencias significativas con la aplicación foliar de la nanopartículas de ZnO (Cuadro 4.2). Las unidades experimentales evaluadas fueron estadísticamente iguales, ya que en ninguno de los tratamientos aplicados se presentó un efecto negativo o positivo en la calidad del grano de maíz.

Cuadro 4.2 Variables de calidad del grano de maíz por efecto de la aplicación de NPs de ZnO

Tratamien-tos NPs ZnO mg L^{-1}	**P2M**	**LDM**	**DDM**	**NH**	**GH**	**PDO**	**P1000s**
	g	**--------cm---------**				**--------g--------**	
Testigo	133.00 a*	15.80 a	4.30 a	15.33 a	40.00 a	30.33 a	157.00 a
100	135.00 a	16.56 a	4.36 a	13.33 a	40.66 a	35.33 a	203.00 a
200	107.00 a	15.70 a	4.13 a	14.33 a	37.00 a	26.33 a	185.00 a
300	105.67 a	13.36 a	4.23 a	15.66 a	34.50 a	22.33 a	148.00 a
400	94.33 a	15.63 a	4.30 a	14.33 a	37.66 a	26.33 a	168.00 a

P2M= Peso de 2 mazorcas, LDM= Longitud de mazorca, DDM= Diámetro de mazorca, NH= Numero de hileras, GH= Granos por hileras, PDO= peso del olote,

P1000s= Peso de 1000 semillas. *Valores con letras distintas en una misma columna indican diferencia significativa de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

Borroel-García *et al.,* (2018), evaluó la producción de distintos híbridos de maíz en la Comarca Lagunera en los cuales la fertilización fue de acuerdo a las recomendaciones del INIFAP (2015), es decir 140-60-00, la variable DM no se encontró diferencia significativa, coincidiendo con los resultados obtenidos en nuestro trabajo, aunque la semilla que se utilizó para el experimento fue una variedad, en DM no se presentaron diferencias significativas respecto al control, pero si diferencia numérica entre concentraciones, y esto se puede asumir a que dependerá con la concentración de NPs de ZnO que sean aplicadas (Cervantes-Ortiz *et al.,* 2014).

4.2 Análisis bromatológicos

Los resultados de los análisis bromatológicos (cenizas, fibras detergentes neutras, fibras detergentes ácidas, grasas, nitrógeno total, proteínas) en el grano de maíz, muestran diferencias significativas siendo las concentraciones de 300 mg L^{-1} donde se presenta un incremento respecto al control, mientras que las variables de nitrógeno total y proteína no muestran diferencias significativas con la aplicación foliar de las nanopartículas de ZnO (Cuadro 4.3).

De acuerdo a lo reportado por Urango (2018), los granos de maíz tienen una composición nutritiva de carbohidratos entre 44.8-69.9%, la humedad está en un rango de 11.6-20%, las proteínas oscilan entre 4.5-9.87%, la grasa varía del 2.17

al 4.43%, la fibra esta entre el 2.10 y 26.77% y las cenizas se encuentran entre el 1.10-2.95%.

Los resultados obtenidos en esta investigación con NPs de ZnO son superiores a los reportados por Urango., (2018). Esto quiere decir que las NPs son de beneficio para biofortificar los granos de maíz y tener alimentos con una calidad nutrimental es favorable para el ser humano.

Para los resultados de cenizas, esta se aumentó a medida que se incrementaban las dosis de NPs, estadísticamente la dosis de 300 mg L^{-1} tuvo un incremento del 48% respeto al control. Mientras que para fibras detergente ácidas las concentraciones de NPs fueron estadísticamente iguales, aunque numéricamente la mejor fue la de 200 mg L^{-1} teniendo un incremento numérico del 19% respecto al control.

En el análisis de las grasas se observó una diferencia significativa en los resultados. De manera similar, las Fibras detergentes neutras también mostraron un comportamiento notable ya que conforme aumentaba la concentración de las NPs, se registraba un incremento en sus niveles. La mayor concentración de 400 mg L^{-1} incrementó un 30% la cantidad de grasas respecto al control. Esto resalta la importancia de considerar la concentración de NPs en estudios futuros, dado que podría tener un impacto significativo en la composición nutritiva del grano de maíz.

En Nitrógeno total y proteínas no hubo diferencias significativas, esto coincide con los resultados presentados por Zhang *et al.,* (2021). Realizaron un experimento en macetas con el cultivo de arroz, y donde le atribuyen a que el zinc tiene la capacidad de influir en las enzimas responsables del sabor, facilitando la descomposición del azúcar, las grasas y las proteínas en los cereales como en el caso de arroz. Aunque estadísticamente en las proteínas no hay diferencias,

numéricamente la concentración que más incremento la proteína fue la de 200 mg L^{-1} siendo mayor con respecto al control.

Cuadro 4.3 Análisis bromatológico en el grano de maíz, por efecto de la aplicación de las NPs de ZnO

Tratamientos NPs ZnO mg L^{-1}	Cen	FDN	FDA	Grasas	NT	P
	---------- %----------					
Testigo	4.79 c	29.42 b	19.02 a	9.90 b	1.82 a	11.40 a
100	4.88 c	34.12 a	16.37 c	9.94 b	1.90 a	11.93 a
200	6.78 b	35.12 a	18.14 ba	11.60 ba	2.08 a	13.03 a
300	7.54 a	33.83 a	17.80 ba	11.65 ba	1.81 a	11.35 a
400	7.07 ab	32.96 a	16.91 bc	12.87 a	1.72 a	10.76 a

Cen= Cenizas, FDN= Fibras detergente neutra, FDA= Fibra detergente ácida, NT= Nitrógeno Total, P= Proteína. *Valores con letras distintas indican diferencia significativa de acuerdo con la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).

4.3 Compuestos bioactivos

De acuerdo al análisis estadístico en las variables de compuestos bioactivos (flavonoides, capacidad antioxidantes y fenoles) en grano de maíz, se encontraron diferencias significativas para flavonoides y capacidad antioxidantes destacando las concentraciones de 100 y 200 mg L^{-1}. Para flavonoides presentan un incremento entre el 29 y 31%, respecto al control. Para capacidad antioxidante de 12 a 14% respecto al control, mientras para los fenoles la concentración que más se incremento es la de 400 mg L^{-1} de nanopartículas de ZnO con un aumento del 18% respecto al control (Figura 4.1).

La capacidad antioxidante permite medir la capacidad de los radicales libres y las propiedades reductoras de los compuestos bioactivos que se encuentran

almacenados en los granos de maíz (Martínez-Martínez *et al.,* 2019). Estudios reportados por García-Reyes *et al.,* (2022), hace mención que en maíz pigmentados se tiene mayor actividad antioxidantes, lo cual está relacionado con la cantidad que contenga de compuestos bioactivos (polifenoles, flavonoides y antocianinas) que estén presentes en el grano de maíz.

A pesar de ello, la actividad antioxidante puede verse modificada por las características genéticas de los genotipos o variedades con las que se esté trabajando, además influye el entorno y las condiciones en las cuales está creciendo la planta (Vazquez-Olivo *et al.,* 2017).

El contenido de compuestos fenólicos se asocia con sus propiedades antioxidantes por su capacidad redox, la cual permite desempeñarse como reductor y donante de oxigeno (Chang *et al.,* 2001).

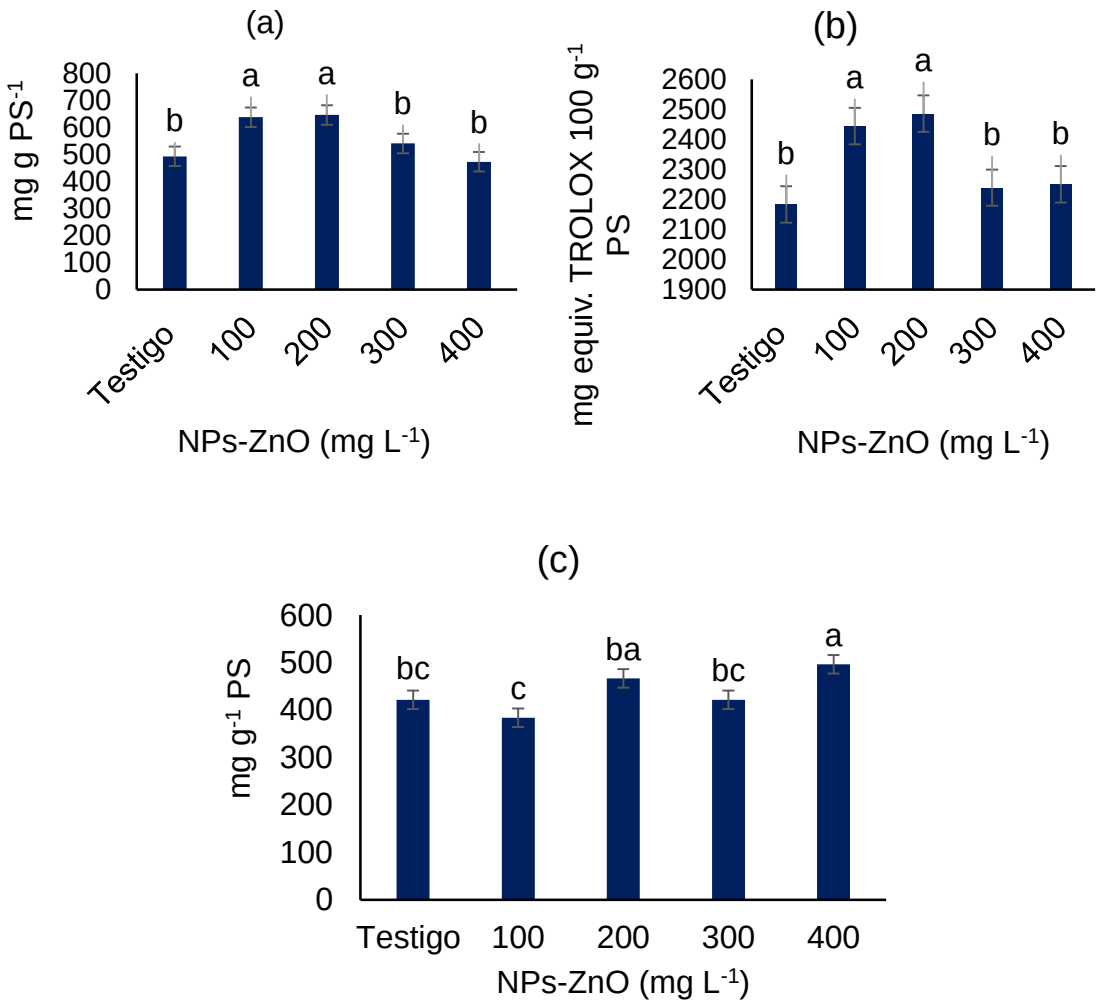

Figura 4.1 Compuestos bioactivos en grano de maíz Flavonoides (a), capacidad antioxidante (b) y fenoles (a). *Valores con letras distintas indican diferencia significativa de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

El zinc puede incrementar los fenoles, debido a que participa en el uso del carbono para producir compuestos fenólicos en el ciclo del ácido shikímico y el acetato-malonato (Misra *et al.,* 2006).

4.4 Actividad enzimática

El análisis estadístico para las variables enzimáticas (polifenoloxidasa, catalasa) muestra diferencia significativa al aplicar las nanopartículas de ZnO de manera foliar, mostrando incremento respecto al control en la cual la concentración de 200 mg L^{-1} aumenta esta actividad enzimática. Mientras que para la peroxidasa la mejor concentración es la de 400 mg L^{-1} y proteínas no muestra diferencia significativa (Figura 4.2). Estas diferencias podrían estar relacionadas con la disponibilidad de Zn^{2+} como cofactor esencial para ciertas enzimas y con los efectos que las NPs tienen sobre el estrés oxidativo en las plantas (Fortis-Hernández *et al.,* 2024).

El zinc es un micronutriente clave que participa en múltiples procesos metabólico (López de Romaña *et al.,* 2010). A concentraciones óptimas, las NPs de ZnO podrían estar proporcionando suficiente cantidad de Zn^{2+} para mejorar la actividad de las enzimas antioxidantes. Esto podría explicar el incremento en la actividad de la polifenoloxidasa y la catalasa a 200 mg L^{-1}, ya que estas enzimas son fundamentales para la eliminación de especies reactivas de oxigeno (ROS), en combinación con las condiciones de estrés o ambiental por la interacción con las NPs de ZnO (Zavaleta-Espejo *et al.,* 2019). Sin embargo, a concentraciones más altas (400 mg L^{-1}), es posible que se produzca un efecto de saturación para estas enzimas o incluso un nivel de estrés adicional que inhibe parcialmente su actividad (Geraldo-León *et al.,* 2022).

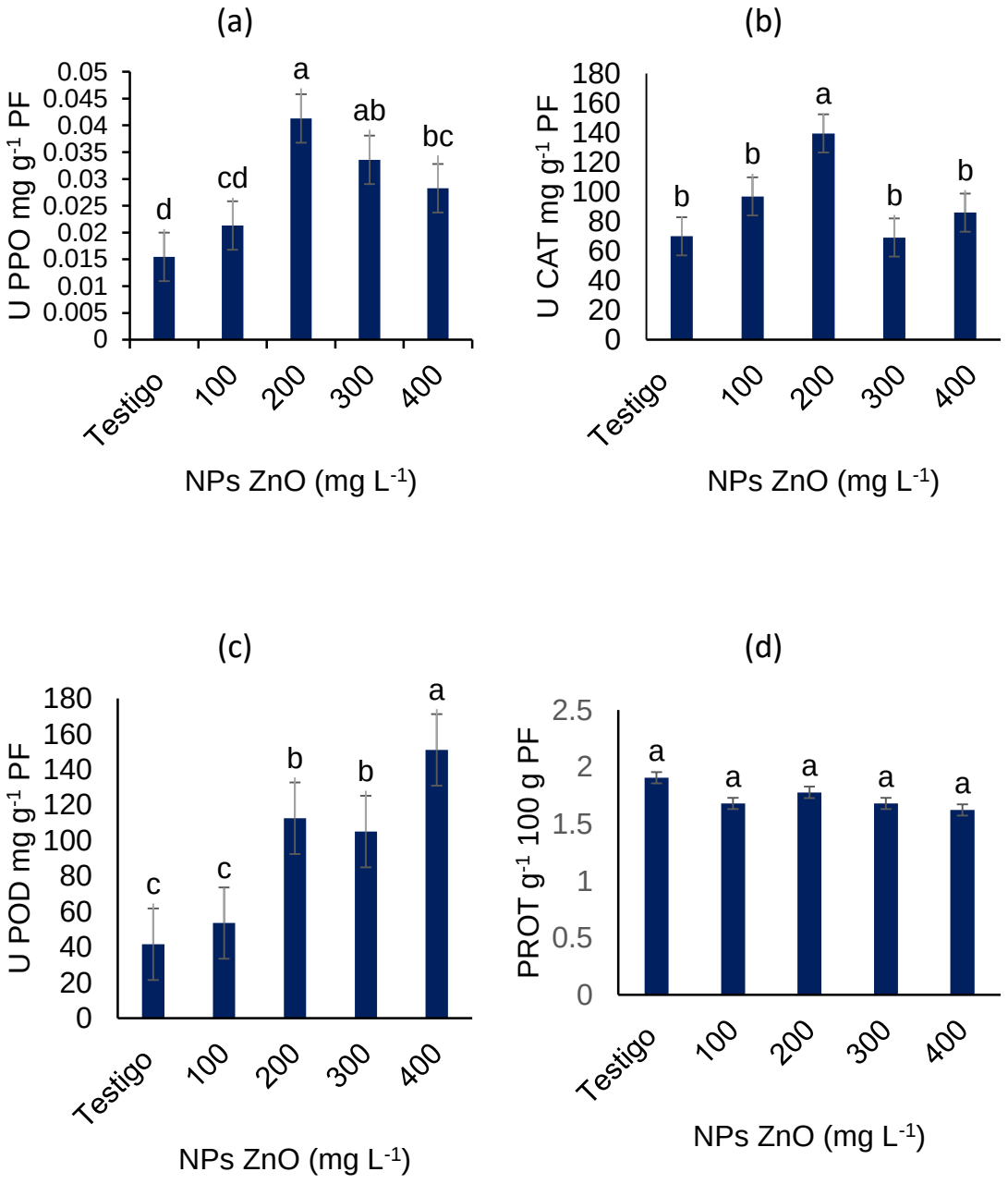

Figura 4.2 Actividad enzimática en el grano de maíz (Polifenoloxidasa (a), catalasa (b), Peroxidasa (c) y Proteína (d)). *Valores con letras distintas indican diferencia significativa de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

Por otro lado, la mayor actividad de la peroxidasa a 400 mg L^{-1} esta enzima responde de manera distinta al aumento de ROS generado por las NPs de ZnO a concentraciones más altas. Es probable que en este caso las NPs actúen como un estímulo que induce la expresión de genes relacionados con esta enzima, ya que la peroxidasa tiene un papel crítico en la descomposición de peróxidos durante el estrés oxidativo (Geraldo-León *et al.,* 2022). Esto podría deberse a una mayor generación de ROS, lo que requiere un sistema antioxidante más atractivo para mantener el equilibrio redox de la célula (Zavaleta-Espejo *et al.,* 2019).

En cuanto a las proteínas, la ausencia de diferencia significativa indica que las NPs de ZnO no influyeron directamente en la síntesis proteica en las condiciones evaluadas. Se podría asumir a que el efecto de las NPs ZnO está más relacionado con la actividad enzimática especifica que con alteraciones generales en el metabolismo del maíz (Dimkpa *et al.,* 2015). Las NPs de ZnO en cultivos de cereales como el maíz, tiene un alto potencial para mejorar el rendimiento y la resistencia al estrés oxidativo. Sin embargo, el uso de concentraciones superiores podría generar efectos negativos al inducir estrés tóxico.

4.5 Concentración de zinc en los granos de maíz

Los resultados estadísticos para la concentración de zinc en los granos de maíz mostraron diferencia significativa por efecto de la aplicación foliar de las NPs de ZnO, en la cual la concentración de 400 mg L^{-1} presento resultados de 102.75 µg g^{-1} siendo un 26% mayor al tratamiento testigo (Figura 4.3).

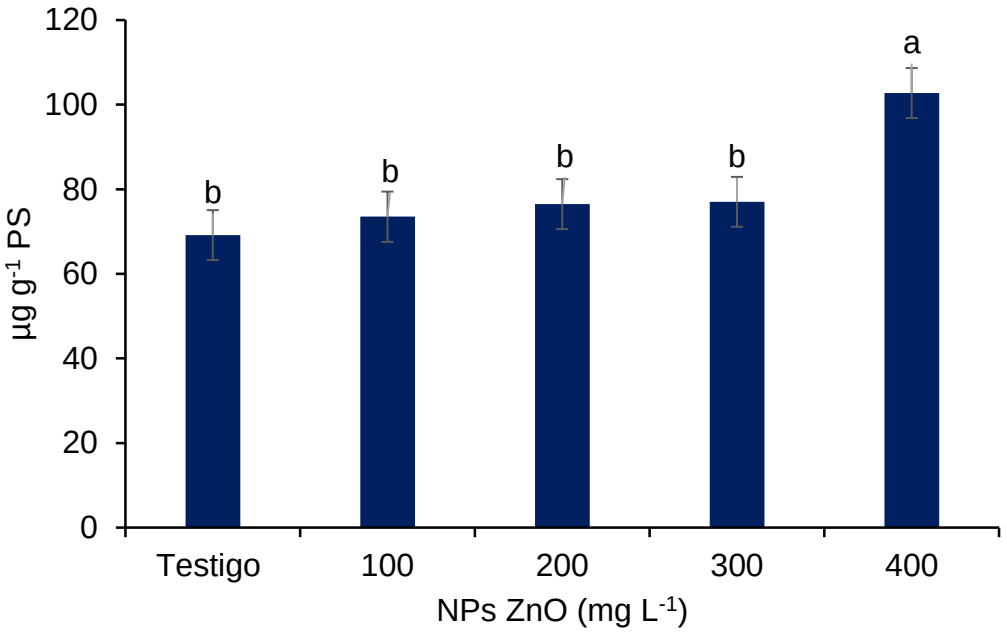

Figura 4.3 Concentración de Zn en grano de maíz (*Zea mays L*.) por efecto de la aplicación foliar de las nanopartículas de óxido de zinc. PS: Peso seco. Valores con letras distintas indican diferencia significativa de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

Estos resultados coinciden con Subbaiah *et al.,* (2016) al trabajar en el cultivo de maíz y con concentraciones de 100 ppm, 400 ppm de NPs de ZnO obtuvo resultados mejores respecto al control. La concentración de 100 ppm fue mejor respecto al control un 37%, seguida de la concentración de 400 ppm. En nuestro estudio la concentración que obtuvo mayor contenido de zinc fue el tratamiento cinco de 400 mg L^{-1} de NPs ZnO, sin embargo, las condiciones en las que fue sembrado el cultivo fueron distintas al trabajo anterior, los resultados se atribuyen a que la translocación del zinc a los granos de maíz depende de la concentración de NPs utilizadas, la estructura, tamaño y pureza (Fortis-Hernández *et al., 2024).*

Trabajos realizados en trigo reportan un aumento con el uso de NPs-ZnO, mejorando la deficiencia de Zn en este cereal señalado, y puede ser una alternativa de uso para biofortificación en cereales y ser una estrategia para reducir el hambre oculta en los humanos (Hussain *et al.,* 2018).

Estos resultados coinciden con Mazar *et al.,* (2023), en el cual se aplicaron NPs de ZnO en el cultivo de trigo y la máxima concentración de Zn en granos fue de (52.9 mg kg^{-1}). Las NPs mejoran el contenido de zinc en brotes y granos y esto puede atribuirse a las diferencias de las reacciones químicas que experimenta en las diferentes condiciones del suelo.

En general la manera en que las plantas asimilan el zinc es en forma de catión divalente (Zn^{2+}) en pH elevados, también puede ser absorbido como catión monovalente ($ZnOH^{+}$), el zinc es de benefició para la producción de clorofila, síntesis de proteínas y la producción de semillas (INTAGRI, 2013).

5. CONCLUSIONES

La aplicación de nanopartículas de óxido de zinc (NPs-ZnO) en el cultivo de maíz ha demostrado ser una estrategia prometedora para mejorar ciertas características agronómicas, la calidad bromatológica y el contenido de zinc en los granos. En términos agronómicos, el grosor del tallo y el peso de las mazorcas mostraron mejoras significativas en las concentraciones de 400 y 200 mg L^{-1}, respectivamente. Estos resultados sugieren que el manejo adecuado de las dosis de NPs de ZnO puede optimizar ciertas características físicas de las plantas, posiblemente fortaleciendo su estructura y aumentando su productividad. Sin embargo, los efectos de las nanopartículas dependen no solo de la dosis, sino también de las condiciones de cultivo, como se evidencio en la comparación con estudios previos realizados en ambientes diferentes. Desde el punto de vista bromatológico, la aplicación de NPs ZnO influyo positivamente en cenizas, grasas y fibras detergentes neutras, especialmente a concentraciones de 300 y 400 mg L^{-1}. Esto indica una mejora en el contenido nutricional del grano, lo cual es relevante para el desarrollo de alimentos más nutritivos. Por otro lado, los compuestos bioactivos como flavonoides y capacidad antioxidantes aumentaron significativamente con concentraciones entre 100 y 200 mg L^{-1}, mientras que la actividad enzimática mostro un comportamiento dependiente de la dosis. Estos resultados refuerzan el papel de las NPs ZnO no solo como un suplemento de zinc, sino también como un modulador del metabolismo antioxidante de la planta. El contenido del zinc en los granos aumento significativamente con la aplicación de 400 mg L^{-1}, lo que destaca el potencial de las NPs ZnO para la biofortificación de cultivos.

6. LITERATURA CITADA

AOAC Official methods 920.39C 1990. Determinación de grasa. Official Method of Analysis of AOAC International.

Arias L., D., Montaño D., L.N., Velasco S., M.A. y Martínez G., J. 2018. Alimentos funcionales: avances de aplicación en agroindustria. Revista Tecnura, 22(57), 55-68. DOI: https://doi.org/10.14483/22487638.12178

Avellan, A., Yun, J., Morais, B. P., Clement, E. T., Rodrigues, S. M., & Lowry, G. V. 2021. Critical review: Role of inorganic nanoparticle properties on their foliar uptake and in planta translocation. *Environmental Science & Technology*, *55*(20); 13417-13431. https://doi.org/10.1021/acs.est.1c00178

Ayala-Niño, F., Maya-Delgado, Y., & Troyo-Diéguez, E. 2018. Almacenamiento y flujo de carbono en suelos áridos como servicio ambiental: Un ejemplo en el noroeste de México. *Terra latinoamericana*, *36*(2): 93-104.

Azam, M., Bhatti, H. N., Khan, A., Zafar, L., & Iqbal, M. 2022. Zinc oxide nano-fertilizer application (foliar and soil) effect on the growth, photosynthetic pigments and antioxidant system of maize cultivar. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, *42*: 102343. https://doi.org/10.1016/j.bcab.2022.102343

Barbarán, E., & Vela, D. 2016. El zinc: un elemento esencial para la vida. *Agenda Viva*, (001): 14-19.

Boonchuay, P., Cakmak, I., Rerkasem, B., & Prom-U-Thai, C. 2013. Effect of different foliar zinc application at different growth stages on seed zinc concentration and its impact on seedling vigor in rice. Soil science and plant nutrition, 59(2): 180-188. https://doi.org/10.1080/00380768.2013.763382

Borroel-García, V. J., Salas-Pérez, L., Ramírez-Aragón, M. G., López-Martínez, J. D., & Luna-Anguiano, J. 2018. Yield and production components in maize hybrids in the Comarca Lagunera. *Terra Latinoamericana*, *36*(4): 423-429.

Bradford, M. M. 1976. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein dye binding. Anal. Biochem., 72 (1-2):*248–254.* doi:10.1016/0003-2697(76)90527-3.

Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E. & Berset, C. L. W. T. 1995. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. LWT-Food Science and Technology. 28(1): 25-30.

Cervantes-Ortiz, F., M. T. Gasca-Ortiz, E. Andrio-Enriquez, M. Mendoza-Elos, L. P. Guevara-Acevedo, F. Vázquez-Moreno y S. Rodríguez-Herrera. 2014. Densidad de población y correlaciones fenotípicas en caracteres agronómicos y de rendimiento en genotipos de maíz. Ciencia y Tecnol. Agrop. México. 2 (1): 9-16.

Chan-Chan, M., Moguel-Ordóñez, Y., Gallegos-Tintoré, S., Chel-Guerrero, L., & Betancur-Ancona, D. 2021. Caracterización química y nutrimental de variedades de maíz (Zea mays L.) de alta calidad de proteína (QPM) desarrolladas en Yucatán, México. *Biotecnia*, *23*(2): 11-21.

Chang, J. y Lin, C. Y. 2001. Cinética de decoloración de una cepa recombinante de escherichia coli que alberga determinantes que decoloran azo-colorantes de rhodococcus sp. Biotechnol. Lett. 23:631-636. 10.1023/A: 1010306114286.

Chávez-García, J. A., Andrade-Rodríguez, M., Bello-Bello, J. J., Rueda-Barrientos, M. C., Guillén-Sánchez, D., & Sainz-Aispuro, M. D. J. 2020. Nanopartículas de plata en el establecimiento in vitro de ápices de gladiolo. *Revista fitotecnia mexicana*, *43*(4A): 557-564.

Dimkpa, C. O., McLean, J. E., Britt, D. W., & Anderson, A. J. 2015. Nano-CuO and interaction with nano-ZnO or soil bacterium provide evidence for the interference of nanoparticles in metal nutrition of plants. *Ecotoxicology*, *24*, 119-129.

Farinango, E., Jácome, C., Llanos, F., Lasso, A. & Ramos, J. 2021. Uses of the enzyme catalase in the reduction of hydrogen peroxide and its industrial applications. Journal of Agro-industry Sciences. 3(2): 45-50. DOI: http://dx.doi.org/10.17268/JAIS.2021.006

Fernández, V., & Brown P. H. 2013. From plant surface to plan metabolism: the uncertain fate of foliar-applied nutrients. PLANT SCIENCE.

Fernández, V., Sotiropoulos, T., & Brown, P. 2015. Fertilización Foliar. Principios Científicos y Práctica de Campo. Primera edición. Asociación Internacional de la Industria de Fertilizantes, IFA, París, Francia. 156 p.

Fortis-Hernández M, Pivaral-Chávez AG, Galindo-Guzmán AP, Preciado-Rangel P, Ruiz-Ortega FJ, Trejo-Valencia R. 2024. Nanopartículas de óxido de zinc para incrementar rendimiento, compuestos bioactivos y actividad enzimática en lechuga. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 11(1): e3939. DOI: https://doi.org/10.19136/era.a11n1.3939

Galicia, L., Miranda, A., Gutiérrez, M. G., Custodio, O., Rosales, A., Ruíz, N., Surles, R., & Palacios, N. 2012. *Laboratorio de calidad nutricional de maíz y análisis de tejido vegetal: protocolos de laboratorio 2012*. CIMMYT.

Galindo-Guzmán, A. P.; Fortis-Hernández M.; De la Rosa-Reta, C.V.; Zermeño-Gonzáles, H. & Galindo-Guzmán, M. 2022. Síntesis química de nanopartículas de óxido de zinc y su evaluación en plántulas de

Lactuca sativa. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, (28): 299-308.

García Martínez, EM.; Fernández Segovia, I. 2012. Determinación de proteínas de un alimento por el método Kjeldahl. Valoración con un ácido fuerte. http://hdl.handle.net/10251/16338

García Reyes, E., Flores Naveda, A., Ruiz Torres, N., Camposeco Montejo, N., Ramírez Barrón, S. N., & García López, J. I. 2022. Compuestos fenólicos y capacidad antioxidante de genotipos de maíz pigmentado (azul/morado). *REPOSITORIO NACIONAL CONACYT*.

Gasull, E., & Becerra, D. 2006. Caracterización de Polifenoloxidasa Extraída de Pera (cv. Packam´ s Triumph) y Manzana (cv. Red Delicious). *Información tecnológica*, *17*(6): 69-74.

Gaucin-Delgado, J. M., Preciado-Rangel, P., González-Salas, U., Sifuentes-Ibarra, E., Núñez-Ramírez, F., & Vidal, J. A. O. 2021. La biofortificación con selenio mejora los compuestos bioactivos y la actividad antioxidante en chile jalapeño. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, *12*(8): 1339-1349.

Geraldo León, J. A., Vázquez-Duhalt, R., & Juárez-Moreno, K. O. 2022. Desbalance del sistema antioxidante causado por la exposición a nanopartículas de óxido de zinc y óxido de cobre. *Mundo nano. Revista interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología*, *15*(29).

Hacisalihoglu, G. 2020. Zinc (Zn): The last nutrient in the alphabet and shedding light on Zn efficiency for the future of crop production under suboptimal Zn. *Plants*, *9*(11): 1471.

Hong, J., Wang, C., Wagner, D. C., Gardea-Torresdey, J. L., He, F., & Rico, C. M. 2021. Foliar application of nanoparticles: mechanisms of absorption, transfer, and multiple impacts. *Environmental Science: Nano*, *8*(5): 1196- 1210. https://doi.org/10.1039/D0EN01129K

Horst, W. 2017. Los Retos Multifacéticos de la Nutrición Vegetal. Serie Nutrición Vegetal. Artículos Técnicos de INTAGRI, México. 87: 5. https://www.intagri.com/articulos/nutricion-vegetal/los-retos-multifaceticos-de-la-nutricion-vegetal. (verified 12 noviembre 2023).

INTAGRI. 2013. Nutrición vegetal, la función de los nutrimentos esenciales. Serie Nutrición Vegetal. Núm. 10 y 11. Artículos Técnicos de INTAGRI. México. 8

INTAGRI. 2015. El Zinc en los Suelos Mexicanos. Serie Suelos. Artículos Técnicos de INTAGRI. México. 6: 6 https://www.intagri.com/articulos/suelos/zinc-suelos-mexicanos (verified 12 marzo 2024).

INTAGRI. 2018. Biofortificacion de Cultivos con Zinc. Serie Nutrición Vegetal Núm. 566. Artículos Técnicos de INTAGRI. México. 6 p.

Javed, A., Ali, E., Afzal, K. B., Osman, A., & Riaz, S. 2022. Soil fertility: Factors affecting soil fertility, and biodiversity responsible for soil fertility. *International Journal of Plant, Animal and Environmental Sciences*, *12*(1): 21-33.

Jha, A. B., & Warkentin, T. D. 2020. Biofortification of Pulse Crops: Status and Future Perspectives. *Plants (Basel, Switzerland)*, *9*(1), 73. https://doi.org/10.3390/plants9010073

Kanwal, A., Sharma, I., Bala, A., Upadhyay, S. K., & Singh, R. 2022. Agricultural application of synthesized ZnS nanoparticles for the development of tomato crop. *Lett. Appl. NanoBioSci*, *12*: 1-9. https://doi.org/10.33263/LIANBS122.058

Kurniawati, A., Toth, G., Ylivainio, K., & Toth, Z. 2023. Opportunities and challenges of bio- based fertilizers utilization for improving soil health. *Organic Agriculture*, (13): 335- 350. https://doi.org/10.1007/s13165- 023-00432-7

Lamaison, J. L. C. & Carnet, A. 1990. Contents in main flavonoid compounds of Crataegus Monogyna Jacq. and Crataegus laevigata (Poiret) D. C. flowers at different development stages. Pharmaceutica Acta Helvetica. 65: 315-320.

Lamikanra, O. 1995. Enzymatic browning of Muscadine grapes products. pp. 166-177. In: Enzymatic Browning and its Pre vention, LEE, C.L.; WHITAKER, J. R. (eds). ACS. Washington, USA.

Lira-Saldivar, R. H., Méndez-Argüello, B., De los Santos-Villareal, G., & Vera-Reyes, I. 2018. Potencial de la nanotecnología en la agricultura. Acta Universitaria, 28 (2), 9-24. https://doi.org/10.15174/au.2018.1575

Lira-Saldivar, R. H., Méndez-Argüello, B., Vera-Reyes, I., & De los Santos-Villarreal, G. 2018. Agronanotecnología: una nueva herramienta para la agricultura moderna. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo*, *50*(2): 395-411.

López de Romaña, D., Castillo, C., & Diazgranados, D. 2010. El zinc en la salud humana-1. *Revista chilena de nutrición*, *37*(2), 234-239.

López-Blancas, E., Martínez-Damián, M. T., Colinas-León, M. T., Bautista-Bañuelos, C., Martínez-Solís, J. & Rodríguez-Pérez, J. E. 2014. Actividad antioxidante y enzimática de albahaca Nufar (Ocimum basilicum L.) almacenada en refrigeración. Agronomía Mesoamericana. 25(2): 256-265.

Márquez-Villacorta, L. F., & Vásquez-Prettel, C. C. 2018. Evaluación de características de calidad en barras de cereales con alto contenido de fibra y proteína. *Biotecnología en el sector agropecuario y agroindustrial*, *16*(2): 69-78. doi:http://dx.doi.org/10.18684/bsaa.v16n2.101

Martínez-Damián, M. T., Cruz-Álvarez, O., Beryl Colinas-León, M. T., Rodríguez-Pérez, J. E., & Ramírez-Ramírez, S. P. 2013. Actividad enzimática y capacidad antioxidante en menta (Mentha piperita L.) almacenada bajo refrigeración. *Agronomía mesoamericana*, *24*(1): 57-69.

Martínez-Martínez, R., Vera-Guzmán, A. M., Chávez-Servia, J. L., Bolaños, E. N. A., Carrillo-Rodríguez, J. C., & Pérez-Herrera, A. 2019. Bioactive compounds and antioxidant activities in pigmented maize landraces. *Interciencia*, *44*(9), 549-556.

Mazhar, Z., Akhtar, J., Alhodaib, A., Naz, T., Zafar, M. I., Iqbal, M. M., ... & Naz, I. 2023. Efficacy of ZnO nanoparticles in Zn fortification and partitioning of wheat and rice grains under salt stress. *Scientific Reports*, *13*(1): 2022.

Meléndez-Sosa, M. F., García-Barrales, A. M. y Ventura-García, N. A. 2020. Perspectivas e impacto en la salud del consumo de los alimentos funcionales y nutracéuticos en México. RD-ICUAP. 6(1): 114-136.

Méndez-Argüello BM, Lira-Saldivar RH, Vera-Reyes I. 2016. Respuestas fisiológicas de plantas cultivadas en bioespacios por efecto de nanofertilizantes y zeolita. Agronano Tecnología, México 62-79.

Montaño-Arias, N., Navarro-Rangel, M., Patricio-López, I., Chimal Sánchez, E., & Miguel de la Cruz, J. 2018. El suelo y su multifuncionalidad: ¿qué ocurre ahí abajo?. *CIENCIA Ergo-Sum, 25*(3). **DOI:** https://doi.org/10.30878/ces.v25n3a9

OECD/FAO 2022. OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas 2022-2031, OECD Publishing, Paris, https://doi.org/10.1787/820ef1bb-es.

Ojeda, L., Zogbhi, N., Noguera-Machado, N., Lucero, L., Meléndez, G., & Triana, J. 2020. Extracción y purificación parcial de peroxidasa de rabano (Raphanus sativus). Revista Iberoamericana de Ciencias. 7 (1).

Porta Casanellas, J., López-Acevedo Reguerín, M., & Poch Claret, R. M. 2014. *Edafología: uso y protección de suelos*. Ediciones Mundi-Prensa.

Preciado-Rangel, P., Valenzuela-García, A. A., Pérez-García, L. A., González-Salas, U., Ortiz-Díaz, S. A., Buendía-García, A. y Rueda Puente, E. O. 2022. La biofortificación foliar con hierro mejora la calidad nutracéutica y la capacidad antioxidante en lechuga. Terra Latinoamericana, 40, 1-7. e1060. https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.1060

PROAIN. Tecnología Agrícola. 2020. Los macronutrientes y su relación en el suelo. https://proain.com/blogs/notas-tecnicas/los-macronutrientes-y-su- relacion-en-el-suelo. (verified 18 enero 2024).

PROAIN. Tecnología Agrícola. 2021. Importancia de los nutrientes esenciales en las plantas. https://proain.com/blogs/notas-tecnicas/importancia-de-los- nutrientes-esenciales-en-las-plantas (verified 12 marzo 2024).

Quiróz-Mercado, J.; Antuna-Grijalva, O.; Molina-Ayala, E.; Del Río-Rivas, M.J.; Coyac-Rodríguez, J.L.; Espinoza-Banda, A. 2023. Respuesta agronómica en híbridos de maíz al utilizar caolinita para reducir el estrés por el calor. *Revista Ciencia e Innovación Agroalimentaria de la Universidad de Guanajuato*, *5*(1): 29-43. https://doi.org/10.15174/cia.v5i1.47

Ramazan, S., Nazir, I., Yousuf, W., & John, R. 2023. Environmental stress tolerance in ma ize (*Zea mays*): role of polyamine metabolism. *Functional plant biology :FPB*, *50*(2): 85–96. https://doi.org/10.1071/FP21324

Ratto, S. E., & Miguez, F. H. 2006. Zinc en el cultivo de maíz, deficiencia de oportunidad. *Informaciones agronómicas*, *63*: 8-15.

RISK, R. 2015. Nanobioingeniería: Historia y futuro. TecnoLógicas, 18(34), 09-11.

Rivera-Gutiérrez, R. G., Preciado-Rangel, P., Fortis-Hernández, M., Betancourt-Galindo, R., Yescas-Coronado, P., & Orozco-Vidal, J. A. 2021. Nanoparticulas de óxido de zinc y su efecto en el rendimiento y calidad de melón. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, *12*(5): 791-803.

Sacón, F. C., Chávez, J. C., Dueñas, J. C., Vargas, J. M., Álava, G. L., & García, G. A. C. 2018. Aplicación foliar de micronutrientes y fitorreguladores como complemento de la fertilización edáfica en maíz amarillo duro. *La Técnica: Revista de las Agrociencias. ISSN 2477-8982*, (19): 19-30.

Salas-Pérez, L., Gaucín-Delgado, J. M., Preciado-Rangel, P., Fortis-Hernández, M., Valenzuela-García, J. R., & Ayala-Garay, A. V. 2016. Efecto del ácido benzoico en la capacidad antioxidante de germinados de trigo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, (17): 3397-3404.

Salazar-Sosa, E., Trejo-Escareño, H. I., López-Martínez, J. D., Vázquez-Vázquez, C., Serrato-Corona, J. S., Orona-Castillo, I., & Flores-Márgez, J. P. 2010. Efecto residual de estiércol bovino sobre el rendimiento de maíz forrajero y propiedades del suelo. *Terra Latinoamericana*, *28*(4): 381-390.

Sheoran, P., Grewal, S., Kumari, S., & Goel, S. 2021. Enhancement of growth and yield, leaching reduction in Triticum aestivum using biogenic synthesized zinc oxide nanofertilizer. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, *32*: 101938. https://doi.org/10.1016/j.bcab.2021.101938

Singleton, V. L., Orthofer, R. & Lamuela-Raventós, R. M. 1999. Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of folin-ciocalteu reagent. Methods in Enzymology. 299(7): 152-178.

Spaargaren, O. C. 1999. *Base Referencial Mundial del Recurso Suelo* (No. 84). FAO.

Subbaiah, L. V., Prasad, T. N., Krishna, T. G., Sudhakar, P., Reddy, B. R., & Pradeep, T. 2016. Novel Effects of Nanoparticulate Delivery of Zinc on Growth, Productivity, and Zinc Biofortification in Maize (Zea mays L.). *Journal of agricultural and food chemistry*, *64*(19): 3778–3788. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.6b00838

Urango, L. A. 2018. Componentes del maíz en la nutrición humana. *Fondo Editorial Biogénesis*, 185-209.

Urquilla, A. C. 2023. ¿Será la Agricultura 4.0 la solución al hambre global? *Realidad y Reflexión*, (57): 39-58.

Valenzuela, B, A., Sanhueza, J., Valenzuela, R. y Morales, I. G. 2014. Alimentos funcionales, Nutraceúticos y foshu: ¿vamos hacia un nuevo concepto de alimentación?. Revista Chilena de Nutricion. 41(2): 198-204. https://doi.org/10.4067/S0717- 75182014000200011.

Valenzuela, J.S.; Quevada, J.; Escobedo, D.; Gallegos, M.A.; Vázquez, C.; Vega, M.A. 2001. Variedad "San Lorenzo"; ideotipo de Maíz (*Zea Mays L.*) desarrollado para la Comarca Lgunera. AGROFAZ, 104-110.

Van Soest PJ, Robertson JB, Lewis BA. 1991 Methods for Dietary Fiber, Neutral Detergent Fiber, and Nonstarch Polysaccharides in Relation to Animal Nutrition. J Dairy Sci; 74:3583-3597.

Van Soest PJ, Wine RH. 1968. Determination of Lignin and Cellulose in Acid Detergent Fiber with Permanganate. J Assoc Off Ana. Chem; 51: 780- 785.

Vazquez-Olivo, G., López-Martínez, L. X., Contreras-Angulo, L. y Heredia, J. B. 2017. Antioxidant capacity of lignin and phenolic compounds from corn stover. Springer. 1–8.

Wei, Y., Yang, C., He, L., Wu, F., Yu, Q., & Hu, W. 2023. Classification for GM and Non- GM Maize Kernels Based on NIR Spectra and DeepLearning. *Processes*, *11*(2): 486. https://doi.org/10.3390/pr11020486

Zavaleta Espejo, G., Saldaña Jiménez, J., Jáuregui Rosas, S. R., Pacherrez Gallardo, D., Rivera Burgos, M., Samanamud Moreno, F. V., & Perales Pérez, O. J. (2019). Efecto antibacteriano de nanopartículas de ZnO sobre Staphylococcus aureus y Salmonella typhi. *Arnaldoa*, *26*(1), 421-430.

Zhang, H.; Wang, R.; Chen, Z.; Cui, P.; Lu, H.; Yang, Y.; Zhang, H. 2021. The Effect of Zinc Oxide Nanoparticles for Enhancing Rice (*Oryza sativa* L.) Yield and Quality. *Agriculture*, *11*: 1247. https://doi.org/10.3390/agriculture11121247