



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TORREÓN

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADOS E INVESTIGACIÓN

**NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE ZINC PARA
MEJORAR EL RENDIMIENTO Y LA CALIDAD
NUTRICIONAL EN LECHUGA**

Tesis que presenta:

DENISS HERNANDEZ CRUZ

Como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN SUELOS

Director de tesis:



DR. MANUEL FORTIS HERNÁNDEZ

Torreón, Coahuila, México

Agosto, 2021

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:

MAESTRO EN CIENCIAS EN SUELOS

COMITÉ PARTICULAR

Director de tesis: _____

Dr. Manuel Fortis Hernández

Co director de tesis: _____

Dra. Rebeca Betancourt Galindo

Asesor: _____

Dr. Pablo Preciado Rangel

Asesor: _____

Dr. Héctor Zermeño González

Torreón, Coahuila, México 2021

DEDICATORIAS

A mi madre **Angélica Cruz Hernández** por toda la confianza depositada en mí por su amor de madre que es y será incondicional por sus sabios consejos, sus palabras de aliento cuando caía por motivarme día a día por dejarme seguir mi sueño, gracias por darme la vida este logro se lo debo a usted gracias por educarme y ser de mí una buena hija.

A mi padre **Javier Hernández Yescas** por darme la oportunidad de estar en este mundo por la confianza depositada en mí, por su cariño y sus sabios consejos.

A mi hermano **Cornelio Hernández Cruz** por sus llamadas inesperadas por sus regaños, por todo su cariño y animarme en llegar a esta meta gracias por todo.

A mi abuela **Alicia Eudelia Hernández** mi ejemplo a seguir gracias por darme una maravillosa madre, una hermosa familia, pero sobre todo por sus consejos, su apoyo que nunca me faltó por su confianza por ser uno de mis motivos de seguir adelante y llegar al final de esta meta te adoro abuela.

Al amor de mi vida **Marco Antonio Islas** llegaste a mi vida justo en el momento indicado gracias por acompañarme en este logro, por no dejarme rendirme, por tu apoyo incondicional y sobre todo por confiar siempre en mí Te amo.

A mis amigas **Elizabeth Hernández, Silvia Uñate, y Janine Molina** A ustedes preciosas mujeres que han hecho de estos años los mejores que a pesar de la distancia siempre estuvieron conmigo en las buenas y en las malas gracias por dejarme ser parte de su vida las quiero.

AGRADECIMIENTOS

A **Dios** por todas sus bendiciones y así mismo por permitirme cumplir una meta más en mi vida.

Al **Instituto Tecnológico de Torreón** por aceptarme en el programa de Maestría en Ciencias en Suelos.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)** por el apoyo económico para la realización de mis estudios de maestría.

A mi director de tesis, **Dr. Manuel Fortis Hernández** gracias por la oportunidad que me brindo de trabajar con usted, por su paciencia y comprensión, así como su apoyo incondicional y su tiempo prestado durante la realización de esta tesis.

A mis asesores **Dr. Pablo Preciado Rangel, Dr. Héctor Zermeño Gonzales** por la revisión y sugerencias aportadas para mejorar el contenido de esta tesis, muchas gracias.

A la **Rebeca Betancourt Galindo** por la revisión, sugerencias aportadas para mejorar el contenido de esta tesis y por la donación de las NPs de ZnO.

A la **M.C Jazmín Gaucin Delgado** por su apoyo para determinar las variables nutraceuticas de este proyecto.

A mis compañeros y amigos de maestría **Janet, Damián, Ariel y Tony** a ustedes por ser unos muy buenos compañeros y a darme ánimos y ayudarme a crecer en este proceso y lugar donde desconocía gracias los recordare siempre.

ÍNDICE DE CONTENIDO

Página

COMITÉ PARTICULAR	II
DEDICATORIAS.....	III
AGRADECIMIENTOS.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO	V
ÍNDICE DE CUADROS.....	IX
ÍNDICE DE FIGURAS.....	X
RESUMEN.....	XII
SUMARY	XIII
I.INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 OBJETIVOS.....	5
1.1.1 General:.....	5
1.1.2 Específicos:	5
1.2 HIPÓTESIS.....	6
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	7
2.1 Biofortificación.....	7
2.1.1 La biofortificación en el mundo	7
2.1.2 Biofortificación de los cultivos	8
2.1.3 Biofortificación con nanopartículas.....	9
2.1.4 Biofortificación con Zinc	10
2.2 Fortificación	11
2.2.1 Fortificación con zinc	11
2.3 Fertilización.....	12
2.3.1 Fertilización foliar	12
2.3.2 Factores que influyen en la fertilización foliar	13
2.4 Zinc.....	14
2.4.1 Generalidades del zinc	14
2.5 óxido de zinc.....	15
2.5.1 Nanopartículas de Óxido de Zinc	16

2.5.2 Estudios realizados en cultivos con aplicación de NPs	17
2.6 Características de las NPs	19
2.7 propiedades de las Nanopartículas de zinc	21
2.7.1 Propiedades físicas.....	21
2.7.2 propiedades ópticas y antimicrobianas	21
2.7.3 Fitotoxicidad de las nanopartículas de zinc.....	22
2.8 Empleo de surfactantes y adherentes	23
2.9 Cultivo de lechuga	24
2.9.1 Origen del cultivo	24
2.9.2 Características botánicas.....	25
2.9.3 Producción mundial	25
2.9.4 Producción en México.....	26
2.9.5 Importancia nutricional del cultivo de lechuga.....	27
2.10 Manejo agronómico.....	28
2.10.1 Siembra	28
2.10.2 Trasplante.....	29
2.10.3 Fenología.....	30
2.10.4 Cosecha	31
2.11 Nutraceuticos.....	31
2.12 Fitoquímicos	32
2.13 Los antioxidantes	33
2.14 Flavonoides	35
2.15 Compuestos fenólicos.....	36
2.16 Estrés oxidativo.....	37
2.17 El zinc en humanos.....	38
2.18 Sistemas hidropónicos	39
2.19 Lechuga hidropónica.....	41
III. MATERIALES Y METODOS.....	42
3.1 Localización del experimento	42
3.2 Condiciones del sitio experimental	43
3.3 Material vegetal.....	44

3.4 Tratamientos evaluados.....	44
3.5 Diseño experimental	46
3.6 Siembra	46
3.7 Trasplante.....	47
3.8 Manejo del cultivo	47
3.9 Nutrición del cultivo.....	48
3.10 Control de plagas y enfermedades.....	49
3.11 variables evaluadas	49
3.11.1 Variables agronómicas.....	49
3.11.1.1 Altura de planta.....	49
3.11.1.2 Diámetro de corona de la planta	50
3.11.1.3 Peso fresco de raíz	50
3.11.1.4 Peso seco de raíz	50
3.11.1.5 Volumen de raíz.....	50
3.11.1.6 Longitud de raíz	51
3.11.2 Rendimiento.....	51
3.11.2.1 Biomasa verde.....	51
3.11.2.2 Biomasa seca	51
3.11.3 Calidad nutraceutica	52
3.11.3.1 Obtención de extractos para calidad nutraceutica.....	52
3.11.3.2 Fenoles.....	52
3.11.3.3 Flavonoides	53
3.11.3.4 Capacidad antioxidante.....	54
3.11.3.5 Vitamina C	55
3.11.3.6 Contenido total de clorofila.....	56
3.11.3.7 Carotenoides	57
3.11.3.8 Concentración de zinc en el tejido vegetal	58
3.12 Análisis estadísticos.....	58
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	59
4.1 Morfología de la planta.....	59
4.1.1 Altura de planta, volumen de raíz y materia seca de raíz	59
4.1.2 Diámetro de corona, peso fresco de raíz y longitud de raíz.....	61

4.2. Rendimiento.....	63
4.2.2 Peso Fresco de la Planta.....	63
4.2.3 Materia Seca de Planta.....	65
4.3. Calidad Nutraceutica.....	67
4.3.1 Compuestos fenolicos.....	67
4.3.2 Flavonoides	68
4.3.3 Capacidad antioxidante	70
4.3.4 Vitamina C	71
4.3.5 Clorofila	73
4.3.6 Carotenoides	75
4.3.7 Concentración de zinc en el tejido vegetal	76
V. CONCLUSIONES.....	78
VII. LITERATURA CITADA	79

ÍNDICE DE CUADROS

Página

Cuadro 2.1 Composición nutricional de la lechuga	28
Cuadro 4.1 Comparación de medias obtenidas por efecto de NPs de ZnO en las variables ADP (altura de planta), VR (volumen de raíz) y PSR (peso seco de raíz) de lechuga cultivada en un sistema hidropónico	60
Cuadro 4.2 Efectos de la aplicación de NPs de ZnO en las variables DC (diámetro de corona), PFR (peso fresco de raíz) y LR (longitud de raíz) de lechuga cultivada en un sistema hidropónico	62

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 3.1 Localización del sitio experimental ubicado en el Instituto Tecnológico de Torreón	42
Figura 3.2 Sistema hidropónico NFT con recirculación y aireación durante las 24 horas.....	43
Figura 3.3 Preparación de las NPs de zinc para la aplicación foliar en el cultivo de lechuga.....	45
Figura 3.4 Siembra en foami agrícola totalmente húmedo,colocando una semilla en cada cavidad	46
Figura 3.5 Trasplante colocando una planta en cada cavidad del sistema hidropónico dejando una cavidad bacía para que la planta se desarrollara correctamente.....	47
Figura 3.6 Manejo del cultivo cuidar el desarrollo correcto de la cabeza y observación de que cada planta absorbiera agua.....	48
Figura 3.7 Preparación de jabón potásico para ser aplicado con un atomizador en todas la plantas para prevenir plagas y enfermedades.	49
Figura 4.1 Efecto de NPs de ZnO en peso fresco de planta de lechuga cultivada en un sistema hidropónico.	64
Figura 4.2 Efecto de NPs de ZnO en peso seco de lechuga cultivada en un sistema hidropónico	66
Figura 4.3 Efecto de las diferentes concentraciones de NPs de ZnO en el contenido de fenoles de lechuga cultivada en un sistema hidropónico.....	68
Figura 4.4 Efecto de las diferentes concentraciones de ZnO en el contenido de flavonoides de lechuga cultivada en un sistema hidropónico.....	69
Figura 4.5 Efecto NPs de ZnO en el contenido de capacidad antioxidante en lechuga cultivada en un sistema hidropónico.	71
Figura 4.6 Efecto de las diferentes concentraciones de NPs de ZnO en el contenido de vitamina c en lechuga cultivada en un sistema hidropónico.....	73
Figura 4.7 Efecto de las diferentes concentraciones de NPs de ZnO en el contenido de vitamina c en lechuga cultivada en un sistema hidropónico.....	74
Figura 4.8 Efecto de las diferentes concentraciones de NPs de ZnO en el contenido de carotenoides en lechuga cultivada en un sistema hidropónico.....	76

Figura 4.9 Efecto de NPs de ZnO en el contenido de concentración de zinc en el tejido vegetal de lechuga cultivada en un sistema hidropónico.77

RESUMEN

La biofortificación agronómica a través de la nanotecnología puede ser un método de elección para aumentar el contenido de zinc en la lechuga y posiblemente mejorar su calidad nutraceútica. En este sentido el objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la aplicación foliar de diferentes concentraciones de nanopartículas de óxido de zinc (NPs ZnO) en plantas de lechuga producidas en un sistema hidropónico. Se evaluaron seis tratamientos (0, 1.5, 3, 3.5, 4.5, 6.0 y 7.5 mg L⁻¹ NPs ZnO) con cinco repeticiones bajo un diseño experimental completamente al azar. Se realizaron tres aplicaciones de las nanopartículas y se evaluaron parámetros de rendimiento, calidad comercial y fitoquímica. Los resultados mostraron que la aplicación foliar de 7.5 mg L⁻¹ influyó significativamente en el rendimiento y la calidad nutraceútica, como son fenoles, flavonoides capacidad antioxidante, vitamina C, clorofila, carotenoides y concentración de zinc en el tejido vegetal. Además, se observó que estas variables fueron aumentando de manera proporcional a las dosis aplicadas. Con respecto a la concentración de zinc en las hojas de lechuga las nanopartículas lo incrementaron, por lo que podrían ser una opción para mejorar su la calidad nutrimental.

Palabras clave: *Lactuca Sativa* L., biofortificación, antioxidantes, fenoles, NFT.

SUMARY

Agronomic biofortification through nanotechnology may be a method of choice to increase the zinc content in lettuce and possibly improve its nutraceutical quality. In this sense, the objective of this work was to evaluate the effect of the foliar application of different concentrations of zinc oxide nanoparticles (NPs ZnO) in lettuce plants produced in a hydroponic system. Six treatments (0, 1.5, 3, 3.5, 4.5, 6.0 and 7.5 mg L⁻¹ NPs ZnO) with five replications were evaluated under a completely randomized experimental design. Three applications of the nanoparticles were made and performance, commercial quality and phytochemical parameters were evaluated. The results showed that the foliar application of 7.5 mg L⁻¹ significantly influenced the yield and nutraceutical quality, such as phenols, flavonoids, antioxidant capacity, vitamin C, chlorophyll, carotenoids and zinc concentration in plant tissue. In addition, it was observed that these variables were increasing proportionally to the doses applied. With regard to the concentration of zinc in lettuce leaves, the nanoparticles increased it, and could therefore be an option to improve their nutritional quality.

Keywords: *Lactuca Sativa* L., biofortification, antioxidants, phenols, NFT.

I.INTRODUCCIÓN

El Zinc (Zn) es un oligoelemento vital, esencial para la salud humana. La deficiencia de Zn es un problema de salud pública especialmente en países en desarrollo (Bouis y Saltzman, 2017). Afecta aproximadamente a un tercio de la población en todo el mundo, especialmente niños y mujeres embarazadas. La deficiencia de Zn puede conducir al deterioro del sistema inmune, retraso en el crecimiento y en la reproducción, etc., (Levenson y Morris, 2011).

La razón principal de la deficiencia de Zn en los países en desarrollo parece ser la escasa diversidad dietética (caracterizada por la no inclusión de legumbres, vegetales de hoja verde, nueces, carne, huevos y alimentos derivados de animales), así como muy bajo consumo de Zn en la dieta (White y Broadley, 2009).

Desde el año 2012, resultados muestran prevalencias nacionales elevadas de deficiencia de Hierro (26%), Zinc (28%) y anemia (20.6%), en población infantil (Rivera, 2012).

Estos hallazgos sugieren deficiencia de Zn en algunos grupos de México por lo tanto, la producción y el consumo de hortalizas de hoja enriquecidos con Zn como

la lechuga podrían ser la estrategia más adecuada para combatir el "hambre oculta" de micronutrientes (Cakmak, 2008).

La biofortificación agronómica utilizando suelo o mediante la aplicación foliar de fertilizantes que contienen Zn ha sido ya documentado (Mathpal *et al.*, 2015). Varias formas inorgánicas y queladas de Zn son útiles como fertilizante. Su eficiencia de uso es alta en suelos con buen drenaje, pH favorable (ligeramente ácido a neutro) y contenido orgánico adecuado. En ausencia de estas condiciones, los fertilizantes se desperdician, lo que contribuye a la contaminación ambiental. Por lo tanto, es necesario explorar nuevos enfoques para garantizar la entrega de fertilizantes en "dosis correctas" en el "momento adecuado" en una "forma disponible para la planta" sin causar problemas ambientales.

Las aplicaciones de la nanotecnología (NT) en los sistemas agrícolas son diversas, ofreciendo el potencial para mejorar significativamente su productividad y eficiencia al reducir costos y cantidades de agroquímicos aplicados. Las nanopartículas (NPs) metálicas de óxido de zinc, cobre y hierro, están siendo estudiadas globalmente por su potencial agrícola como promotores de crecimiento, nanofertilizantes y antimicrobiales (Méndez *et al.*, 2016).

La probabilidad de entrar en contacto una planta con nanopartículas se ha incrementado mucho en los últimos años con el aumento de la producción y uso de nanomateriales en gran variedad de bienes y productos de consumo. Los nanomateriales pueden alcanzar a las plantas por aplicación directa, emisión accidental, contaminación de suelos y sedimentos o precipitación atmosférica (Rico *et al.*, 2011).

En el campo de la agricultura, las nanopartículas han sido utilizadas para promover el crecimiento de las plantas, tal como lo demostró (Cañas *et al.*, 2008) al estudiar su efecto en especies de plantas como lechuga. Ellos encontraron que las nanopartículas de pared sencilla (nanotubos) estimularon el crecimiento de la lechuga.

La lechuga está constituida por un 96 % de agua, 1.1 g de fibra, 2.2 g de carbohidratos, 1.4 g proteína, y una mínima cantidad de grasa, es fuente de minerales como el zinc, vitaminas y compuestos fenólicos. Este alimento posee actividad antimicrobiana y antioxidante (Noumedem *et al.*, 2017); y por cada 100 g de lechuga se encuentra 0.3 g de zinc (Moreira *et al.*, 2013).

En este contexto, la biofortificación agronómica a través de la nanotecnología se convierte en un método de elección actual para aumentar el contenido de Zn en la lechuga y posiblemente su rendimiento.

En esta investigación se evalúa la aplicación de nanopartículas de óxido de zinc (NPsZnO) y su efecto en la biofortificación del cultivo de lechuga hidropónica.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 General:

Evaluar el efecto de la aplicación foliar de diferentes concentraciones de Nanopartículas de Óxido de Zinc (NPs ZnO) en el rendimiento y calidad nutrimental (zinc) de plantas de lechuga producida en un sistema hidropónico.

1.1.2 Específicos:

- Determinar el efecto de las NPsZnO sobre el rendimiento en las lechugas hidropónicas.
- Cuantificar la calidad nutracéutica (capacidad antioxidante, fenoles, flavonoides y vitamina C) en las hojas de lechuga cosechadas y la acumulación de zinc en el tejido vegetal.

1.2 HIPÓTESIS

La aplicación foliar de 6.0 mg L^{-1} de nanopartículas de óxido de zinc (NPsZnO) mejorará el rendimiento, la calidad comercial, nutraceútica e incrementara la concentración de zinc en las hojas de lechuga producidas en un sistema hidropónico.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Biofortificación

2.1.1 La biofortificación en el mundo

La biofortificación es un proceso de aumento de la densidad de vitaminas y minerales en un cultivo a través de fitomejoramiento, técnicas transgénicas o prácticas agronómicas. Se ha reportado que en cultivos básicos biofortificados, cuando se consumen regularmente, genera mejoras cuantificables en la salud humana y nutrición (Bouis *et al.*, 2011).

Actualmente una de las estrategias más rentables para abordar la desnutrición global (Gómez *et al.*, 2010). Es un proceso nuevo y sostenible que incrementa el contenido de nutrientes en la parte comestible, así como, la productividad mediante técnicas de mejoramiento de cultivo, intervención agronómica y biotecnología moderna (Uscátegui, 2011).

La biofortificación es la concentración de elementos esenciales biodisponibles en las porciones comestibles de las plantas a través de la intervención agronómica o la selección genética (White y Broadly, 2005). Los cultivos biofortificados se

extendería a los lugares donde esos cultivos son consumidos, que pueden o no coincidir con los de producción (Rojas *et al.*, 2009).

Actualmente ya existe una estrategia para disminuir las deficiencias de los micronutrientes de la población, especialmente del sector rural sin alterar los hábitos alimentarios a través de productos más nutritivos (Uscategui, 2011).

2.1.2 Biofortificación de los cultivos

Los cultivos biofortificados tienen mejores características agronómicas y nutricionales, en comparación con cultivos no-biofortificados, es decir, los que consumimos a diario y se denominan convencionales (Pisuña y Manuel, 2015).

La biofortificación se considera un método eficaz y económico que permite que las poblaciones de bajos ingresos económicos puedan tener un mayor acceso a estos nutrientes. La biofortificación se ha centrado en nutrientes como el hierro, el zinc, y los β -carotenos; y ha sido aplicada a cultivos de cereales básicos como el arroz, el maíz, y el trigo (Herrera, 2011).

Los cultivos biofortificados contribuyen a la seguridad alimentaria y nutricional de los individuos, familias y comunidades de dos maneras: 1) a través de mejores cualidades agronómicas, como lo es el rendimiento, las familias aumentan la producción de alimentos y como consecuencia la energía disponible para consumo; 2) por su mayor contenido de nutrientes carentes en la dieta latinoamericana, como el hierro y el zinc, las personas consumen más de estos micronutrientes esenciales (Ortega, 2014). Además presentan mayor resistencia a plagas y tolerancia a sequías, mejoran la disponibilidad de los alimentos en el hogar, mientras que en el aspecto nutricional estos pueden elevar su contenido en micronutrientes y carotenos (Boy, 2014).

2.1.3 Biofortificación con nanopartículas

La falta de micronutrientes, es un problema mundial generalizado (Elemike *et al.*, 2019). En este sentido, el aumento del contenido de micronutrientes (como Fe, Zn, Se o vitaminas) en las plantas para la mejora nutricional alimentaria, está surgiendo como una solución a este problema.

Actualmente, se ha desarrollado como una estrategia muy conveniente, el uso de nanopartículas híbridas orgánico-metálicas (NP) para mejorar el contenido de Zn en las plantas (Bouis y Saltzman, 2017). De hecho, las NP de Zn-quitosano se han utilizado con éxito para proporcionar Zn a las plantas en proyectos de biofortificación (Dapkekar *et al.*, 2018).

La biofortificación de cultivos alimentarios utilizando métodos de mejoramiento ofrece una opción económica a largo plazo para resolver los problemas de deficiencias a causa de micronutrientes (Younas *et al.*, 2020) y viable a corto plazo para mejorar la composición mineral de los alimentos básicos (Bouis, 2007).

2.1.4 Biofortificación con Zinc

A nivel mundial la biofortificación de cultivos de alimentos básicos para aumentar su contenido de micronutrientes tiene un enfoque de salud pública para el control de las deficiencias de Fe y Zn en los países en desarrollo (Bouis y Welch, 2010).

Se puede lograr la biofortificación agronómica aumentando la fitodisponibilidad de zinc. La estrategia de biofortificación busca aprovechar el consumo diario de determinados alimentos. Está dirigido a mujeres y los niños en particular, ya que son más propensos a la desnutrición por micronutrientes. Como consecuencia del predominio de alimentos básicos en la dieta de los pobres, esta estrategia se dirige implícitamente a los hogares (Solanki y Laura, 2018).

Las NPs de ZnO se usan en biofortificación considerándose como un nuevo fertilizante. Algunos estudios explican que el uso de NPs de ZnO, incrementa el contenido en Zn en los cultivos sin causar daño a la planta (Du *et al.*, 2019).

2.2 Fortificación

2.2.1 Fortificación con zinc

La fertilización con zinc, un micronutriente esencial, es una de las estrategias para combatir el 'hambre oculta' en una gran proporción de personas en todo el mundo. Durante la fertilización, la aplicación de grandes cantidades de micronutrientes a menudo resulta en el desperdicio de nutrientes y la contaminación del medio ambiente (Dapkekar *et al.*, 2018).

La biofortificación agronómica a través de la fertilización con Zn (también conocida como fertilización fortificada) se convierte en un método de elección para aumentar el contenido de Zn en los granos (y posiblemente el rendimiento). De hecho, en el caso de obtener genotipos con alto contenido de zinc en grano en el futuro, la biofortificación agronómica sería necesaria y relevante (Cakmak, 2008).

2.3 Fertilización

2.3.1 Fertilización foliar

En México, la fertilización foliar se practica principalmente en los estados del norte y centro en cultivos como algodón, sorgo, arroz, maíz, soya, frijol, nogal y frutales (Gooding y Davies, 1992; Medina *et al.*, 1999; Trinidad y Aguilar, 1999)

La fertilización foliar es una estrategia de fertilización complementaria (Bindraban *et al.* 2015; Fernández y Eichert 2009). Los procesos por el cual una solución de nutrientes que se aplica al follaje de un cultivo es aprovechada por las plantas incluyen: adsorción en la superficie de la hoja, penetración cuticular, adsorción y absorción en los compartimentos celulares metabólicamente activos en la hoja, y finalmente el desplazamiento y la utilización de los nutrientes absorbidos por la planta (Fernández *et al.*, 2015).

Las estrategias de fertilización foliar pueden lograr una mayor eficiencia en el uso de nutrientes, reducir el impacto negativo en el medio ambiente y potencialmente mejorar los beneficios para la salud del consumidor (Otálora *et al.*, 2018).

El efecto positivo de los fertilizantes foliares comparados con los aplicados al suelo se puede explicar por tres diferentes mecanismos. Primero, los elementos nutritivos se pueden absorber directamente a través de las hojas y transportadas a otros órganos (Gao *et al.*, 2018).

2.3.2 Factores que influyen en la fertilización foliar

Algunos factores que influyen en la respuesta a la fertilización foliar como la concentración del nutriente en la solución, el área foliar de la planta en el momento de aplicación, la absorción de los nutrientes vía foliar y su redistribución a los distintos destinos. La absorción de los nutrientes dependen también el pH de la solución y las condiciones ambientales durante la aplicación (Curretti y De Rossi, 2021).

Todo factor que modifique la conformación y espesor de la membrana cuticular tiene un efecto directo sobre la permeabilidad de las mismas, así, con el incremento de la edad de las hojas la exposición a la radiación solar y de las tensiones hídricas provocadas por la deshidratación, tiene un efecto directo en el aumento del espesor de las cutículas y en una reducción de la permeabilidad de las mismas (Salas, 2002).

Trinidad y Aguilar (2000), mencionan que para el buen éxito de la fertilización foliar es necesario tomar en cuenta tres factores, los de la planta, ambiente y formulación foliar. Las plantas y hojas jóvenes son las que tienen mayor capacidad de absorción de nutrimentos vía aspersión foliar y desde luego deben de tener un déficit de esos nutrimentos en su desarrollo.

Meléndez y Molina, (2002), menciona que la fertilización foliar por lo general se realiza para corregir deficiencias de elementos menores. En el caso de macronutrimentos tales como el nitrógeno, fósforo y el potasio, se reconoce que la fertilización foliar solo puede complementar, pero en ningún momento sustituir la fertilización. Esto se debe a que las dosis a aplicar vía foliar son muy pequeñas en comparación con las dosis aplicadas al suelo para obtener buenos rendimientos.

2.4 Zinc

2.4.1 Generalidades del zinc

El zinc está situado en el grupo 12 de la tabla periódica; es un metal de transición; es el 23 elemento más abundante de la tierra, su número atómico es 30, el símbolo es Zn, es un isótopo estable, es el 22 radioisótopo, se encuentra en 4

estados como meta estable, en el organismo su concentración es de 2 a 3 g, es el segundo oligoelemento con más concentración (Echeverry, 2012).

El zinc estimula el crecimiento y la producción de fitoalexinas desarrollando inmunidad en las plantas, logrando así fortalecer tejidos como raíces y tallos, también favorece el desarrollo floral, corrige carencias y ayuda en la prevención de enfermedades fúngicas especialmente en frutales, cítricos, cereales, entre otros (Group, 2014).

Presenta acciones antifúngicas frente a hongos, además de acarrear nutrientes como K, Ca, son anti estresantes y buena fuente de P. La acción conjunta con fungicidas y fertilizantes, especialmente foliares, es lo que recomiendan técnicos agrícolas para obtener un rendimiento apropiado (Intagri, 2016).

2.5 óxido de zinc

El óxido de zinc (ZnO) es un material semiconductor tipo II-VI, que en años recientes ha generado un gran interés debido a sus propiedades físicas (Norton *et al.*, 2004), en el desarrollo de componentes para aplicaciones optoelectrónicas. Sus propiedades ópticas y eléctricas han sido investigadas ampliamente, llegando a ser considerado en la actualidad un material optoelectrónico con cualidades muy

promisorias para utilizarse en numerosas aplicaciones tecnológicas: sensores de gas en forma de películas delgadas, varistores, láseres ultravioleta y visible, y componentes de celdas solares (Norton *et al.*, 2004; Chopra *et al.*, 1983; Dayan *et al.*, 1998; Kiriakidis y Katsakaris, 2004).

Las estructuras cristalinas que presenta el ZnO son la wurtzita, la blenda de zinc y la de sal de roca. En condiciones ambientales normales la fase más estable es la wurtzita. La estructura de blenda de zinc puede ser obtenida creciendo el ZnO sobre sustratos con estructura cristalina cúbica, y la estructura de sal de roca (NaCl) puede obtenerse a presiones relativamente altas (Üözgür *et al.*, 2005).

2.5.1 Nanopartículas de Óxido de Zinc

Reportes recientes señalan que diversas NPs metálicas mejoran significativamente el crecimiento de las plantas y tienen el potencial de ser usadas como nanofertilizantes para incrementar la productividad agrícola (Liu *et al.*, 2016).

Las NPsZnO en el sector agrícola son estudiadas por su actividad antimicrobial y por su potencial como nanofertilizantes y promotores de crecimiento (Dimkpa *et al.*, 2015). Su efecto es atribuido a que el Zn es un micronutriente esencial para el crecimiento de las plantas (Sharma *et al.*, 2012).

Las NPsZnO mejoran el crecimiento de las plantas (Liu y Lal, 2015) y mejoran la calidad de los frutos al incrementar la concentración de azúcar (Zhao *et al.*, 2014). Sin embargo, algunos otros reportes indican un efecto opuesto, ya que se ha consignado un efecto fitotóxico en diferentes plantas cultivadas (Dimpka *et al.*, 2015). Por lo mismo, se reporta que las NPs pueden tener aplicaciones como nanofertilizantes (Subramanian *et al.*, 2015), nanofungicidas (Kumar *et al.*, 2016) y antimicrobiales para la protección de los cultivos (Shende *et al.*, 2015).

Diversos estudios señalan que la aplicación de NPs metálicas como zinc han mostrado efectos significativos en la germinación de semillas y en el crecimiento de plantas (Burman *et al.*, 2013; Pandey *et al.*, 2010).

2.5.2 Estudios realizados en cultivos con aplicación de NPs

Las nanopartículas son una opción bastante prometedora debido a su tamaño, su volumen de superficie, y sus propiedades fisicoquímicas. Diversas nanopartículas tienen aplicaciones potenciales en el sector agrícola, un ejemplo de ellas son las

de óxido de cobre, las de óxido de titanio, y las de óxido de zinc (Kardos *et al.*, 2015).

Méndez *et al.* (2016) aplicaron en el cultivo de *Capsicum annuum* NPsZnO puras y con Ag al 1.25 y 2.5% en peso, fueron preparadas con una concentración de 50 mg L⁻¹ en agua desionizada y dispersadas con un sonicador Branson 2510 por 30 minutos en dos tiempos de 15 minutos. La aplicación foliar de las NPs se realizó de manera manual una vez por semana, usando 1 ml de la solución planta⁻¹ para cubrir el follaje, durante 21 días.

Pandey *et al.* (2010) aplicaron 2.0 g de NPs de óxido de zinc dispersadas en 100 ml de agua desionizada en el cultivo de *Cicer arietinum* en la cual obtuvieron una buena germinación y un aumento de raíces en las semillas.

López *et al.* (2017) mostraron que en semillas de maíz, la aplicación de NPs ZnO a 400 mg kg⁻¹ afectó la germinación y el crecimiento de la raíz y la plúmula en 40 y 47 %, respectivamente.

García, (2019) encontró un aumento de germinación de semillas, vigor de las plantas, mejor desarrollo de plúmula y radícula al aplicar 100 y 500 mg L⁻¹ de NPs de óxido de zinc en *Capsicum chinense*.

La aplicación de las NPs en la agricultura ha mejorado la germinación de diversos cultivos y las características morfológicas como es el tamaño de la raíz, esto debido a su tamaño y sus propiedades fisicoquímicas que permite ser absorbidas por las plantas con facilidad. El uso de las nanopartículas es un campo prometedor de la investigación para mejorar la productividad de los cultivos.

2.6 Características de las NPs

La NT empleando métodos emergentes se orienta a la elaboración, caracterización y utilización de materiales con dimensiones muy pequeñas (< 100 nm), con orden de magnitud de 10^{-9} , lo que significa en la escala atómica y molecular (Duran y Marcato, 2013). En este grupo de materiales se encuentran varias NPs metálicas (Zn, Fe, Cu, Ag), teniendo muchas de ellas gran potencial en la agricultura debido a que pueden ser utilizadas como nanofertilizantes (Liu y Lal, 2015).

Las propiedades de las nanopartículas varían en función de su composición, tamaño, área superficial y morfología principalmente. Para las partículas a esta escala, las leyes de la física clásica dejan de aplicarse y se rigen por las leyes de la física cuántica. Esto se debe generalmente a la mayor relación área-volumen

conforme el tamaño de la partícula se reduce, por lo tanto, son más reactivos que otro tipo de material (Rani y Kumar, 2013).

La estructura electrónica de las nanopartículas es distinta a la del material macro. En este último, los estados electrónicos son continuos (excepto en semiconductores). Sin embargo, los estados electrónicos en las nanopartículas son discretos (depende del material y del tamaño de partícula), esto trae como consecuencia un mayor número de aplicaciones en la optoelectrónica (Pizarro, 2015); Suresh, 2013).

Los análisis de espectroscopía infrarroja sirven para establecer la pureza de las nanopartículas. Estudios previos de espectroscopia IR de óxidos metálicos señalan que los enlaces entre metales y el oxígeno presentan bandas de absorción en la región debajo de 1000 cm^{-1} (Kumar y Rani, 2013).

2.7 propiedades de las Nanopartículas de zinc

2.7.1 Propiedades físicas

Los nano compuestos poliméricos presentan propiedades eléctricas, ópticas y mecánicas diferentes que los compuestos tradicionales, debido a que el menor tamaño de los rellenos implica una mayor área superficial. En particular, el ZnO se puede añadir a una matriz polimérica para aumentar su constante dieléctrica y favorecer su utilización en circuitos integrados (Cruz, 2010).

Las nanopartículas de ZnO son capaces de potenciar las capacidades físicas de los textiles convencionales, en diversas áreas como las protecciones UV y antimicrobiana (Salas *et al.*, 2015).

2.7.2 propiedades ópticas y antimicrobianas

Se reporta que las NPs pueden tener aplicaciones como nanofertilizantes (Subramanian *et al.*, 2015), nanofungicidas (Kumar *et al.*, 2016) y antimicrobiales para la protección de los cultivos Shende *et al.*, (2015).

Las NPsZnO han recibido especial importancia en la industria de los cosméticos, textiles, medicina, electrónica y en la producción de alimentos. Se ha señalado que estas NPs reducen la presencia de enfermedades por su actividad antifúngica contra *Penicillium expansum*, *Botrytis cinerea*, *Aspergillus flavus*, *Aspergillus niger*, *Aspergillus fumigatus*, *Fusarium culmorum* y *Fusarium oxysporum* (Rajiv *et al.*, 2013).

2.7.3 Fitotoxicidad de las nanopartículas de zinc

Se ha señalado que las NPsZnO mejoran el crecimiento de las plantas (Liu y Lal, 2015) y mejoran la calidad de los frutos al incrementar la concentración de azúcar (Zhao *et al.*, 2014) aunque algunos otros reportes indican un efecto opuesto, ya que se ha consignado un efecto fitotóxico en diferentes plantas cultivadas (Dimpka *et al.*, 2015; Bandyopadhyay *et al.*, 2014).

Lin y Xing (2008) señalan que la aplicación de 1000 mg L⁻¹ de NPsZnO en zacate *rye grass* (*Lolium perenne*), causa una reducción en la biomasa; al afectar el crecimiento apical de la raíz, también observaron que las células corticales y epidermales se colapsaron, indicando respuestas fitotóxicas por las NPs.

Se ha reportado que las NPsAg inducen un incremento de la longitud de la raíz, biomasa seca, mayor contenido de proteína, clorofila y carbohidratos; también inducen la activación de enzimas antioxidantes, resultando eso en una reducción de los niveles de especies reactivas de oxígeno (Salama, 2012; Sharma *et al.*, 2012) que pueden causar fitotoxicidad.

2.8 Empleo de surfactantes y adherentes

La adición de surfactantes y adherentes a la solución favorece el aprovechamiento del fertilizante foliar. El mecanismo de acción de un surfactante consiste en reducir la tensión superficial de las moléculas de agua, permitiendo una mayor superficie de contacto con la hoja; un adherente permite una mejor distribución del nutrimento en la superficie de la hoja evitando concentraciones de este elemento en puntos aislados cuando la gota de agua se evapora (Leece, 1976).

El surfactante mejora la compatibilidad de los pesticidas en el tanque de aspersión, regula el pH del agua (Edifarm, 2017). Refuerza el contacto entre el zinc y el follaje y mejora la absorción (Caione *et al.*, 2014).

El adherente es un compuesto que disminuye la tensión superficial del agua, mejorando la adherencia y dispersión de preparados acuosos de insecticidas y fungicidas. Favorece la humectación de las plantas, aumenta la resistencia de los productos al efecto de lavado causados por lluvias (Edifarm, 2017).

2.9 Cultivo de lechuga

2.9.1 Origen del cultivo

El cultivo de la lechuga tiene su origen en la India, país ubicado en Asia Central. Ha sido citada con frecuencia en la antigua mitología: “Afrodita colocó a Adonis, muerto por el jabalí, sobre un lecho de lechugas”. Algunos escritores, desde Plinio en su “Historia Natural” hasta Beatriz Potter, en sus “Tales of the Flopsy Bunnies”, hablan de sus excelentes poderes soporíferas; otros ponderan sus propiedades saludables. Según Aristóteles, hasta los dragones conocían que el jugo lechoso de la lechuga aliviaba las náuseas que sufrían en la época de primavera (Zambrano, 2014).

Pertenece a la familia: Asteraceae, Género: Lactuca, Especie: sativa (Saavedra, 2017).

2.9.2 Características botánicas

Dentro de sus características botánicas de forma general el cultivo presenta: una raíz pivotante y a su vez raíces laterales, normalmente de 4 a 8 cm, cuyas ramificaciones rara vez llegan a los 25 cm de profundidad. La longitud del tallo depende de la variedad, es cilíndrico y ramificado. La forma de las hojas, así como el color también es en función de la variedad, aunque por lo general son lanceoladas, aserrado o dentado y de borde liso. Las flores forman una inflorescencia denominada capítulo de tipo racimo, el florete tiene brácteas, pétalos amarillos o blancos y el androceo formado por cinco estambres. La semilla es pequeña con 2 a 5 mm de forma achatada y ovalada, por cada gramo hay alrededor de 500 semillas (Simbaña, 2015).

2.9.3 Producción mundial

Según FAO (2018), en el 2016 se produjeron 26.779 millones de kilos, indicando un incremento de 2.65 % respecto al año anterior. En los últimos 10 años, la producción mundial de lechuga ha aumentado en 3.073 millones de kilos (un aumento de 12.96 %). China encabeza la lista de productores de esta hortaliza, produciendo 14.928 millones de toneladas en 2016, esto quiere decir que el país asiático produjo un 55.75 por ciento del total mundial. Seguido de Estados Unidos

(4.073 millones de kilos) y por india (1.089 millones de kilos) (FAO, 2018). México es el octavo productor de lechuga con 370,066 toneladas.

2.9.4 Producción en México

La producción de lechuga en México creció 4.5 por ciento en 2020, al totalizar 539 mil toneladas de la hortaliza, superior a las 516 mil de un año previo, mientras que las exportaciones presentan una tendencia al alza (SIAP, 2020).

El cultivo se produce en 21 estados del país. Al cierre del año agrícola 2020, Guanajuato fue la principal entidad productora, con una participación de 27.3 por ciento; seguido de Zacatecas, con 17.8 por ciento, Aguascalientes con 14.8 por ciento y Puebla, con 14.2 por ciento (SIAP, 2020).

En México, la producción de lechuga permite encontrarla disponible todo el año, aunque existe mayor disponibilidad en dos periodos: de febrero a abril y de julio a agosto. Gracias al trabajo de las y los productores el país se coloca como noveno productor a nivel mundial de lechuga (SADER, 2019)

En la Comarca Lagunera la superficie sembrada de lechuga es de 20 ha, con una producción obtenida de 632 t ha⁻¹ y un rendimiento de 31.600 t ha⁻¹ (SADER, 2013).

2.9.5 Importancia nutricional del cultivo de lechuga

La lechuga es fuente de vitaminas y minerales, cuyo beneficio para el organismo es consumirla en crudo, conservando sus propiedades nutritivas (Murayama, 1977). La importancia de este cultivo es la elevada cantidad de vitamina A, llegando a alcanzar 4000 Unidades Internacionales (UI) en 100 g de hojas verdes, baja en calorías y las hojas exteriores son más ricas en vitamina C (Collazos, 1993).

La lechuga es un alimento que aporta muy pocas calorías por su alto contenido en agua y su escasa cantidad de hidratos de carbono, proteínas y grasas. En cuanto a su contenido en vitaminas, podemos mencionar presencia de vitamina C, folatos y provitamina A, contiene flavonoides, fundamentalmente quercetina, que tiene actividad antioxidante, antitrombótica y anticarcinogénica (*Moreira et al.*, 2013).

Cuadro 2.1 Composición nutricional de la lechuga

Composición nutricional

	Por 100 g de porción comestible	Por ración (100 g)	Recomendaciones día-hombres	Recomendaciones día-mujeres
Energía (Kcal)	17	13	3.000	2.300
Proteínas (g)	1,5	1,1	54	41
Lípidos totales (g)	0,3	0,2	100-117	77-89
AG saturados (g)	0,039	0,03	23-27	18-20
AG monoinsaturados (g)	0,012	0,01	67	51
AG poliinsaturados (g)	0,16	0,12	17	13
ω-3 (g)*	—	—	3,3-6,6	2,6-5,1
C18:2 Linoleico (ω-6) (g)	—	—	10	8
Colesterol (mg/1000 kcal)	0	0	<300	<230
Hidratos de carbono (g)	1,4	1,0	375-413	288-316
Fibra (g)	1,5	1,1	>35	>25
Agua (g)	95,3	160	2.500	2.000
Calcio (mg)	40	29,6	1.000	1.000
Hierro (mg)	0,6	0,4	10	18
Yodo (μg)	5	3,7	140	110
Magnesio (mg)	12	8,9	350	330
Zinc (mg)	0,3	0,2	15	15
Sodio (mg)	9	6,7	<2.000	<2.000
Potasio (mg)	240	178	3.500	3.500
Fósforo (mg)	30	22,2	700	700
Selenio (μg)	1	0,7	70	55
Tiamina (mg)	0,06	0,04	1,2	0,9
Riboflavina (mg)	0,06	0,04	1,8	1,4
Equivalentes niacina (mg)	0,6	0,4	20	15
Vitamina B ₆ (mg)	0,07	0,06	1,8	1,6
Folatos (μg)	34	25,2	400	400
Vitamina B ₁₂ (μg)	0	0	2	2
Vitamina C (mg)	12	8,9	60	60
Vitamina A: Eq. Retinol (μg)	29	21,5	1.000	800
Vitamina D (μg)	0	0	15	15
Vitamina E (mg)	0,5	0,4	12	12

(Moreiras *et al.*, 2013).

2.10 Manejo agronómico

2.10.1 Siembra

La lechuga puede tener dos tipos de siembra como directa e indirecta, respecto a la siembra indirecta, permite mejorar la densidad del cultivo, ahorrar en el costo del raleo, reducir el ciclo del cultivo en tres o cuatro semanas, evitar plantas dobles. El suelo del almácigo debe ser fértil para permitir un crecimiento vigoroso

de las plántulas y suelto para evitar daños radiculares al momento de ser retirados para su trasplante (Castagnino, 2009).

En siembra directa, si la germinación es buena se logra conseguir un cultivo más uniforme que el trasplante. Al no sufrir las plantas los efectos del trasplante, éstas quedan mejor enraizadas y logran tener una resistencia mejor a las adversidades de la falta de agua y los ataques de enfermedades (Velásquez, 2001).

2.10.2 Trasplante

Esta actividad se realiza después de dos o tres semanas de sembrar la semilla y considerando las plántulas que están conformadas por 4 o 6 hojas (Casseres, 1996). Algunos cuidados que se deben dar cuando la planta esté preparada para el trasplante, como no colocar las plantas directamente al sol y por ello el trasplante se realizaría en el día o al atardecer, otra recomendación es sumergir la bandeja en algún fungicida antes del trasplante para obtener un mejor resultado (Rodríguez *et al.*, 2001).

2.10.3 Fenología

En el cultivo de lechuga, se pueden distinguir las siguientes etapas (Enz y Dachler., 1998; García Zumel, 2013).

Plántula (7 a 14 días): desde que la germinación a la formación de las primeras hojasy el sistema de la raíz.

Crecimiento vegetativo (30 a 45 días): formación de las primeras hojas "verdaderas", donde se desarrollan las partes cosechables. Incluye la etapa de roseta, donde aparecen nuevas hojas y disminuye la relación largo-ancho de folíolos y de formación de la cabeza (cogollo), donde las hojas son más anchas que largas, curvadas por el eje de la nervadura central.

Floración y maduración: posterior a la cosecha para consumo. Se produce la elongación del tallo central y emisión de las inflorescencias.

2.10.4 Cosecha

En un campo de lechuga se comienza con la cosecha cuando la mayor parte (más del 50%) ha alcanzado el tamaño deseado y esta lo más sólido posible (Valadez, 1994). La hortaliza tiene su madurez comercial cuando cumple con ciertos aspectos como la forma, tamaño que hacen aceptable para el mercado (Araiza y Sánchez, 1995).

2.11 Nutraceuticos

Los nutraceuticos, como los alimentos funcionales y los alimentos fortificados forman parte, de manera casi segura, de nuestra alimentación diaria. Al provenir de fuentes naturales no deberían producir efectos secundarios y son los que nos protegen de enfermedades y nos ayudan a llevar una vida mejor (Cruzado y Cedrón, 2012).

Los productos alimenticios utilizados como nutraceuticos pueden ser categorizados como fibra dietética, prebióticos, prebióticos, ácidos grasos poliinsaturados, antioxidantes y otros tipos diferentes de alimentos (Das *et al.*, 2012).

La clasificación de los nutraceuticos por mecanismo de acción los separa en subgrupos según las funciones metabólicas y fisiológicas sobre las que actúan, entre ellos se pueden reconocer los agentes antioxidantes, reguladores del metabolismo lipídico, antiinflamatorios e inmunorreguladores, osteogénicos y que tienen actividad anticancerígena (González *et al.*, 2013; Balcerczyk *et al.*, 2014; Carrasco *et al.*, 2012; Lakshmana *et al.*, 2012).

Los Nutraceuticos cubren la mayoría de las áreas terapéuticas como antiartrítico, resfriado y tos, trastornos del sueño, digestión y prevención de ciertos cánceres, osteoporosis, presión arterial, control del colesterol, analgésicos, depresión y diabetes (Pandey *et al.*, 2010).

2.12 Fitoquímicos

Los fitoquímicos son los productos químicos individuales a partir de los cuales se fabrican las plantas, pueden tener efectos potentes cuando estimulan las células a través de la transmembrana del cuerpo (Briemann *et al.*, 2006).

Algunos fitoquímicos tales como los fenoles, alcoholes y bisbiguanidas son pequeñas moléculas que se ha visto pueden penetrar a la célula con facilidad. Las bacterias Gram positivas son generalmente sensibles a esta clase de agentes antimicrobianos (Rusell *et al.*, 1999).

A los componentes o ingredientes fisiológicos activos de ciertos alimentos denominados nutracéuticos o funcionales se les conoce con el término fitoquímico (Ulloa *et al.*, 2011)

Hoy en día, muchos fitoquímicos están asociados con beneficios para la salud. Ellos tienen una larga historia, que continúa en la actualidad, como medicamentos (Rouhi, 2003).

2.13 Los antioxidantes

Los antioxidantes son sustancias existentes en determinados alimentos que nos protegen frente a radicales libres, causantes de los procesos de envejecimiento y de algunas enfermedades (Luna y Delgado, 2014).

Un antioxidante dietético es una sustancia que forma parte de los alimentos de consumo cotidiano y que puede prevenir los efectos adversos de especies

reactivas sobre las funciones fisiológicas normales de los humanos (Patthamakanokporn *et al.*, 2008).

Las propiedades antioxidantes no sólo deben estudiarse por sus interacciones químico-biológicos, sino por su función en el deterioro oxidativo que afecta a los alimentos (Pasten, 2009).

Es posible que las enfermedades neurodegenerativas sean de las más estudiadas en el contexto del estrés oxidativo. Se ha advertido el aumento del deterioro de proteínas específicas por la presencia elevada de las especies reactivas del oxígeno. De igual manera en algunas zonas del cerebro ocurre la disminución de algunos metales de transición ($\text{Fe}^{+2} \rightarrow \text{Fe}^{+3}$) propias del efecto oxidativo, lo cual agrava la enfermedad. El metabolismo de glutatión, también se ve afectado lo cual se asocia con enfermedades como Parkinson, Alzheimer u otras degenerativas del sistema neurológico (Núñez, 2011). Quiñones *et al.*, (2012), abordan el efecto benéfico de los antioxidantes (polifenoles) en el daño hepático y gástrico producido por ingesta de alcohol y la protección del intestino o como coadyuvante en el tratamiento de cataratas propias de la diabetes, entre otras.

Los productos vegetales poseen una variedad de compuestos químicos que actúan como agentes antioxidantes, inhibiendo la formación y el daño producido por radicales libres, que no solo producen rancidez y pérdidas de alimentos en su almacenamiento, sino que están asociados con enfermedades crónicas como el cáncer, enfermedades cardiovasculares y están fuertemente ligados al proceso de envejecimiento (Choksi *et al.*, 2004).

2.14 Flavonoides

Flavo proviene del latín flavus y significa de color entre amarillo y rojo, como el de la miel o el del oro (Real academia, 2001) y flavonoide, se refiere a un grupo aromático, pigmentos heterocíclicos que contienen oxígeno ampliamente distribuido entre las plantas, constituyendo la mayoría de los colores amarillo, rojo y azul de las plantas y frutas (Sax *et al.*, 1993).

Los flavonoides están compuestos de dos anillos fenilos (A y B), ligados mediante un anillo pirano (C) (Andersen y Markham, 2006).

La síntesis de los flavonoides tiene lugar en las plantas a partir de unidades de acetato y aminoácidos aromáticos como la fenilalanina y la tirosina. Después, estas dos últimas, dan lugar a los ácidos cinámico y parahidroxicinámico; siendo

que al condensarse con las unidades de acetato dan origen a la estructura cinamol de los flavonoides (Grotewold, 2006).

2.15 Compuestos fenólicos

Los compuestos fenólicos tienen su origen en el mundo vegetal. Son unos de los principales metabolitos secundarios de las plantas y su presencia en el reino animal se debe a la ingestión de éstas. Los fenoles son sintetizados por las plantas y son regulados genéticamente, tanto a nivel cualitativo como cuantitativo, aunque a este nivel también existen factores ambientales (Creus, 2004).

En la naturaleza existe una amplia variedad de compuestos que presentan una estructura molecular caracterizada por la presencia de uno o varios anillos fenólicos. Estos compuestos denominados polifenoles, se originan principalmente en las plantas, que los sintetizan en gran cantidad, como producto de su metabolismo secundario. Algunos son indispensables para las funciones fisiológicas vegetales. Otros participan en funciones de defensa ante situaciones de estrés y estímulos diversos (hídrico, luminoso, etc.) (Quiñones *et al.*, 2012).

La capacidad de los polifenoles para modular la actividad de diferentes enzimas, y para interferir consecuentemente en mecanismos de señalización y en distintos procesos celulares, puede deberse, al menos en parte, a las características fisicoquímicas de estos compuestos, que les permiten participar en distintas reacciones metabólicas celulares de óxido-reducción. Sus propiedades antioxidantes justifican muchos de sus efectos beneficiosos (Quiñones *et al.*, 2012).

Los compuestos fenólicos, son beneficiosos para la salud humana y se aplican en la producción de alimentos procesados como ingredientes funcionales (Bhuyan y Basu, 2017; Shen *et al.*, 2018).

2.16 Estrés oxidativo

En bioquímica se considera oxidación a todo proceso en el que ocurre pérdida de electrones, captación de oxígeno o una cesión de hidrógeno (deshidrogenación) y reducción a aquel otro en el cual se captan electrones o se pierden oxígenos. Todo proceso de oxidación va siempre acompañado de otro de reducción. Son reacción de óxido-reducción o reacciones redox entre pares conjugados (Voet, 2006).

El estrés oxidativo se ha relacionado con el envejecimiento y enfermedades crónicas, promoviendo un alto índice de mortalidad en los últimos años. Los antioxidantes son compuestos que impiden los procesos de oxidación y, por lo tanto, retrasan o previenen el estrés oxidativo (Sánchez y Méndez, 2018).

2.17 El zinc en humanos

El zinc es un nutriente esencial para la salud humana. No hay vida sin zinc. Recientemente, la deficiencia de zinc, especialmente en infantes y niños menores de 5 años, ha recibido la atención mundial. Esta deficiencia es la quinta causa de muerte y enfermedad en los países en desarrollo (Das y Green, 2016).

Este nutriente es vital para las funciones biológicas del cuerpo humano. Un cuerpo adulto contiene entre 2 a 3 g de zinc. Está presente en todas las partes del cuerpo, incluyendo 4 órganos, tejidos, huesos, fluidos y células. Es vital para más de 300 enzimas en el cuerpo humano, activadoras del crecimiento, peso, talla y desarrollo de huesos, división celular, sistema inmunológico, fertilidad, gusto, olor y apetito, uñas y cabello y visión (Das y Green, 2016).

La disminución de los niveles de hierro y zinc puede condicionar una A B 5 mayor frecuencia de enfermedades infecciosas (como diarreica aguda e infecciones respiratorias agudas), pero también ser ocasionadas por estas (relación causal bidireccional) (Ministerio de Salud, 2013).

El zinc es vital para muchas funciones biológicas en el cuerpo humano. Un cuerpo adulto contiene 2-3 gramos de zinc, presentes en todas las partes del cuerpo, incluyendo: órganos, tejidos, huesos, fluidos y células. La ingesta diaria de zinc recomendada para una mujer adulta es de 12 mg y para un hombre adulto es de 15 mg (Iza y Latiza, 2011).

2.18 Sistemas hidropónicos

La hidroponía permite en estructuras simples o complejas producir plantas principalmente de tipo herbáceo aprovechando sitios o áreas como azoteas, suelos infértiles, terrenos escabrosos, invernaderos climatizados o no. La palabra hidroponía deriva del griego HIDRO (agua) y PONOS (labor o trabajo) lo cual significa literalmente trabajo en agua. Sin embargo, en la actualidad se utiliza para referirse al cultivo sin suelo (Beltrano y Gimenez, 2015).

La hidroponía o cultivo sin suelo es una técnica cuya importancia radica en su alta producción por metro cuadrado, gran eficiencia en el uso de agua y la multiplicidad de los cultivos compatibles que brindan a los productores una tecnología diferente de producción (Birgi, 2015).

Con esta tecnología se puede favorecer el ambiente en que se desarrolla la raíz de las plantas dado que permite mayor control en cuanto humedad, fertilidad y cambios en las propiedades fisicoquímicas y al mismo tiempo se minimiza los problemas que ocasiona el suelo, tales como la incidencia de plagas y enfermedades (Gutiérrez, 2011).

Un sistema NFT se basa en el flujo permanente de una pequeña cantidad de solución a través de caños o tuberías de los que el cultivo toma los elementos necesarios para su nutrición, requiere del suministro de un volumen de agua constante, y para ello se gasta energía en el proceso de bombeo. El sistema consta de caños de distribución, un tanque de almacenamiento de la solución, tanques de formulación y una bomba que contemple las necesidades del sistema (Sánchez y Adrián 2013).

2.19 Lechuga hidropónica

Desde el año 1994 se realizan diferentes experiencias con cultivo hidropónico en un invernadero con acondicionamiento térmico solar (Saravia *et al* 1997), la mayor parte de las experiencias se realizaron con cultivo de lechuga. El sistema de cultivo empleado es de bandejas flotantes y se escogió para las experiencias la solución nutritiva universal (considerada apta para muchas especies cultivadas) de Hoagland y Arnon (1938).

Las principales razones por lo que el cultivo hidropónico hoy en día es una de las alternativas más adecuadas para la producción de lechuga son su alta calidad nutricional, bajo costo de producción y alto nivel sanitario (Guanochanga y Betancourt, 2010).

Garzón (2006) menciona que en el Zamorano se han experimentado soluciones nutritivas para adaptación y crecimiento de lechuga, y así encontrar la mejor solución para la etapa final de este cultivo en el sistema hidropónico NFT (Nutrient Film Technique).

En el mercado internacional, la lechuga hidropónica es muy cotizada debido a las múltiples utilidades que se puede dar, desde producto alimenticio a medicinal (Tapia y Garibalde, 2015).

III. MATERIALES Y METODOS

3.1 Localización del experimento

El presente trabajo se realizó durante en el ciclo otoño – invierno del año 2019 y 2020 durante los meses de noviembre a febrero, en una malla sombra del Instituto Tecnológico de Torreón (ITT), localizado entre las coordenadas 25°36'37" Norte y 103° 22'33" Oeste, a una altitud de 1150 msnm. Ubicado en el km.7.5 de la antigua carretera Torreón-San Pedro, Municipio de Torreón, Coahuila México (Figura 3.1).



Figura 3.1 Localización del sitio experimental ubicado en el Instituto Tecnológico de Torreón

3.2 Condiciones del sitio experimental

Es experimento se llevó a cabo en una malla sombra de color blanco y antiáfidos permitiendo la entrada de luz de forma uniforme. Sus características ayudan a la prevención de los efectos del viento, reducción de la evaporación y transpiración de las plantas. Con una altura de 2.50 m. Los factores ambientales que prevalecieron al interior de la malla fueron: humedad relativa de 70 % y una temperatura de 22 °C. El sistema hidropónico consistió de una estructura de tubos de PVC de 3 pulgadas de diámetro, con una separación de 20 cm entre orificios y con una pendiente del 10%. Se usó una bomba Dúo de ½ hp Igoto Pe60 Riego.



Figura 3.2 Sistema hidropónico NFT con recirculación y aireación durante las 24 horas

3.3 Material vegetal

Se utilizaron semillas de lechuga (*Lactuca sativa*) tipo orejona de 2.0 gr con un rendimiento de 2,400 plantas y un 99% de germinación de la empresa Verde Vita®, es una hortaliza de hojas anchas frescas y crujientes, de color verde oscuro, con la superficie un poco rugosa y el nervio central muy pronunciado y lista para cosechar a los 80 a 90 días.

3.4 Tratamientos evaluados

Se utilizaron (NPsZnO) de un tamaño 25 nm con 99.8 % de pureza. Proporcionadas por la Dra. Rebeca Betancourt Galindo, investigadora del Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA).de la ciudad de saltillo Se evaluaron seis dosis crecientes: 0, 1.5, 3.0, 4.5, 6.0 y 7.5 mg L⁻¹, considerando cinco repeticiones por tratamiento. El tratamiento testigo (0 mg L⁻¹) fue considerado como control y no tuvo aplicación.

Las NPs ZnO fueron aplicadas por las mañanas entre las 8:00 am y 9:00 am, utilizando atomizadores cilíndricos transparentes de 8 oz de capacidad y con una salida de 0.14 mL. La aplicación consistió en mojar de manera homogénea todas las hojas de lechuga. La primera aplicación se realizó a los 15 días después del trasplante (ddt), posteriormente cada 15 días, acumulando un total de tres

aplicaciones durante el experimento. Se usó un surfactante y adherente INEX A no iónico con poder de humectación (penetración) y dispersión y que sirve como coadyuvante en general, este producto está diseñado para asegurar y mejorar la efectividad de los agroquímicos asperjándose donde se requiere una humectación y cobertura mayor.

Para hacer la aplicación de NPs ZnO primero se tomó una planta y se asperjo con agua para medir el gasto total y así evitar desperdiciar las NPs, posteriormente se agregó 1 cc de adherente INEX-A en un litro de agua la cual se utilizó para agregar las diferentes dosis de las NPs y aplicarlas (Figura 3.3).



Figura 3.3 Preparación de las NPs de zinc para la aplicación foliar en el cultivo de lechuga.

3.5 Diseño experimental

Los tratamientos fueron evaluados en un diseño experimental completamente al azar con seis tratamientos y cinco repeticiones, con un total de 30 unidades experimentales o plantas.

3.6 Siembra

La siembra se realizó el día 9 de noviembre del año 2019 en semilleros de foami agrícola de 196 cavidades y 3.5 cm de espesor. Es un material inerte usado en hidroponía. Se colocó una semilla en cada cavidad y se mantuvo bajo control las condiciones de germinación de la semilla (humedad, temperatura e iluminación).

(Figura 3.4)



Figura 3.4 Siembra en foami agrícola totalmente húmedo, colocando una semilla en cada cavidad

3.7 Trasplante

El trasplante se llevó a cabo cuando la plántula tenía de 6 a 7 hojas verdaderas, colocándose en los tubos de PVC, una planta en cada cavidad (Figura 3.5)



Figura 3.5 Trasplante colocando una planta en cada cavidad del sistema hidropónico dejando una cavidad bacía para que la planta se desarrollara correctamente

3.8 Manejo del cultivo

Se cuidó que las hojas sésiles estuvieran bien distribuidas en forma de espiral, el desarrollo correcto de la cabeza, al momento de hacer las aplicaciones se usó un cartón y evitar que otras plantas fueran asperjadas con dicho tratamiento así cada planta pudo ser asperjada con la dosis correspondiente, en todo el ciclo las plantas tuvieron agua con solución nutritiva y aireación durante las 24 horas (Figura 3.6).



Figura 3.6 Manejo del cultivo cuidar el desarrollo correcto de la cabeza y observación de que cada planta absorbiera agua.

3.9 Nutrición del cultivo

Para poder preparar una adecuada nutrición del cultivo, primero se realizó un análisis químico del agua y posteriormente se elaboró la solución nutritiva (Steiner, 1961). Se usaron fertilizantes siguientes: MPK, nitrato de calcio, nitrato de magnesio, nitrato de potasio, sulfato de potasio, sulfato de amonio y micros (Boro 0.9%; cobre 0.6%; Hierro 6.8%; Manganeso 2.6%; Molibdeno 0.2%; Zinc 1.1%) en la solución se aplicaron iones y cationes.

La aplicación de solución nutritiva empezó con concentración de 25%, posteriormente 50%, 75% y a los 45 días después del trasplante se aplicó el 100% hasta llegar a cosecha. La conductividad eléctrica de la solución nutritiva se manejó en 2.0 a 2.5 dSm⁻¹ y el pH de 5.5 a 5.8.

3.10 Control de plagas y enfermedades

El cultivo no fue afectado por plagas o enfermedades, ya que se aplicó de forma preventiva jabón potásico (KOH) ya que es un insecticida que se emplea para que la salud de las plantas. Acaba con los insectos que les resultan más agresivos, cómo pueden ser los pulgones, la mosca blanca, cochinillas, entre otras plagas (Figura 3.7)



Figura 3.7 Preparación de jabón potásico para ser aplicado con un atomizador en todas la plantas para prevenir plagas y enfermedades.

3.11 variables evaluadas

3.11.1 Variables agronómicas

3.11.1.1 Altura de planta

La medición de la altura de la planta se realizó al final del ciclo del cultivo; con ayuda de una cinta métrica Butterfly de 1.50 m. El resultado fue expresado en cm.

3.11.1.2 Diámetro de corona de la planta

Para el diámetro de corona se midió con una cinta métrica Butterfly de 1.50 m. El resultado fue expresado en cm.

3.11.1.3 Peso fresco de raíz

Al cosechar se cortó la raíz y se pesó en una báscula de la marca TRUPER, modelo BASE-5EP 3V los resultados fueron expresados en gramos (gr)

3.11.1.4 Peso seco de raíz

Se puso a secar la raíz durante cinco días, posteriormente se metió en un horno estufa de la marca Memmert modelo W02WVU, por 24 horas a una temperatura de 75 °C, posteriormente se pesó en una báscula de la marca TRUPER, modelo BASE-5EP 3V c.c y los resultados obtenidos fueron expresados en gr.

3.11.1.5 Volumen de raíz

Se usó un vaso de precipitado de 2000 mL, se llenó de agua hasta los 1000 mL y se sumergió la raíz y el volumen se evaluó como medida del desplazamiento (mL).

3.11.1.6 Longitud de raíz

Al momento de la cosecha se tomó la raíz y se midió de punta a punta con una cinta métrica Butterfly de 1.50 cm los datos obtenidos fueron presentados en cm.

3.11.2 Rendimiento

3.11.2.1 Biomasa verde

Al momento de la cosecha se tomó la planta de lechuga sin raíz y se pesó en una báscula de la marca TRUPER, modelo BASE-5EP 3V c.c y los resultados obtenidos fueron expresados en gr.

3.11.2.2 Biomasa seca

Se puso a secar la raíz durante cinco días, posteriormente se metió en un horno estufa de la marca Memmert modelo W02WVU, por 24 horas a una temperatura de 75 °C, posteriormente se pesó en una báscula de la marca TRUPER, modelo BASE-5EP 3V c.c y los resultados obtenidos fueron expresados en gramos (gr).

3.11.3 Calidad nutraceútica

3.11.3.1 Obtención de extractos para calidad nutraceútica

Obtención de extractos, 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 fueron colocados en agitador rotatorio (ATR Inc., EEUU) durante 24 h a 20 rpm a 5 °C. Los tubos fueron centrifugados luego a 3 000 rpm durante 5 min, y el sobrenadante fue extraído para su análisis.

3.11.3.2 Fenoles

Se determinaron utilizando una modificación del método de Folin Ciocalteu (Singleton 1999). Se usaron 30 µL del extracto se mezclaron con 270 µL de agua destilada en un tubo de ensayo, para luego añadir 1,5 mL de reactivo de Folin-Ciocalteu (Sigma-Aldrich, St Louis MO, EE.UU.) diluido (1:15) y se agitó con vortex durante 10 s. Después de 5 min se añadió 1,2 mL de carbonato de sodio (7,5 % w / v) y se agitó durante 10 s. La solución se colocó en baño de agua a 45 °C durante 15 min, y después se dejó enfriar a temperatura ambiente. La absorbancia de la solución se leyó a 765 nm en un espectrofotómetro UV (Genesys 10). Para calcular el contenido fenólico se realizó una curva de calibración utilizando ácido gálico como estándar, y los resultados se registraron en mg de equivalente de ácido gálico por 100 g en base a peso fresco (mg AGE/100 g PF).

3.11.3.3 Flavonoides

Para el contenido de flavonoides totales se utilizó la técnica descrita por Lamaison y Carnet (1990), tomando una alícuota de 250 μL del sobrenadante del extracto etanólico para luego agregar 1.25 mL de agua destilada y 75 μL de NaNO_2 al 5 % agitando en vortex la mezcla y dejando reaccionar por 5 min. Posteriormente se agregaron 150 μL $\text{AlCl}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ al 10 % agitando en vortex la mezcla dejando reaccionar por 6 min. Luego se agregaron 500 μL NaOH 1 M y 275 μL agua, agitando en vortex. La absorbancia se leyó en un espectrofotómetro UV (Genesys 10) a una longitud de onda 510 nm. Para la cuantificación de la concentración se realizó una curva patrón ($y = 0.0122x - 0.0067$; $r^2 = 0.9653$) preparada con quercetina. Los resultados fueron expresados en mg equivalentes de quercetina (QE) por 100 g en base al peso fresco ($\text{mg QE}/100 \text{ g}^{-1} \text{ PF}$).

3.11.3.4 Capacidad antioxidante

Capacidad antioxidante se determinó con el método in vitro DPPH⁺ (Brand-Williams *et al.*, 1995). Para lo cual, se preparó una solución de DPPH⁺ (Aldrich, St. Louis, Missouri, EU) en etanol, ajustando la absorbancia de la solución a $1,100 \pm 0,010$ a una longitud de onda de 515 nm. Para la determinación de la capacidad antioxidante se mezclaron 50 μ L de muestra y 1950 μ L de solución DPPH⁺, y después de 30 min de reacción se leyó la absorbancia de la mezcla a 517 nm en un espectrofotómetro UV (Genesys 10). Las lecturas se tomaron por triplicado y como blanco se utilizó etanol. Se preparó una curva estándar con Trolox (Aldrich, St. Louis, Missouri, EU), y los resultados se reportan como capacidad antioxidante equivalente en μ M equivalente en Trolox por 100 g en base peso fresco (m equiv. Trolox•100 gm⁻¹ PF).

3.11.3.5 Vitamina C

El contenido de vitamina C en fruto, se determinó por el método de titulación (Padayatt *et al.*, 2001). Se tomaron muestras de fruto en fresco de 10 g, se trituyó juntamente con 10 mL de ácido clorhídrico 2%, se filtró y se aforó a 100 mL con agua destilada en un matraz Erlenmeyer. Con 10 mL del diluido, se tituló con el 2,6 diclorofenolindofenol (1×10^{-3} N) y se determinó el contenido de vitamina C con la fórmula:

$$Vit. C (mg * 100 gPF) = \frac{(mL \text{ de } 2.6 \text{ diclorolindofenol})(0.088)(Vol. tot)(100)}{(voluen \text{ alicuota})(peso \text{ muestra})}$$

3.11.3.6 Contenido total de clorofila

El contenido de clorofila se analizó de acuerdo con el método de (Liu *et al.*, 2013). Brevemente, se homogeneizaron 0,5 g de hojas en 10 mL de etanol al 95% en mortero. El homogeneizado se centrifugó a 1500 xg durante 20 min y se recogió el sobrenadante. La absorbancia del sobrenadante recogido se midió a 665 (A₆₆₅) y 649 (A₆₄₉) nm, respectivamente. El contenido de clorofila en las hojas se calculó de acuerdo con la fórmula siguiente:

$$\text{Clorofila (a)} = 1395A_{665} - 6.88A_{649}$$

$$\text{Clorofila (b)} = 24.95A_{649} - 7.32A_{665}$$

$$\text{Clorofila (a + b)} = \text{Clorofila (a)} + \text{Clorofila(b)}$$

$$\text{Contenido de clorofila} \left(\frac{\text{mg}}{\text{g}} \text{FW} \right)$$

$$= \frac{C(a + b) * \text{Extraction del liquido (ml)} * \text{Tiempos diluidos}}{\text{Peso fresco (g)}}$$

3.11.3.7 Carotenoides

Para determinar la cantidad total de carotenoides se usó la técnica de (De Carvalho *et al.*, 2012). Se pesaron 15 g de muestra en un mortero (Bel Engineering, modelo MA0434 / 05). Para el carotenoide extracción, se realizaron sucesivas adiciones de 25 mL de acetona para obtener una pasta, que se transfirió a un embudo sinterizado (5 µm) acoplado a un matraz Buchner de 250 mL y filtrado al vacío, este procedimiento se repitió tres veces o hasta que la muestra se volvió incoloro. El extracto obtenido se transfirió a un separador de 500 mL agregando un embudo que contiene 40 mL de éter de petróleo. La acetona fue eliminada mediante la adición lenta de agua ultrapura (Milli-Q - Millipore) para evitar la formación de emulsiones. La fase acuosa fue descartada, este procedimiento se repitió cuatro veces hasta que no quedó ningún disolvente residual, luego, el extracto se transfirió a través de un embudo a un matraz aforado de 50 mL que contenía 15 g de sulfato de sodio anhidro. El volumen se compuso con éter de petróleo y las muestras se leyeron a 450 nm. El contenido total de carotenoides se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Contenido de carotenoides } (\mu\text{g/g}) = \frac{A \times V(\text{mL}) \times 10^4}{A_{1\text{cm}}^{1\%} \times P(\text{g})}$$

Donde A = Absorbancia; V = Volumen total de extracto; P = muestra peso; $A_{1\text{cm}}^{1\%}$ = 2592 (coeficiente de extinción del β-caroteno en petróleo éter).

3.11.3.8 Concentración de zinc en el tejido vegetal

Para la determinación de concentración de zinc en el tejido vegetal se usó la técnica de (McKean, 1993). Se pesaron 3 g de muestra de tejido vegetal seca y molida a 1 mm en un crisol y se incluyeron dos blancos y una muestra de referencia. Se colocaron los crisoles en una mufla y lentamente se subió la temperatura de manera de alcanzar los 600 °C. se calcinaron por 4 horas posteriormente se dejaron enfriar la mufla a temperatura ambiente, se sacaron los crisoles evitando disturbar las cenizas y se taparon, se agregaron 10 mL de ácido clorhídrico sobre el crisol con las cenizas y se dejó reaccionar, se filtró el contenido del crisol a través de papel filtro de tamaño de poro $\leq 3 \mu\text{m}$, recibiendo el filtrado en un matraz aforado de 50 mL o 100 mL, se lavó y se aforo con el filtrado se pudo determinar la concentración de zinc en la absorción atómica en un equipo GBC XplorAA.

3.12 Análisis estadísticos

Los datos obtenidos fueron analizados mediante análisis de varianza y la comparación de medias con la prueba de Tukey ($P \leq 0.5$) utilizando el paquete estadístico SAS versión 9.4 (Statistical Analysis System Institute).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Morfología de la planta

4.1.1 Altura de planta, volumen de raíz y materia seca de raíz

El análisis de varianza para altura de planta, volumen de raíz y materia seca de planta no mostraron diferencia significativa lo cual indica que la aplicación de NPs de ZnO no afectan estas variables.

El Cuadro 4.1, presenta la comparación de medias de estas variables; observándose que los tratamientos fueron numéricamente diferentes al tratamiento testigo. Para altura de planta numéricamente la aplicación de 6 mg L^{-1} fue el tratamiento más alto con una diferencia de 3.72 cm en comparación con el tratamiento testigo.

En el volumen de raíz la aplicación de 6 mg L^{-1} fue el tratamiento más alto con una diferencia de 52 cm en comparación con el tratamiento testigo.

En cuanto la materia seca de raíz no hubo diferencia estadística, sin embargo numéricamente el testigo presento el peso más bajo con una diferencia de 4.61 gramos en comparación al más alto que corresponde a la aplicación de 4.5 mg L^{-1} .

Cuadro 4.1 Comparación de medias obtenidas por efecto de NPs de ZnO en las variables ADP (altura de planta), VR (volumen de raíz) y PSR (peso seco de raíz) de lechuga cultivada en un sistema hidropónico

Tratamientos	ADP	VR	PSR
mg L-1	Cm	ml	G
0	20.70 a	154.00a	8.62 a
1.5	21.86 a	176.00a	11.25a
3	19.84 a	164.00a	9.18 a
4.5	22.70 a	190.00a	13.23a
6	23.56 a	206.00a	12.72a
7.5	22.70 a	170.00a	11.37a

*Valores seguidos de la misma literal no son diferentes (Tukey $P \leq 0.05$).

Algunos estudios realizados en diversas especies de plantas demuestran que las NPs de ZnO promueven la germinación y crecimiento de plántulas (Siddiqui *et al.*, 2014). Se ha señalado que las NPs ZnO mejoran el crecimiento de las plantas (Liu y Lal, 2015), mejoran la calidad de los frutos al incrementar la concentración de azúcar (Zhao *et al.*, 2014), algunos otros reportes indican un efecto opuesto, ya que se ha consignado un efecto fitotóxico en diferentes plantas cultivadas (Dimpka *et al.*, 2015; Bandyopadhyay *et al.*, 2014).

Zimuta *et al.* (2019) mencionan que en la aplicación de las NPs de plata disminuyen el número de macollos y el volumen de raíz. El volumen de raíz es un buen predictor del comportamiento de las plantas ya que un mayor volumen de raíz se puede interpretar como mayor tasa de supervivencia. Por lado contrario

Yoon *et al.* (2014) obtuvieron que el volumen de la raíz se redujo en un 16 % al usar 50 mg kg⁻¹ y un 87% al usar 500 mg kg⁻¹, al usar NPs de ZnO en el suelo.

Los resultados obtenidos concuerdan con Sharifan *et al.* (2019) quienes no obtuvieron impacto significativo de NPs de ZnO en la biomasa seca de raíces. Al contrario la biomasa seca de raíces promedio se redujo en un 40.3% en el presencia exclusiva de NPs de ZnO respecto con el control. Por otra parte, Rizwan *et al.* (2019) encontró que la raíz seca aumentó al aplica 50, 75 y 100 mg L⁻¹ de NPs de ZnO, respectivamente, en comparación con el control.

4.1.2 Diámetro de corona, peso fresco de raíz y longitud de raíz.

Los resultados obtenidos para las variables diámetro de corona, peso fresco de raíz y longitud de raíz mostraron diferencia estadística significativa a la aplicación de NPs de ZnO de manera foliar (Cuadro 4.2).

Se observa que la aplicación de NPs de ZnO aumentó el diámetro de la lechuga en comparación al testigo en la cual no hubo aplicación, la diferencia que se obtuvo fue de 30.6 cm.

En peso de raíz la aplicación de NPs de ZnO resulto significativa teniendo como mejor la dosis de 4.5 mg L⁻¹ dejando al tratamiento testigo con una diferencia del 37%.

La aplicación de NPs de óxido de zinc influye de manera positiva en la longitud de raíz, dejando como más bajo al tratamiento la dosis de 3 mg L⁻¹.

Cuadro 4.2 Efectos de la aplicación de NPs de ZnO en las variables DC (diámetro de corona), PFR (peso fresco de raíz) y LR (longitud de raíz) de lechuga cultivada en un sistema hidropónico

Tratamientos	DC	PFR	LR
mg L ⁻¹	Cm	g	cm
0	22.21 b	121.52 b	365.8 ab
1.5	31.89 a	164.76 ab	662.4 a
3	26.15 ab	142.36 ab	563.4 b
4.5	31.44 a	192.88 a	723.2 ab
6	31.95 a	188.88 a	885.0 a
7.5	29.79 ab	156.00 ab	669.0 ab

*Letras diferentes dentro de columnas indican valores estadísticamente diferentes (Tukey $P \leq 0.05$).

García, (2019) observo que las NPs ZnO a una concentración de 1000 mg L⁻¹ afectaron positivamente el diámetro del tallo de planta de chile habanero. Se sabe que las NPs de óxidos metálicos se translocan más eficazmente que los elementos correspondientes a nivel micro y que esta mayor capacidad de transporte existe en el xilema y en el floema (Wang *et al.*, 2012).

Rossi *et al.* (2019) mencionan que las NPs de ZnO afectaron positivamente el peso fresco (PF) de las raíces, aumentando en un 37% de raíz en comparación con el control. Por el contrario las NPs de ZnSO₄ afectaron negativamente el peso de raíz y hubo una disminución del 15%.

En estudios realizados por Narendhran *et al.* (2016) declararon que la aplicación de NPs ZnO extendió la longitud de las raíces de *Sesamum indicum* a 0.1, 0.25 y 0.5 mg L⁻¹, y en concentraciones de 1.0 y 2.0 mg L⁻¹, describen una disminución. Es difícil establecer un modelo de respuesta de los efectos de NPs ZnO en la fisiología de las plantas, ya que el efecto depende de la especie y la concentración (Lin y Xing, 2007; Arruda *et al.*, 2015).

4.2. Rendimiento

4.2.2 Peso Fresco de la Planta

Los resultados de análisis de varianza mostraron diferencia significativa por efecto de aplicación de NPs de óxido de zinc foliar en lechuga hidropónica. La aplicación de NPs de ZnO influye de manera positiva en el peso fresco de la planta, resaltando de manera significativa a los tratamientos donde se aplicó NPs de ZnO con respecto al tratamiento testigo donde no se aplicó ni un mgL⁻¹ de NPs ZnO (Figura 4.1). Los resultados coinciden con Xu *et al.* (2018) quienes mencionan que los tratamientos de NPs de ZnO, se registró un aumento significativo de biomasa fresca de planta del 6.2%, detectado para ZnO en comparación con el control.

Panwar *et al.* (2012) encontraron que la aplicación de NPs favorece el crecimiento de las plántulas de tomate a dosis de 50 mg L⁻¹ de Fe₂O₃.

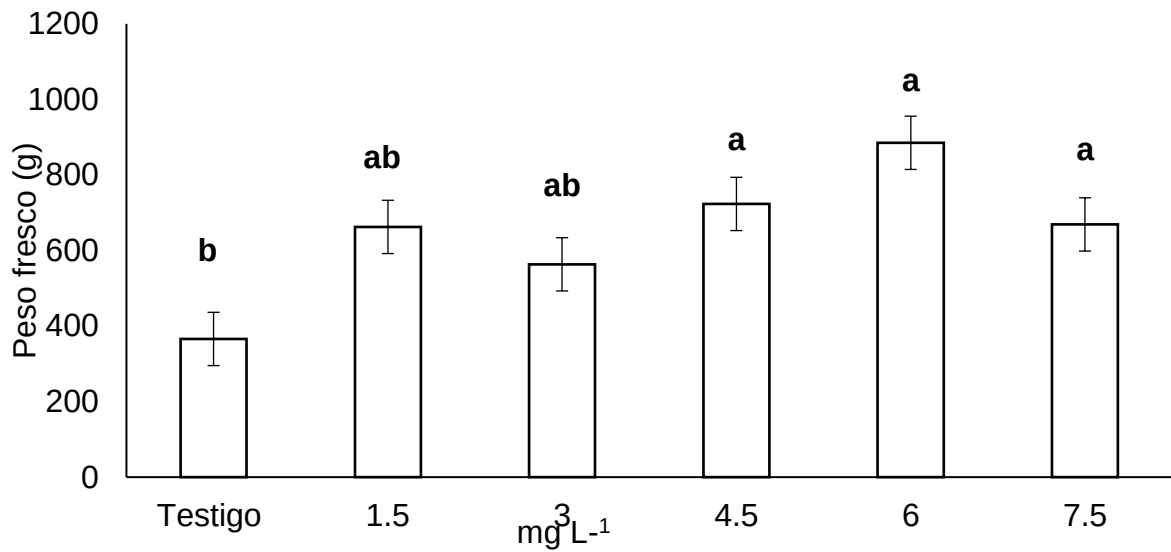


Figura 4.1 Efecto de NPs de ZnO en peso fresco de planta de lechuga cultivada en un sistema hidropónico. Letras diferentes dentro de columnas indican valores estadísticamente diferentes (Tukey $P \leq 0.05$).

4.2.3 Materia Seca de Planta

Los resultados de análisis de varianza mostraron diferencia significativa por efecto de aplicación de NPs de NPs de ZnO foliar en lechuga hidropónica. La aplicación de NPs de ZnO influye de manera positiva en el peso fresco de la planta, la aplicación de las diferentes dosis dieron un mejor resultado que el tratamiento testigo donde no se aplicaron NPs de ZnO (Figura 4.2). Estos resultados concuerdan con los reportados por Argüello *et al.* (2016) quienes encontraron que la aplicación al follaje de NPs de ZnO mezcladas con plata promovió significativamente el crecimiento y la producción de la biomasa en las plántulas de chile. Asimismo, Jayarambabu *et al.* (2014) y Panwar *et al.* (2012) señalaron una mayor producción de biomasa en plántulas de tomate cuando aplicaron 20 mg L⁻¹ de NPs de Zn. De igual forma, se ha confirmado que a bajas dosis (<50 mg L⁻¹) de NPs de Zn hay efectos significativos en el crecimiento y el desarrollo, reflejándose en un mayor contenido de biomasa (Prasad *et al.*, 2012).

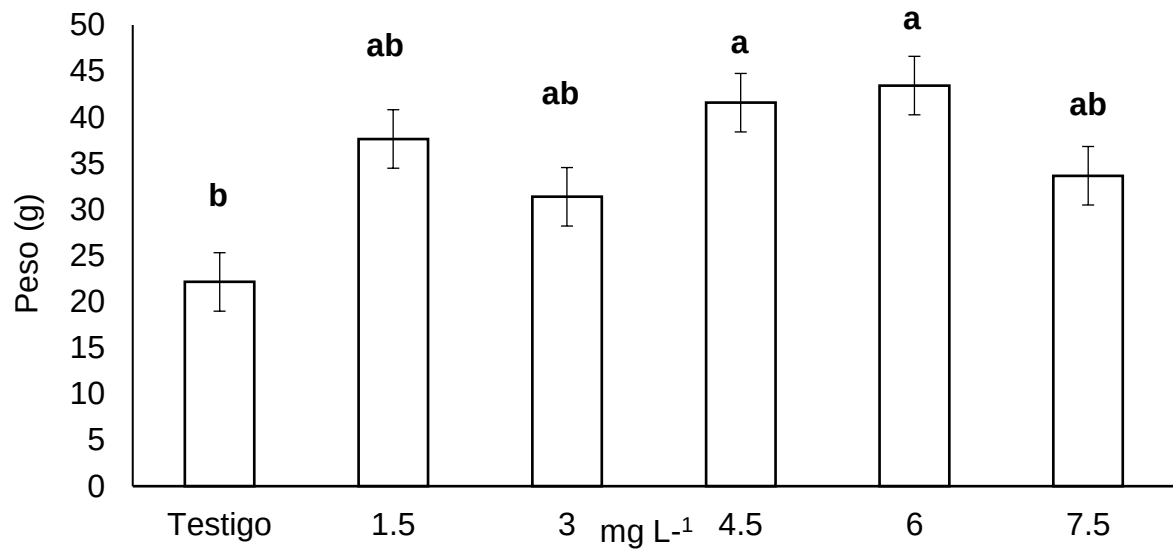


Figura 4.2 Efecto de NPs de ZnO en peso seco de lechuga cultivada en un sistema hidropónico. Letras diferentes dentro de columnas indican valores estadísticamente diferentes (Tukey $P \leq 0.05$).

4.3. Calidad Nutraceutica

4.3.1 Compuestos fenólicos

Los resultados para la variable compuestos fenólicos mostraron diferencias estadísticas significativas por efecto de aplicación de NPs de ZnO, lo que indica que la aplicación de NPs de óxido de zinc resulta una alternativa favorable para lograr el aumento en la síntesis de compuestos fenólicos en el cultivo de lechuga hidropónica. La mayor concentración se obtuvo en los tratamientos 6 y 7.5 mg L⁻¹ con 204.133 y 200.240 mg/100 g de peso fresco, respectivamente. Ambos tratamientos superaron el tratamiento testigo en un 45 y 41.1%, respectivamente (Figura 4.3). Los resultados anteriores concuerdan con Hajra y Mondal, (2017) al aplicar NPs de ZnO y TiO₂ encontraron que el contenido de fenoles varió de 11.95 a 22.41 mg g⁻¹ de peso verde para el tratamiento de nanopartículas de ZnO. Pero, con la aplicación de Nanopartículas de TiO₂, el nivel de fenoles totales varió de 10.54 a 13.53 mg de peso verde.

Najafi y Jamei, (2014) demostraron que el compuesto fenólico se puede regular bajo la influencia del medio ambiente y otras condiciones de estrés.

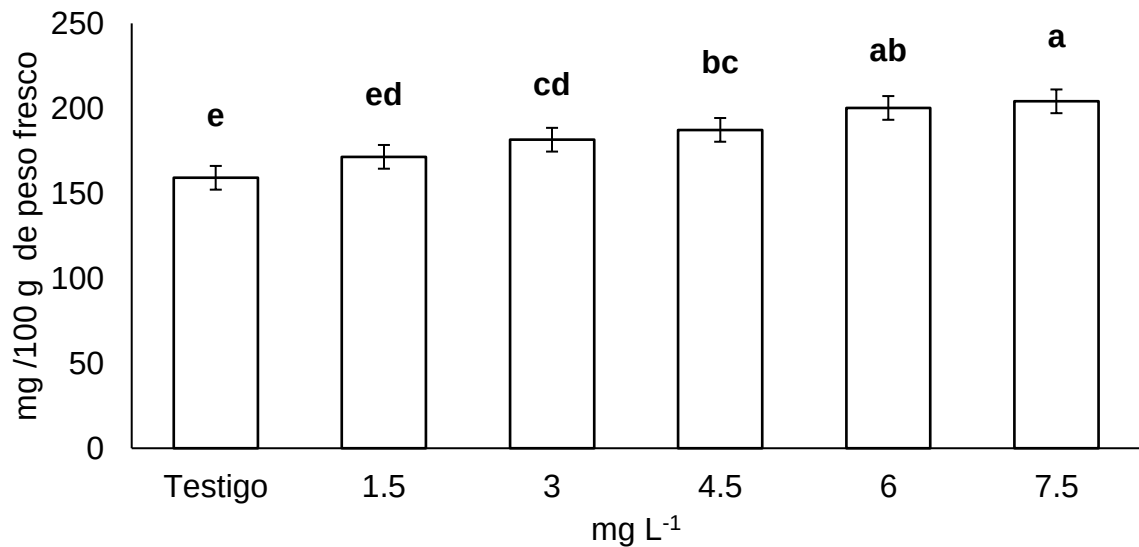


Figura 4.3 Efecto de las diferentes concentraciones de NPs de ZnO en el contenido de fenoles de lechuga cultivada en un sistema hidropónico. Letras diferentes dentro de columnas indican valores estadísticamente diferentes (Tukey $P \leq 0.05$).

4.3.2 Flavonoides

La aplicación de NPs de ZnO es una alternativa favorable para lograr el aumento en la síntesis de flavonoides en el cultivo de lechuga hidropónica. La mayor concentración se obtuvo en los tratamientos 6 y 7.5 mg L⁻¹ con 151.673 y 147.780 mg/100 g de peso fresco, respectivamente (Figura 4.5). Ambos tratamientos superaron el tratamiento testigo en un 45 y 41.1%, respectivamente.

Zafar *et al.* (2016) indican que la aplicación de NPs de ZnO indujo estrés oxidativo en los brotes de *Brassica nigra* curiosamente, observó un aumento en las

moléculas antioxidantes no enzimáticas como flavonoides debido a la acumulación de producción de especies reactivas de oxígeno (ROS). Actúan en absorción y neutralización de radicales libres, extinción de oxígeno singlete y triplete o descomposición de peróxidos. Este comportamiento explica la mayor acumulación de fenoles y flavonoides en frutos de plantas expuestas a tratamientos con NP de ZnO (Bhumi *et al.*, 2014)

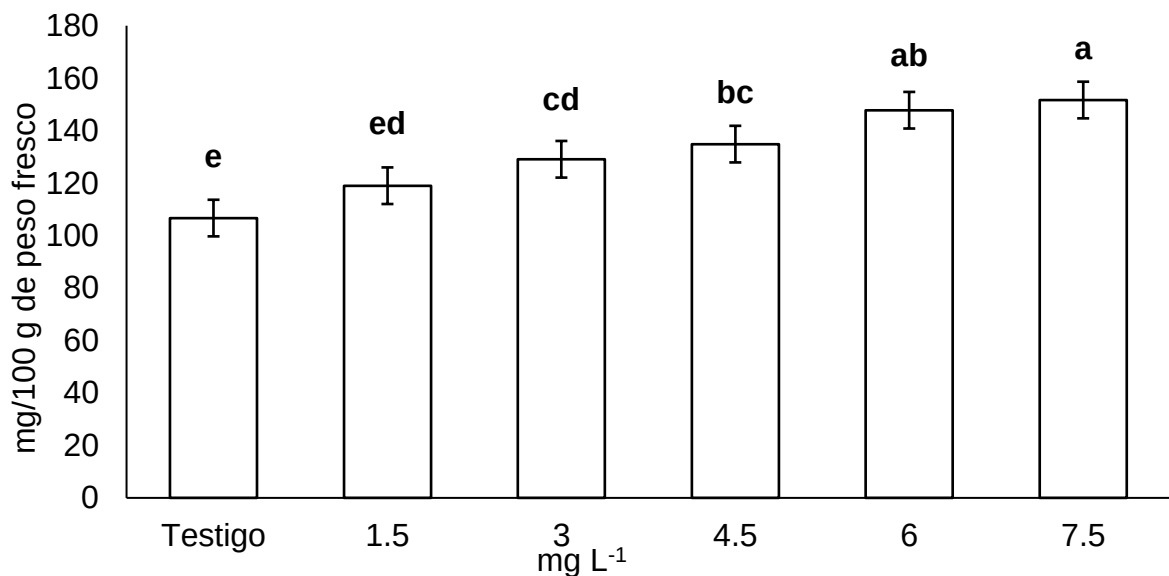


Figura 4.4 Efecto de las diferentes concentraciones de ZnO en el contenido de flavonoides de lechuga cultivada en un sistema hidropónico. Letras diferentes dentro de columnas indican valores estadísticamente diferentes (Tukey $P \leq 0.05$).

4.3.3 Capacidad antioxidante

Los resultados obtenidos mostraron diferencia significativa entre las distintas concentraciones de NPs de ZnO, siendo la dosis alta mayor 7.5 mgL^{-1} , donde se logró la mayor capacidad de antioxidante por el método de DPPH⁺ con una diferencia de $15.82 \text{ m equiv Trolox} \cdot 100 \text{ mg}^{-1} \text{ PF}$ respectivamente (Figura 4.5). La actividad de la enzima antioxidante es muy variable en las plantas según el tipo de especie, la concentración del factor estresante, la longitud de la exposición y pH (Peng *et al.*, 2015).

Uhram *et al.* (2013), aplicaron al cultivo de tomate nanopartículas de óxido de titanio (nano-TiO₂) en forma de aerosol, lo cual dio como resultado una mayor actividad antioxidante en frutos, la una concentración que usaron fue de 5000 mgkg^{-1} .

El incremento en la actividad de enzimas antioxidantes tiene como objetivo convertir el H₂O₂ en agua y oxígeno, proporcionando protección contra el daño oxidativo (García-López *et al.*, 2018). A pesar de los avances tecnológicos resulta difícil poder comprobar la capacidad antioxidante de las NPs dentro de la planta.

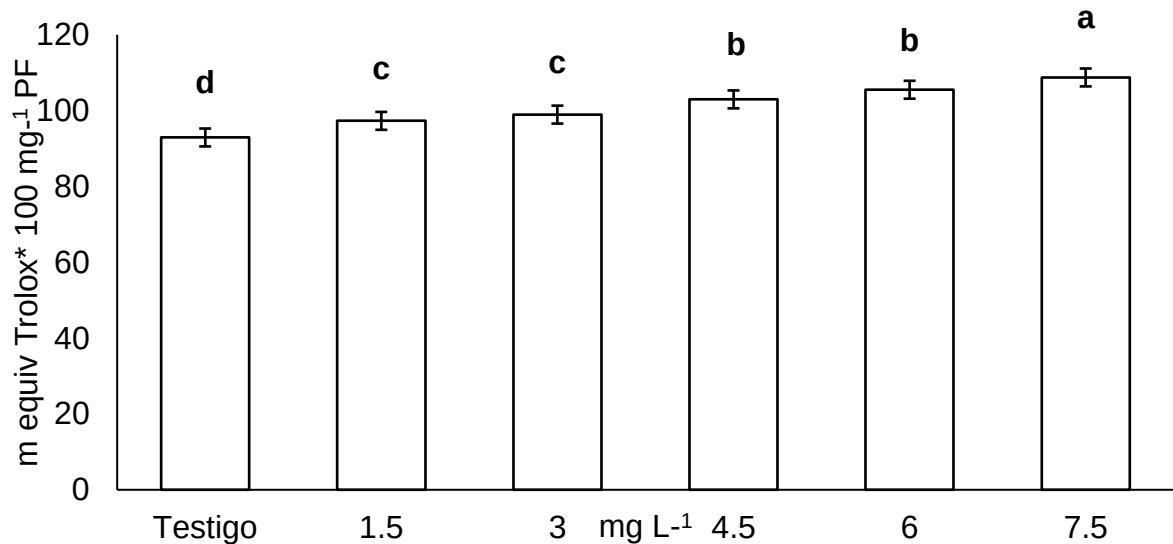


Figura 4.5 Efecto NPs de ZnO en el contenido de capacidad antioxidante en lechuga cultivada en un sistema hidropónico. Letras diferentes dentro de columnas indican valores estadísticamente diferentes (Tukey $P \leq 0.05$).

4.3.4 Vitamina C

La Figura 4.6, muestra los resultados por efecto de la aplicación foliar de NPs de ZnO en la variable vitamina C contenida en la planta de lechuga, los cuales mostraron diferencias estadísticas significativas. Estadísticamente el mejor tratamiento fue la dosis de 7.5 mg⁻¹ con 9.5 mg/100 de peso fresco superando al tratamiento testigo con 0.5%. El contenido de vitamina C incrementa de acuerdo a las dosis aplicadas.

Pérez *et al.* (2019) informaron que la aplicación foliar de NPs de Cu indujo un aumento en el contenido de vitamina C en los frutos, en comparación con los niveles obtenidos en el tratamiento control. La vitamina C es fuertemente alterado por condiciones estresantes. Para la salud humana, la vitamina C es involucrado en muchos procesos bioquímicos, y por lo tanto, la absorción de esta vitamina es necesaria para un mejor crecimiento (Wohlrab *et al.*, 2017).

Funciona principalmente en las plantas como un antioxidante y cofactor en muchas reacciones redox (Rizwan *et al.*, 2018). Puede controlar la diferenciación celular junto con otras funciones (Fenech *et al.*, 2019). Es fuertemente alterado por condiciones estresantes. Para la salud humana, la vitamina C es involucrado en muchos procesos bioquímicos, y por lo tanto, la absorción de esta vitamina es necesaria para un mejor crecimiento (Wohlrab *et al.* 2017).

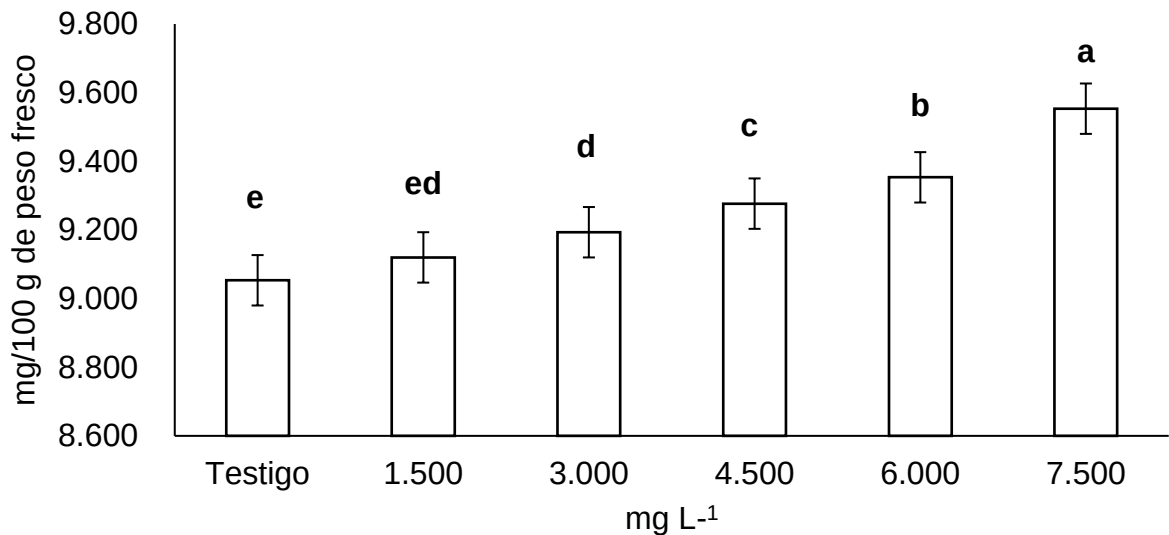


Figura 4.6 Efecto de las diferentes concentraciones de NPs de ZnO en el contenido de vitamina c en lechuga cultivada en un sistema hidropónico. Letras diferentes dentro de columnas indican valores estadísticamente diferentes (Tukey $P \leq 0.05$).

4.3.5 Clorofila

La Figura 4.7, muestra los resultados por efecto de la aplicación foliar de NPs de óxido de zinc en la variable clorofila contenida en la planta de lechuga, los cuales mostraron diferencias estadísticas significativas. Estadísticamente el mejor tratamiento fue la dosis de 7.5 mgL⁻¹ con 1.603 superando al tratamiento testigo, el contenido de clorofila fue incrementando de acuerdo a las dosis aplicadas.

Rizwan *et al.* (2019) argumentan que la aplicación de NPs solo o combinado con indicadores biológicos mejoró las concentraciones de clorofila y los parámetros de intercambio gaseoso en las hojas de maíz.

Las concentraciones de clorofila a y b aumentaron en 19, 34, 64% y 18, 43 y 67% con 50, 75, 100 mgL⁻¹ de NPs de ZnO solo y aumentó en 21, 46, 78% y 24, 54, y 72% en los mismos tratamientos de NPs con biocarga. Al aplicar las NPs sin biocarga la tasa fotosintética, la tasa de conductancia estomacal y transpiración aumentó en un 55, 50 y 25%, en comparación con el control. Raliya *et al.* (2016) informaron que las NPs de ZnO son más eficaz para promover la formación de clorofila.

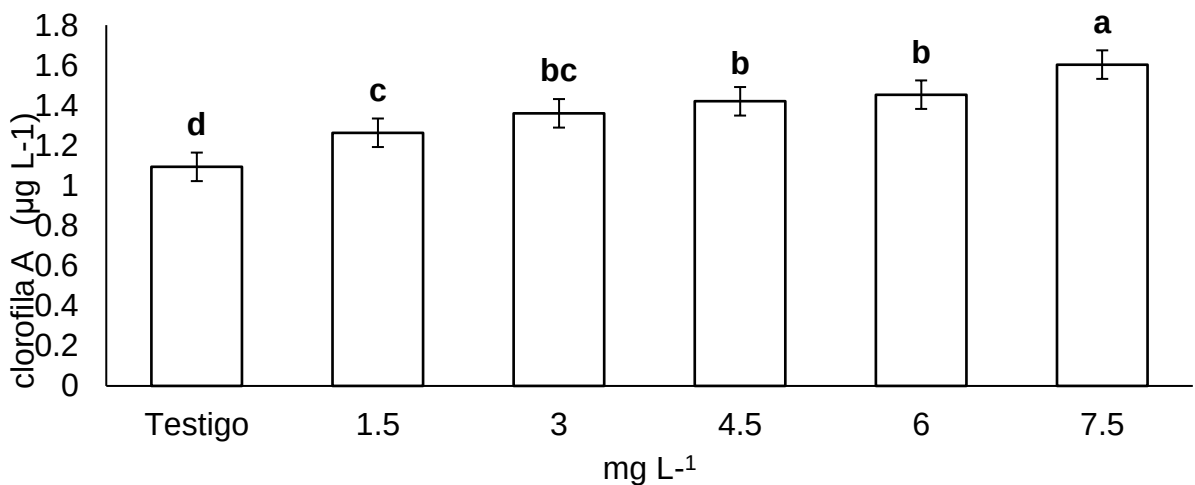


Figura 4.7 Efecto de las diferentes concentraciones de NPs de ZnO en el contenido de clorofila en lechuga cultivada en un sistema hidropónico. Letras diferentes dentro de columnas indican valores estadísticamente diferentes (Tukey $P \leq 0.05$).

4.3.6 Carotenoides

Los resultados del análisis de varianza para carotenoides mostraron diferencia significativa por efecto de la aplicación foliar de NPs de ZnO. Confirmando que las aplicaciones de NPs de ZnO en lechuga hidropónica puede ser una práctica que logre un aumento en la concentración de carotenoides. La mayor concentración de carotenoides se obtuvo con las dosis de 7.5 mg L⁻¹ con 1.96 (mg/100 g de muestra) se obtuvo una diferencia de 0.44 en comparación al tratamiento testigo (Figura 4.8). Los resultados anteriores coinciden con los de (Pullagurala *et al.*, 2018) quien mencionó que en las hojas de cilantro, el contenido relativo de clorofila y carotenoides aumentó en 41% y 37% debido a la aplicación de compuestos de Zn al suelo en concentraciones de 100 y 200 mg kg⁻¹. , respectivamente.

Según Samreen *et al.* (2017) el suministro de Zn a través de un sistema hidropónico en plantas de frijol aumentó el contenido de proteínas y minerales. Sin embargo, otros estudios han informado que el suministro de Zn al suelo con ZnSO₄ y NPs de ZnO en altas concentraciones (400-800 mg kg⁻¹) ejerció efectos nocivos sobre la acumulación de clorofilas y carotenoides en arroz, frijol y plantas de tomate (García *et al.*, 2017), debido a la toxicidad generada por la alta absorción de iones de Zn dentro de la planta (Wan *et al.*, 2020).

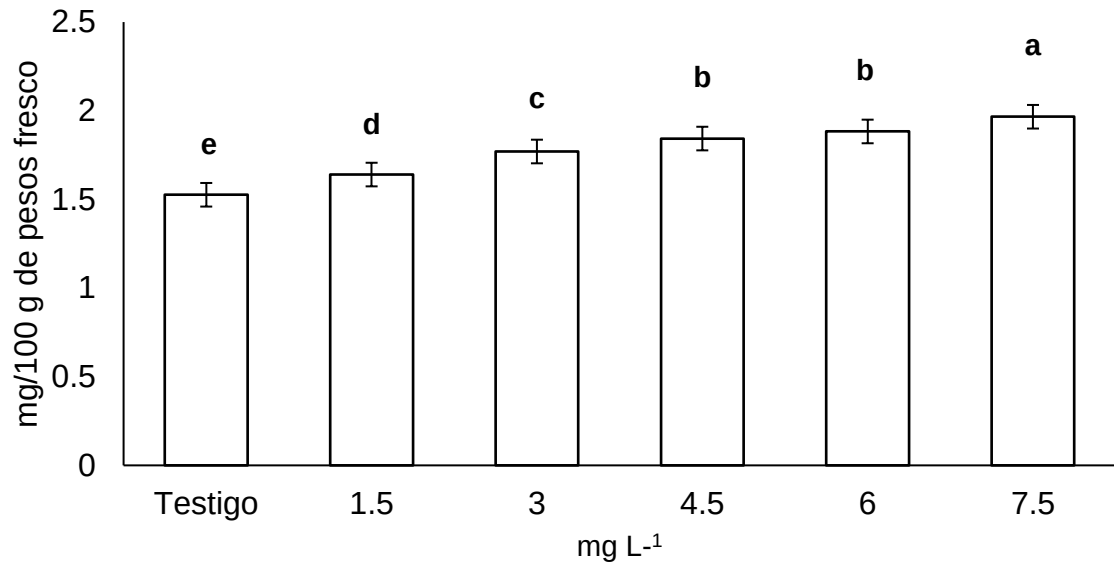


Figura 4.8 Efecto de las diferentes concentraciones de NPs de ZnO en el contenido de carotenoides en lechuga cultivada en un sistema hidropónico. Letras diferentes dentro de columnas indican valores estadísticamente diferentes (Tukey $P \leq 0.05$).

4.3.7 Concentración de zinc en el tejido vegetal

Los resultados del análisis de varianza para la concentración de Zn en el tejido vegetal se encontró diferencia significativa por efecto de la aplicación foliar de NPs de ZnO. Confirmando que las aplicaciones de NPs de ZnO en lechuga hidropónica puede ser una práctica que logre un aumento en la concentración de Zn. La mayor concentración de Zn se obtuvo con las dosis de 7.5 mgL⁻¹, con una diferencia de 23.62 mgkg⁻¹ en comparación al tratamiento testigo (Figura 4.9).

Los resultados anteriores coinciden con Liu *et al.* (2015), quienes, mencionan que la concentración de Zn aumento de manera creciente en brotes y raíces de maíz en tratamientos donde se aplicó NPs de ZnO.

Por otra parte, la aplicación NPs de ZnO mejoró las concentraciones de Zn en las plantas de trigo aplicadas a través de diferentes métodos (Hussain *et al.*, 2018; Munir *et al.*, 2018; Rizwan *et al.*, 2019).

La cantidad adecuada de Zn en las plantas es necesaria para minimizar la deficiencia de Zn en cultivos y posteriormente en humanos (Cakmak *et al.*, 2017).

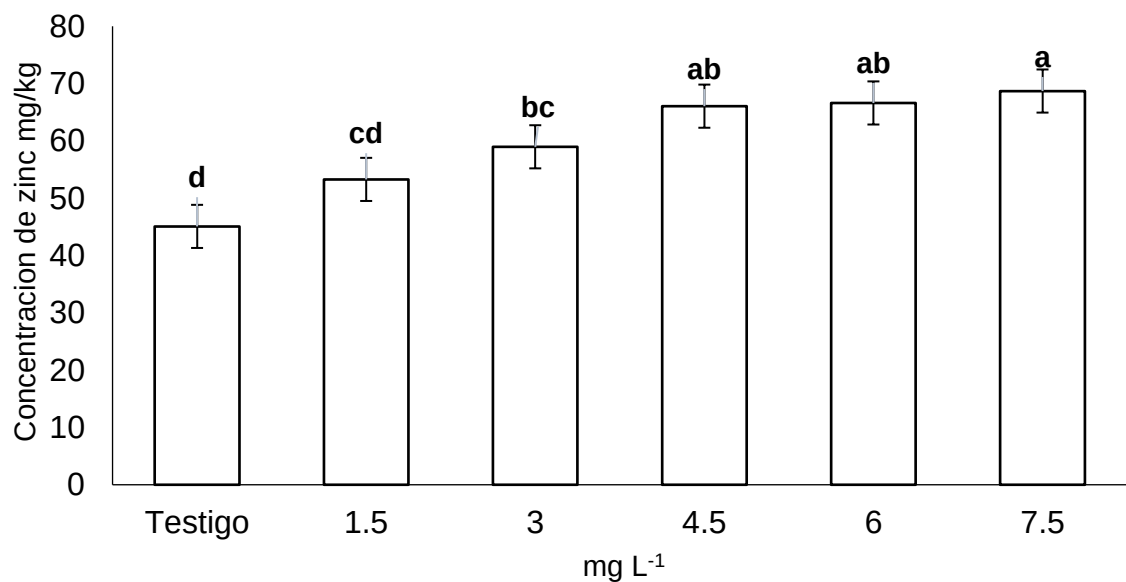


Figura 4.9 Efecto de NPs de ZnO en el contenido de concentración de zinc en el tejido vegetal de lechuga cultivada en un sistema hidropónico. Letras diferentes dentro de columnas indican valores estadísticamente diferentes (Tukey $P \leq 0.05$).

V. CONCLUSIONES

La aplicación de las diferentes dosis de NPs de ZnO aumentaron el rendimiento del cultivo de lechuga. La aplicación foliar de 7.5 mg L⁻¹ de NPs de óxido zinc en el cultivo de lechuga fue la que presento los mayores valores en la calidad nutraceútica fenoles, flavonoides, capacidad antioxidante, vitamina C, clorofila, carotenoides, además se pudo observar que las variables antes mencionadas fueron aumentando de manera proporcional a las dosis aplicadas, superando al tratamiento testigo. Las nanopartículas de ZnO mejoran la calidad nutrimental en este caso la concentración de zinc en el cultivo de lechuga hidropónica.

VII. LITERATURA CITADA

- Andersen OM, Markham KR. 2006. Flavonoids: chemistry, biochemistry and applications. Boca Raton: CRC, Taylor and Francis.
- Beltrano, J., & Gimenez, D. O. 2015. Cultivo en hidroponía. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP).
- Bhumi, G.; Ratna, N.; Savithramma, N. 2014. Screening of zinc oxide nanoparticles for cell proliferation synthesized. *Int. J. Drug Dev. Res*, 6:0975–934.
- Bhuyan DJ, Basu A. 2017. Phenolic compounds: potential health benefits and toxicity. En: *Utilisation of Bioactive Compounds From Agricultural and Food Production Waste* (Ed. Vuong QV), pp 27-59.
- Bindraban PS, Dimkpa C, Nagarajan L, Roy A, Rabbinge R. 2015. Revisiting fertilisers and fertilisation strategies for improved nutrient uptake by plants. *Biol Fertil Soils* 51:897–911.
- Birgi, A. 2015. Producción hidropónica de hortalizas de hoja. Instituto nacional de tecnología agropecuaria. Estación experimental Agropecuaria Santa Cruz. Área de producción Agrícola. Santa Cruz, Argentina.
- Bouis, H. E. & Saltzman, A. 2017. Improving nutrition through biofortification: A review of evidence from HarvestPlus, 2003 through 2016. *Global Food Security*. 12:49–58.
- Bouis, H.E., 2007. The potential of genetically modified food crops to improve human nutrition in developing countries. *Journal of Development Studies* 43:79-96.
- Bouis, H.E., Hotz, C., McClafferty, B., Meenakshi, J.V., Pfeiffer, W.H., 2011. Biofortification—a sustainable agricultural strategy for reducing micronutrient malnutrition in the global south. *Crop Science* 50,S-20.
- Bouis, H.E., Welch, R.M., 2010. Biofortification—a sustainable agricultural strategy for reducing micronutrient malnutrition in the global south. *Crop Science* 50, S-20.

- Boy,E.(Mayo de 2014).Investigación nutricional de alimentos biofortificados. *¿Que se ha logrado y hacia dónde vamos?* Guatemala. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 55:1246-69
- Brand-Williams, W.; Cuvelier, M. E. & Berset, C. 1995. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *L. W. T. Food Sci. Technol.*, 28:25-30.
- Briellmann, HL, Setzer, WN, Kaufman, PB, Kirakosyan, A. y Cseke, LJ.2006. Fitoquímicos: Los componentes químicos de las plantas. *Productos naturales de plantas*, 2:1-49.
- Burman, U., Saini, M. y Kumar, P. 2013. Effect of zinc oxide nanoparticles on growth and antioxidant system of chickpea seedlings. *Toxicological and Environmental Chemistry.* 95: 605-612.
- Caione, G., Guirra, A. P. P. M., Prado, R. D. M., & Klar, A. E. (2014). Procedimiento de descontaminación de hojas de sorgo y de café pulverizadas con zinc y un surfactante. *Agrociencia Uruguay.* 18: 12-16.
- Cakmak, I. 2008. Enrichment of cereal grains with zinc: agronomic or genetic biofortification? *Plant Soil.* 302:1–17.
- Cakmak, I., McLaughlin, M.J., White, P., 2017. Zinc for better crop production and human health. *Plant Soil.* 411: 1-4.
- Cañas, J., Long, M., Nations, S., Vadan, R., Dai, L., Luo, M., Ambikapathi, R., & Olszyk, D. 2008. Effects of functionalized and nonfunctionalized single-walled carbon nanotubes on root elongation of select crop species. *Environmental Toxicology and Chemistry.* 27: 1922-1931.
- Choksi R B, Boylston WH, Rabek JP, Widger WR. 2004. Papaconstantinou J. Oxidatively damaged proteins of heart mitochondrial electron transport complexes. *Biochim Biophys Acta.* 1688: 95- 101.
- Creus, E. G. 2004. Compuestos fenólicos.*Offarm.*23: 80-84.
- Cruz, M. M. (2010). Estudio de la influencia de la morfología de nanopartículas de ZnO en las propiedades finales de materiales compuestos (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Mar del Plata. Facultad de Ingeniería. Argentina).
- Cruzado, M., & Cedrón, J. C. 2012. Nutraceuticos, alimentos funcionales y su producción. *Revista de Química.*26: 33-36.

- Curetti, M., & De Rossi, R. P. 2021. Fertilización foliar en poscosecha. EEA Alto Valle, INTA.
- Dapkekar, A., Deshpande, P., Oak, M. D., Paknikar, K. M., & Rajwade, J. M. 2018. Zinc use efficiency is enhanced in wheat through nanofertilization. *Scientific reports*. 8: 6832.
- Das, L., Bhaumik, E., Raychaudhuri, U. y Chakraborty, R. 2012. Papel de los nutraceuticos en la salud humana. *Revista de ciencia y tecnología de los alimentos*. 49: 173-183.
- De Carvalho, L. M. J., Gomes, P. B., Godoy, R. L. de O., Pacheco, S., do Monte, P. H. F., de Carvalho, J. L. V., Ramos, S. R. R. 2012. *Total carotenoid content, α -carotene and β -carotene, of landrace pumpkins (Cucurbita moschata Duch): A preliminary study. Food Research International*. 47:337–340.
- Dimkpa, C.O., McLean, J.E., Britt, D.W. y 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.
- Du W, Yang J, Peng Q, Liang X, Mao H. 2019. Comparison study of zinc nanoparticles and zinc sulphate on wheat growth: From toxicity and zinc biofortification. *Chemosphere Elsevier Ltd*; 227: 109–16.
- Duran, N. y Marcato, P.D. 2013. Nanobiotechnology perspectives. Role of nanotechnology in the food industry: a review. *International Journal of Food Science & Technology*. 48: 1127-1134.
- Echeverry, J. A. R. 2012. Zinc y Desnutrición. *Revista Gastrohnutp Año*. 14: 59-61.
- El protocolo estandarizado se basa en los pro-protocolos y recomendaciones de Biehler (2010); Lichtenthaler and Buschmann (2001); Rodriguez-Amaya (2015); Rodriguez-Amaya et al. (2001) y Scott (2001) Elliot Simon D. et al., *Journal of Materials Chemistry*.
- Fenech M, Amaya I, Valpuesta V, Botella MA. 2019. Vitamin C content in fruits: biosynthesis and regulation. *Front Plant Sci*.
- Fernández V, Eichert T .2009. Uptake of hydrophilic solutes through plant leaves: current state of knowledge and perspectives of foliar fertilization. *Crit Rev Plant Sci* 28:36–68.

- Fernández, V., Sotiropoulos, T., and Brown, P. 2015. Fertilización foliar. *Principios científicos y prácticas de campo. Asociación Internacional de la Industria de Fertilizantes (IFA)*.
- Gao SD, Yang CY, Deng XP, Xia Y, Shen ZG, Chen YH .2018. Study on absorption and transport of K and Zn by foliar application in tobacco leaves. *J Nanjing Agric Univ.* 41:330–340.
- García López, J. I. 2019. *Respuestas fisiológicas y bioquímicas inducidas por nanopartículas de ZnO en semillas y plantas de chile habanero (Capsicum chinense Jacq)* (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León).
- García, E. 2007. *Efecto de dos soluciones nutritivas de origen orgánico (Lombricompost y Bokashi) sobre el rendimiento y calidad de la lechuga (Lactuca sativa L var. longifoliacompositae)*. (Tesis de Ingeniero agrónomo). Universidad Rafael Landívar. Guatemala.
- García-Gómez, C.; Obrador, A.; González, D.; Babín, M.; 2017 Fernández, M.D. Comparative effect of ZnO NPs, ZnO bulk and ZnSO₄ in the antioxidant defences of two plant species growing in two agricultural soils under greenhouse conditions. *Sci. Total Environ.* 589: 11–24.
- García-López, J.I.; Lira-Saldivar, R.H.; Zavala-García, F.; Olivares-Sáenz, E.; Niño-Medina, G.; Ruiz-Torres, N.A.; Méndez-Argüello, B.; Díaz-Barriga, E. 2018. Effects of zinc oxide nanoparticles on growth and antioxidant enzymes of *Capsicum chinense*. *Toxicol. Environ. Chem.* 100: 560–572.
- García Zumel, M. 2013. El cultivo de la lechuga. *En: Cultivos herbáceos intensivos. E.T.S.1. I.A.A. de Palencia, Universidad de Valladolid*, 32 pp.
- Garzón, S. 2006. Evaluación del rendimiento de tres variedades de lechuga bajo el sistema NFT (Nutrient Film Technique) de hidroponía con dos soluciones de nutrientes. (Tesis en ciencias y producción agropecuarias). Zamorano. Honduras.
- Gooding, M.J. y W.P. Davies. 1992. Foliar urea fertilization of cereals: A review. *Fert. Res.* 32: 209-222.
- Grotewold E. 2006 *The science of flavonoids*. New York: Springer.
- Guanochanga, S., & Betancourth, V. 2010. Proyecto de factibilidad para la creación de una empresa dedicada a la producción y comercialización de

- lechugas hidropónicas en la ciudad de Quito. (Tesis de Ingeniero en gerencia y liderazgo). Universidad Politécnica Salesiana, Quito.
- Gutiérrez, J. 2011. Producción hidropónica de lechuga con y sin recirculación de solución nutritiva. Tesis maestro en ciencias en horticultura. Universidad Autónoma de México. 66 p.
- Hajra, A. y Mondal, NK. 2017. *Efectos de las nanopartículas de ZnO y TiO₂ sobre la germinación, los atributos bioquímicos y morfoanatómicos de Cicer arietinum L.* *Energía, ecología y medio ambiente.* 2: 277–288.
- Herrera MP. 2011. La biofortificación del arroz con micronutrientes: una estrategia nutricional que puede ser sostenible en Cuba. *Rev Cubana Aliment Nutr.* 21: 153-8.
- Hussain, A., Ali, S., Rizwan, M., Rehman, M.Z., Javed, M.R., Imran, M., Chatha, S.A.S., Nazir, R., 2018. Zinc oxide nanoparticles alter the wheat physiological response and reduce the cadmium uptake by plants. *Environ. Pollut.* 242: 1518-1526.
- Intagri. 2017. Fosfito como Bioestimulante en la Agricultura.
- Iza y Latiza. 2011. Zinc en los fertilizantes. La contribución a la solución de un problema nutricional mundial. *Revista Fertilizar.* 21. p. 25-30.
- Kardos, J., Jemnitz, K., Jablonkai, I., Bóta, A., Varga, Z., Visy, J., Héja, L., 2015. The janus facet of nanomaterials. *Biomed. Res. Int.* 2015:317184.
- Lamaison, J. L. C. and 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.
- Leece, D.R. 1976. Composition and ultrastructure of leaf cuticles from fruit trees, relative to differential foliar absorption. *Austral. J. Plant Physiol.* 3: 833-847.
- Levenson, C. W. & Morris, D. 2011. Zinc and neurogenesis: making new neurons from development to adulthood. *Adv. Nutr.* 2:96–100.
- Lin, D. y Xing, B. 2008. Root uptake and phytotoxicity of ZnO nanoparticles. *Environmental Science and Technology*, 42: 5580-5585.

- Liu, H., Zhang, Y.-H., Yin, H., Wang, W.-X., Zhao, X.-M., & Du, Y.-G. 2013. *Alginate oligosaccharides enhanced Triticum aestivum L. tolerance to drought stress*. *Plant Physiology and Biochemistry*. 62:33-40.
- Liu, R. y Lal, R. 2015. Potentials of engineered nanoparticles as fertilizers for increasing agronomic productions. *Science of the Total Environment*. 514: 131-139.
- Liu, R., Zhang, H. y Lal, R. 2016. Effects of stabilized nanoparticles of copper, zinc, manganese, and iron oxides in low concentrations on lettuce (*Lactuca sativa*) Seed germination: Nanotoxicants or nanonutrients?. *Water, Air, and Soil Pollution*, 227: 1-14.
- López-Moreno, M. L., de la Rosa, G., Cruz-Jiménez, G., Castellano, L., PeraltaVidea, J. R., & Gardea-Torresdey, J. L. 2017. Effect of ZnO nanoparticles on corn seedlings at different temperatures; X-ray absorption spectroscopy and ICP/OES studies. *Microchemical Journal*. 134, 54-6.
- Luna-Guevara, M.L.; Delgado-Alvarado, A. 2014. Importancia, contribución y estabilidad de antioxidantes en frutos y productos de tomate (*Solanum lycopersicum L.*) *Avances en investigación agropecuaria*. 18: 51-66.
- Mathpal, B., Srivastava, P. C., Shankhdhar, D. and Shankhdhar, S. C. 2015. Zinc enrichment in wheat genotypes under various methods of zinc application. *Plant Soil & Environment*. 61:171–175.
- McKean, S. J. 1993. *Manual de análisis de suelos y tejido vegetal: una guía teórica y práctica de metodologías* (pp. 9-10).
- Medina M., M.d.C., E.J. Medina M, J.H. Aguilar P. y S.J. García G. 1999. Aspersiones foliares de manganeso y cobre en nogal pecanero. *Terra* 17: 317-323.
- Méndez, X., & Briones, E. 2007. *Producción de lechuga hidropónica para la explotación al mercado Alemán*. (Tesis de Ingeniería en Finanzas). ESPOL. Guayaquil.
- Méndez-Argüello, B., Vera-Reyes, I., Mendoza-Mendoza, E., García-Cerda, L. A., Puente-Urbina, B. A., & Lira-Saldívar, R. H. (2016). Promoción del crecimiento en plantas de *Capsicum annuum* por nanopartículas de óxido de zinc. *Nova scientia*. 8: 140-156.

- Moreiras O, Carbajal A, Cabrera L, Cuadrado C. «Tablas de composición de alimentos. Guía de prácticas». Ediciones Pirámide. 16ª edición.
- Munir, T., Rizwan, M., Kashif, M., Shahzad, A., Ali, S., Amin, N., Zahid, R., Alam, M.F.E., Imran, M., 2018. Effect of zinc oxide nanoparticles on the growth and Zn uptake in wheat (*Triticum aestivum* L.) by seed priming method. *Digest J. Nanomater. Biostructures*. 13:315-323.
- Najafi S, Jamei R. 2014. Effect of silver nanoparticles and Pb(NO₃)₂ on the yield and chemical composition of Mung bean (*Vigna radiata*). *J Stress Physio Biochem*. 10:316–325.
- Núñez, A. 2011. Terapia antioxidante, estrés oxidativo y productos antioxidantes: retos y oportunidades. *Rev Cubana Salud Pública*. 37: 644-660.
- Organización Mundial de la Salud. 2013. Administración de suplementos de Zinc y crecimiento infantil. Ian Damton Hill.
- Ortega Ruiz, D.E. 2014. Evaluación del comportamiento agronómico de genotipos de papa (*Solanum tuberosum*) con altos contenidos de hierro y zinc en dos localidades de la Sierra ecuatoriana. (Tesis de Ingeniería). Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ciencias Agrícolas, Carrera de Ingeniería Agronómica. Quito, Ecuador.
- Otálora G, Piñero MC, López-Marín J, Varó P, del Amor FM .2018. Effects of foliar nitrogen fertilization on the phenolic, mineral, and amino acid composition of escarole (*Cichorium endivia* L. var. *latifolium*).239:87–92.
- Padayatt, S. J.; Daruwala, R.; Wang, Y.; Eck, P. K.; Song, J.; Koh, W. S.; Levine, M. 2001. Vitamin C: from molecular actions to optimum intake. *In: Handbook of Antioxidants*. CADENAS, E.; PACKER, L. (eds) 2nd edition. CRC Press. Washington DC, EE.UU. pp. 117–145.
- Pandey M, Verma RK, Saraf SA. 2010. Nutraceuticals: new era of medicine and health. *Asian J Pharm Clin Res*. 3:11–15.
- Pandey, A, C., Sanjay, S. S., and Yadav, R. S. 2010. Application of ZnO nanoparticles in influencing the growth rate of *Cicer arietinum*. *Journal of Experimental Nanoscience*. 5: 448-497.
- Patthamakanokporn, O., Puwastien, P., Nitithamyong, A., Sirichakwal. P. 2008. Changes of antioxidant activity and total phenolic compounds during storage of selected fruits. *J Food Composition Analysis*. 21: 241-8.

- Peng, D., Shafi, M., Wang, Y. 2015. Efecto del estrés de Zn sobre la fisiología, el crecimiento, la acumulación de Zn y la clorofila de *Phyllostachys pubescens*. *Environ Sci Pollut Res*. 22: 14983–14992.
- Pérez-Labrada, F., López-Vargas, E. R., Ortega-Ortiz, H., Cadenas-Pliego, G., Benavides-Mendoza, A., & Juárez-Maldonado, A. 2019. Responses of tomato plants under saline stress to foliar application of copper nanoparticles. *Plants*. 8: 151.
- Pisuña Pisuña, José Manuel. 2015. Biofortificación agronómica de la papa (*Solanum tuberosum* L.) Mediante la aplicación de zinc (Zn) al suelo y follaje. Tesis de grado previa a la obtención del Título de Ingeniero Agrónomo. Carrera de Ingeniería Agronómica. Quito: UCE. 138 p.
- Pizarro, J. M. 2015. Capas electrónicas en nanopartículas. *Revista de Ciencias*, 5: 4-10.
- Pullagurala, V.L.R.; Adisa, I.O.; Rawat, S.; Kalagara, S.; Hernandez-Viezcas, J.A.; Peralta-Videa, J.R.; Gardea-Torresdey, J.L. 2018. ZnO nanoparticles increase photosynthetic pigments and decrease lipid peroxidation in soil grown cilantro (*Coriandrum sativum*). *Plant Physiol. Biochem.*132: 120–127.
- Quiñones, M., Miguel, M., Aleixandre, A. 2012. Los polifenoles, compuestos de origen natural con efectos saludables sobre el sistema cardiovascular. *Nutricion Hospitalaria*. 27: 76-89.
- Rajiv, P., Rajeshwari, S. y Venckatesh, R. 2013. Bio-Fabrication of zinc oxide nanoparticles using leaf extract of *Parthenium hysterophorus* L. and its size-dependent antifungal activity against plant fungal pathogens. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 112: 384-387.
- Raliya, R.; Tarafdar, J. C.; Biswas, P. 2016. Enhancing the mobilization of native 538 phosphorus in mung bean rhizosphere using ZnO nanoparticles synthesized by fungi. *J. 539 Agric. Food Chem.* 64, 3111-3118.
- Rani, H., & Kumar, R. 2013. Structural and Optical Characterization fo ZnO Nanopartciles Synthesized by Microemulsion Route. *International Letters of Chemistry, Physics and Astronomy*.14: 26-36.
- Real Academia Española.2001 Diccionario de la Lengua Española. 22a ed. España: Mateu cromo artes gráficas.

- Rico, C. M.; Majumdar, S.; Duarte-Gardea, M.; Peralta-Videa, J. R.; GardeaTorresdey, J. L. 2011. Interaction of Nanoparticles with Edible Plants and Their Possible Implications in the Food Chain. *J. Agric. Food Chem.* 59: 3485–3498.
- Rivera, D. J.A. 2012. Deficiencias de micronutrientos en México: un problema invisible de salud pública. *Salud pública de México.* 54: 101-102.
- Rizwan M, Ali S, Rehman MZ, Malik S, Adrees M, Qayyum MF, Alamri SA, Alyemeni MN, Ahmad P. 2019. Effect of foliar applications of silicon and titanium dioxide nanoparticles on growth, oxidative stress, and cadmium accumulation by rice (*Oryza sativa*). *Acta Physiol Plant.* 41:1–9.
- Rizwan, M., Ali, S., ur Rehman, MZ, Adrees, M., Arshad, M., Qayyum, MF, ... e Imran, M. (2019). Alivio de la acumulación de cadmio en maíz (*Zea mays* L.) mediante pulverización foliar de nanopartículas de óxido de zinc y biocarbón en suelos contaminados. *Contaminación ambiental.* 248: 358-367.
- Rojas, F. A., Pachón, H., Hyman, G. G., y Varela, A. L. 2009. Metodología para seleccionar zonas de intervención con cultivos biofortificados. *Revista Panamericana de Salud Pública.* 26: 419-428.
- Rossi, L., Fedenia, L. N., Sharifan, H., Ma, X., and Lombardini, L. 2019. Effects of foliar application of zinc sulfate and zinc nanoparticles in coffee (*Coffea arabica* L.) plants. *Plant physiology and biochemistry.* 135 160-166.
- Rouhi, A.M. 2003. Betting on natural products for cures. *Chem and Eng News* 81: 93–103.
- Rusell AD. 1999. Bacterial resistance to disinfectants: present knowledge and future problems. *Journal of Hospital Infection.* 43: 57-S68.
- Saavedra del R, G. 2017. Manual de producción de lechuga (en línea). Boletín INIA N° 09 ISSN. Santiago, Chile. Consultado 18 ago. 2019. Disponible en <http://www.inia.cl/wpcontent/uploads/ManualesdeProduccion/09%20Manual%20Lechuga.pdf>
- Salama, H.M. 2012. Effects of silver nanoparticles in some crop plants, common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and corn (*Zea mays* L.). *International Research Journal of Biotechnology.* 3: 190-197.

- Salas, G., Guerrero, V., & Rosas, N. 2015. Uso de Nanopartículas de ZnO en Tejidos de Algodón para Mejorar sus Propiedades de Protección Ultravioleta. In *Congreso de Ciencia y Tecnología*. 10: 16-21.
- Salas, R. 2002. Fertilización foliar de plantas ornamentales. Fertilización Foliar: Principios y Aplicaciones. Editores, Universidad de Costa Rica. p 67-76.
- Samreen, T.; Shah, H.U.; Ullah, S.; Javid, M. 2017. Zinc effect on growth rate, chlorophyll, protein and mineral contents of hydroponically grown mungbeans plant (*Vigna radiata*). *Arab. J. Chem.*10: 1802–1807.
- Sánchez, I., & Adrián, S. 2013. Automatización y control del sistema NFT para cultivos hidropónicos.
- Sánchez-Valle, V., & Méndez-Sánchez, N. 2018. Estrés oxidativo, antioxidantes y enfermedad. *Médica Sur*.20: 161-168.
- Sax NI, Lewis RL. Hawley. 1993. Diccionario de química y de productos químicos. 2ª ed. Barcelona: Omega
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural 2019. <https://www.gob.mx/busqueda?utf8=%E2%9C%93#gsc.tab=0&gsc.q=Produccion%20de%20lechuga%20site%3Awww.gob.mx&gsc.sort=consultado> consultado el 2 de junio del 2021.
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural <http://www.sagarpa.gob.mx/agricultura/Programas/Lists/Agendas%20ITT/Attachments/28/Coahuila.pdf> consultado mayo del 2013.
- Sharifan, H., Ma, X., Moore, J. M., Habib, M. R., & Evans, C. 2019. Zinc oxide nanoparticles alleviated the bioavailability of cadmium and lead and changed the uptake of iron in hydroponically grown lettuce (*Lactuca sativa* L. var. Longifolia). *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 7(19), 16401-16409.
- Sharma, P., Bhatt, D., Zaidi, M.G.H., Saradhi, P.P., Khanna, P.K. y Arora, S. 2012. Silver nanoparticle-mediated enhancement in growth and antioxidant status of *Brassica juncea*. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 167: 2225-2233.
- Shen S, Huang R, Li C, Wu W, Chen H, Shi J, Chen S, Ye X.2018. Phenolic compositions and antioxidant activities differ significantly among sorghum grains with different applications. *Molecules* 23: 2-15.

- Shende, S., Ingle, A.P., Gade, A. y Rai, M. 2015. Green synthesis of copper nanoparticles by *Citrus medica* Linn. (Idilimbu) juice and its antimicrobial activity. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 31: 865-873.
- SIAP 2020. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap_gobmx/AvanceNacionalSinPrograma.do Consultado 20 de junio del 2021.
- Simbaña Cuti, E. A. 2015. *Estudio del rendimiento de cuatro hortalizas producidas a partir de semillas de producción artesanal VS. Semillas importadas, en las localidades de Tumbaco-Pichincha y José Guango bajo-Cotopaxi, 2013.*
- Singleton, V.L., Orthofer R. and Lamuela-Raventos, R.m. 1999. Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of folin-ciocalteu reagent. *Methods Enzymol.* 299:152-178.
- Solanki, P., & Laura, J. S. 2018. Biofortification of crops using nanoparticles to alleviate plant and human Zn deficiency: A review. *Research Journal of life sciences, Bioinformatics Pharmaceutical and chemical sciences.* 4: 364-385.
- Subramanian, K.S., Manikandan, A., Thirunavukkarasu, M. y Rahale, C.S. 2015. Nano-fertilizers for balanced crop nutrition. In: *Nanotechnologies in Food and Agriculture* (pp. 69-80).
- Suresh, S. 2013. Semiconductor Nanomaterials, Methods and Applications: A review. *Nanoscience and Nanotechnology* 3: 62-74.
- Tapia, M., & Garibalde, E. 2015. *Respuesta de tres variedades de lechuga (Lactuca sativa L.) Con tres niveles de fertilización en producción hidropónica en la zona de Ibarra, Provincia de Imbabura* (Bachelor's thesis, Babahoyo: UTB).
- Trinidad S., A. y D. Aguilar M. 1999. Fertilización foliar, un respaldo importante en el rendimiento de los cultivos. *Terra* 17: 247-255.
- Trinidad, A., & Aguilar, D. 2000. Fertilización foliar, un respaldo importante en el rendimiento de los cultivos. *Terra Latinoamericana*, 17: 247-255
- Uhram, S., Jun, H., Waldman, B., Roh, J., Kim, Y., Yi, J., and Lee, E. J. 2013. Functional analyses of nanoparticle toxicity: a comparative study of the effects of TiO₂ and Ag on tomatoes (*Lycopersicon esculentum*). *Ecotoxicology and environmental safety*. 93:60-67.

- Ulloa, J. A., Rosas Ulloa, P., Ramírez Ramírez, J. C., & Ulloa Rangel, B. E. (2011). El frijol (*Phaseolus vulgaris*): su importancia nutricional y como fuente de fitoquímicos. *Revista Fuente* 3: 5-9
- Uscategui, R. (2011) *Perspectivas en Nutrición Humana*.13: 119-120.
- Voet, D., y Voet, J. G. 2006. *Bioquímica*. Ed. Médica Panamericana.
- Wan, J.; Wang, R.; Bai, H.; Wang, Y.; Xu, J. 2020. Comparative physiological and metabolomics analysis reveals that single-walled carbon nanohorns and ZnO nanoparticles affect salt tolerance in *Sophora alopecuroides*. *Environ. Sci. Nano*. 7:2968–2981.
- Wang Z, Xie X, Zhao J, Liu X, Feng W, White JC, Xing B. 2012. Xylem-and phloembased transport of CuO nanoparticles in maize (*Zea mays* L.). *Environmental Science & Technology*. 46:4434–4441.
- Wohlrab C, Phillips E, Dachs GU. 2017. Vitamin C transporters in cancer: current understanding and gaps in knowledge. *Front Oncol* 7: p 74.
- Xu, J., Luo, X., Wang, Y., & Feng, Y. 2018. Evaluation of zinc oxide nanoparticles on lettuce (*Lactuca sativa* L.) growth and soil bacterial community. *Environmental Science and Pollution Research*.25: 6026-6035.
- Yoon, S.-J., Kwak, JI, Lee, W.-M., Holden, PA y An, Y.-J. 2014. Las nanopartículas de óxido de zinc retrasan el desarrollo de la soja: un estudio estándar de microcosmos del suelo. *Ecotoxicología y seguridad ambiental*.100: 131-137.
- Younas A, Sadaqat HA, Kashif M, Ahmed N, Farooq M. 2020. Combining ability and heterosis for grain Iron biofortification in bread wheat. *J. Sci. Food Agric*. 100: 1570–6.
- Zafar, H.; Ali, A.; Ali, J.S.; Haq, I.U.; Zia, M. 2016. Effect of ZnO nanoparticles on *Brassica nigra* seedlings and stem explants: Growth dynamics and antioxidative response. *Front. Plant. Sci*. 7: p 535.
- Zhao, L., Sun, Y., Hernandez, V.J., Servin, A.D. Hong, J., Niu, G., Peralta, V.J., Duarte, G.M. y Gardea, T.J. 2014. Influence of CeO₂ and ZnO nanoparticles on cucumber physiological markers and bioaccumulation of Ce and Zn: A life cycle study. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61: 11945-11951.