

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISION DE INGENIERIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO



Evaluación de Nanopartículas de CuO y ZnFe₂O₄ para Mitigar el Estrés

Salino en el Cultivo de Fresa (*Fragaria mexicana*)

POR:

JOSELIN ESCOBEDO RODRÍGUEZ

TESIS

Presentada como Requisito Parcial para Obtener el Título de:

INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

Diciembre 2024

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO

Evaluación de Nanopartículas de CuO y ZnFe₂O₄ para Mitigar el
Estrés Salino en el Cultivo de Fresa (*Fragaria mexicana*)

Por:

JOSELIN ESCOBEDO RODRÍGUEZ

Tesis

Presentada como Requisito Parcial para Obtener el Título de:
INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL

Aprobada por el comité de asesoría:



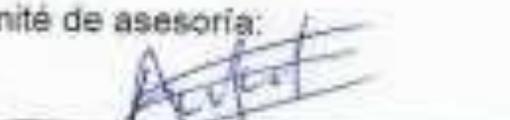
M.C. Etalberto Cortez Quevedo

Asesor Principal Interno



Dr. Agustín Hernández Juárez

Coasesor



Dr. Arturo Isaias Martínez Enríquez

Asesor Principal Externo



Dr. Víctor Samuel Peña Olvera

Vocal suplente

Saltillo, Coahuila, México

Diciembre 2024

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO

Evaluación de Nanopartículas de CuO y ZnFe₂O₄ para Mitigar el
Estrés Salino en el Cultivo de Fresa (*Fragaria mexicana*)

Por:

JOSELIN ESCOBEDO RODRÍGUEZ

Tesis

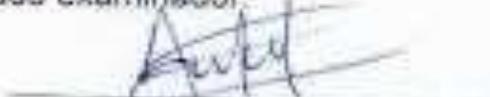
Presentada como Requisito Parcial para Obtener el Título de:

INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL

Aprobada por el jurado examinador:


M.C. Eitelberto Cortez Quesvedo

Asesor Principal Interno


Dr. Arturo Iselas Martínez Enriquez

Asesor Principal Externo


Dr. Agustín Hernández Acárcz

Coasesor


Dr. Víctor Samuel Peña Olvera

Vocal suplente




M.C. Sergio Sánchez Martínez

Coordinador de la División de Ingeniería

Buenavista, Saltillo Coahuila, México

Diciembre 2024

Declaración de no plagio

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

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

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

Autor principal



Joselin Escobedo Rodríguez

AGRADECIMIENTOS

A DIOS: Gracias Dios por darme fuerza todos estos años lejos de casa, por ser la guía que dirige e ilumina mi camino, gracias por rodearme de gente que fue un apapacho en el corazón.

A MI ALMA MÁTER, A LOS BENEFACTORES ANTONIO NARRO RODRÍGUEZ Y TRINIDAD NARRO RODRÍGUEZ: Por brindarme mi formación académica y por todos los conocimientos que obtuve tanto en aulas como en campo, gracias por el amor al campo mexicano que nos une, gracias por ser un hogar para mí todos estos años y por enseñarme el sentido de pertenencia.

A MIS ASESORES DE TESIS: M.C. Etelberto Cortez Quevedo, Dr. Arturo Isaías Martínez Enríquez, Dr. Agustín González Juárez, Dr. Víctor Samuel Peña Olvera y a la Dra. Rosa María Paredes Camacho, por brindarme la confianza de realizar este trabajo además de compartirme sus conocimientos y ayudarme a resolver las dudas que me surgían mientras aprendía. Gracias porque sembraron una semilla de inspiración para seguir preparando mi camino académico.

DEDICATORIA

A mi mamá Patricia Liliana Rodríguez Hernández: Mi inspiración y el amor más grande, gracias por todo el esfuerzo que realizas para que nosotros podamos salir adelante, el apoyo y el gran amor que me tienes, gracias por confiar en mí, por ser mi guía además de siempre estar a mi lado y acompañarme al otro lado del país para que yo pueda realizarme como persona, gracias por jamás dudar de mí, eres inspiración porque siempre me has enseñado, a ser valiente y a trabajar por lo que queremos. Te amo mucha mamá.

A mis hermanos Michel y Eduardo Escobedo Rodríguez: Gracias por todo su apoyo, estoy orgullosa de ser su hermana, los amo mucho, siempre los llevo en mis pensamientos.

A mi sobrino Ángel David Ramírez Escobedo: Mi chiquis que tanto quiero, eres mi motivación y una parte de mi fortaleza, gracias por alegrarme con tus locuras, siempre te llevo en mi corazón gracias por llegar a nuestras vidas.

A mis abuelos Silvia Márquez, Javier Escobedo, Ofelia Hernández y Adolfo Rodríguez: Soy muy bendecida por tenerlos en mi vida hasta esta edad, gracias porque sé que sus bendiciones me han cuidado toda la vida, los amo y les agradezco el amor que me brindan.

A mi familia: Gracias por su apoyo y alegría, los quiero mucho y los llevo en mi corazón. Los quiero mucho, tía Vero, tío Manuel, tía Mary, tía Yesi, tío Jesús, Tío Oscar, a sus hijos, Dani, Silvia, Emmanuel, Fanny, Axel, Ever, Iker, Bri, Ximena, Alexis

A mi amiga Carla V: La distancia no fue impedimento para estar presente, gracias por siempre escucharme y aconsejarme, te quiero demasiado.

A mis amigas y amigos: Pamela, Lizbeth, Claudia, Dalay, Karen, Brisa, Neri, Carlos, Luis: Le agradezco tanto a la vida por coincidir con gente tan noble y linda como ustedes, muchas gracias por ser mi compañía, por ayudarme a regar, acompañarme en el laboratorio o invernadero, gracias por alegrarse cuando tuve mis

primeras fresas, ustedes se convirtieron en una familia donde todos nos preocupábamos por el bienestar del otro. Los quiero muchísimo, su alegría siempre me contagio y me motivó a no rendirme, siempre voy a recordar nuestras reuniones llenas de risa, canto y baile.

Deseo que siempre les vaya bien, le pido a Dios que les regrese todo lo bueno que han hecho por mí, cada uno tiene un brillo distinto el cual admiro, además, aprendí tanto de ustedes que de verdad no quisiera alejarme nunca, los quiero y siempre los llevo en mi corazón.

A Miguel Z: Gracias por estar presente y apoyarme en todo momento, te quiero mucho.

ÍNDICE

ÍNDICE.....	1
ÍNDICE DE CUADROS.....	4
ÍNDICE DE FIGURAS.....	5
RESUMEN.....	6
ABSTRACT.....	7
I. INTRODUCCIÓN.....	8
II. JUSTIFICACIÓN.....	10
III. OBJETIVOS.....	11
3.1. Objetivo general.....	11
3.2. Objetivos específicos.....	11
IV. HIPÓTESIS.....	12
V. REVISIÓN DE LITERATURA.....	13
5.1 Importancia económica.....	13
5.2. Producción mundial.....	13
5.3. Producción nacional.....	14
5.4. Generalidades del cultivo.....	14
5.4.1. Origen.....	14
5.4.2. Clasificación taxonómica.....	15
5.4.3. Descripción morfológica.....	15
5.4.4. Etapa fenológica.....	16
5.4.5. Marco de plantación.....	17
5.4.6. Requerimientos hídricos.....	18
5.4.7. Fertilización en sustrato.....	18
5.4.8. Temperatura.....	18
5.4.9. Radiación.....	19
5.4.10. Podas.....	19
5.4.11. Principales plagas y enfermedades.....	19
5.4.11.1. Plagas.....	20

5.4.11.2. Enfermedades	20
5.5. Impacto del estrés biótico en la agricultura.....	20
5.6. Impacto del estrés abiótico en la agricultura.....	20
5.6.1. Estrés salino	21
5.6.2. Clasificación de los cultivos a la salinidad	21
5.7. Tecnologías en la agricultura para mitigar el estrés.....	23
5.7.1. Nanotecnología.....	24
5.7.2. Aplicaciones de la nanotecnología en la agricultura	24
5.7.2.1. Nanofertilizantes	25
5.7.2.2. Nanosensores.....	26
5.7.2.3. Nanoplaguicidas	26
5.7.3. Nanopartículas metálicas en la agricultura	27
5.7.3.1. Nanopartículas de CuO	28
5.7.3.2. Nanopartículas de zinc-ferrita	28
VI. MATERIALES Y MÉTODOS.....	30
6.1. Ubicación del experimento	30
6.2. Material vegetal utilizado	30
6.3. Muestreo de sustrato para determinar pH y CE.....	31
6.4. Establecimiento del cultivo	31
6.4.1. Riego y nutrición	31
6.4.2. Podas Realizadas.....	32
6.4.2.1. Poda de hojas.....	32
6.4.2.2. Poda de estolones	32
6.4.2.3. Poda de flores.....	33
6.4.3. Cosecha	33
6.4.4. Manejo de plagas y enfermedades.....	33
6.4.5. Selección de tratamientos	34
6.4.6. Aplicación de los tratamientos	34
6.4.7. Variables de respuesta	35
6.4.7.1. Bioquímicas	35
6.4.7.2. Agronómicas.....	35

6.5. Diseño estadístico	36
VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	37
7.1. Variables agronómicas	37
7.1.1. Rendimiento	37
7.1.2. Número de frutos	38
7.1.3. Número de coronas	40
7.1.4. Biomasa seca total	42
7.1.5. Longitud de raíz	43
7.2. Variables bioquímicas.....	45
7.2.1. Contenido de savia y °Brix.....	45
VIII. CONCLUSIONES.....	47
IX. LITERATURA CITADA	48

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Producción y exportación mundial del cultivo de fresa	13
Cuadro 2. Interpretación de conductividad eléctrica (Diario Oficial de la Federación, 2002)	23
Cuadro 3. Tolerancia de cultivos y potencial de rendimiento de cultivos influenciador por la salinidad de riego aplicado (Ayers & Westcot, 1989).	23
Cuadro 4. Relación de concentraciones (meq/L) para aniones y cationes (Steiner, 1984).	32
Cuadro 5. Tratamientos aplicados para determinar su efecto en plantas de fresa var. San Andreas mediante la asperción foliar.....	34
Cuadro 6. Efecto de la aplicación de manera foliar de NPs de óxido de cobre y ZincFerrita en fresa sometida a estrés salino para la variable longitud de raíz.	44
Cuadro 7. Efecto de la aplicación de manera foliar de NPs de óxido de cobre y ZincFerrita en fresa sometida a estrés salino para la variable contenido de grados brix, calcio, nitrato y potasio en fruto	46

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de la planta de fresa, adaptado de Strand (1994).	16
Figura 2. Mapa agrícola de afectación por salinidad en Mexico (SADER, 2021).	22
Figura 3. Aplicaciones de la nanotecnología en la agricultura.	27
Figura 4. Imagen satelital del departamento de ciencias del suelo e invernaderos	30
Figura 5. Efecto de la aplicación de manera foliar de NPs de óxido de cobre y ZincFerrita en fresa sometida a estrés salino para rendimiento de frutos	38
Figura 6. Efecto de la aplicación de manera foliar de NPs de óxido de cobre y ZincFerrita en fresa sometida a estrés salino para la varibale número de frutos	39
Figura 7. Efecto de la aplicación de manera foliar de NPs de óxido de cobre y ZincFerrita en fresa sometida a estrés salino para la varibale número de coronas	41
Figura 8. Efecto de la aplicación de manera foliar de NPs de óxido de cobre y Zinc-Ferrita en fresa sometida a estrés salino para la varibale biomasa total	43

RESUMEN

El estrés salino es uno de los principales factores que limitan la productividad agrícola, afectando una amplia gama de cultivos y regiones. En este contexto, la bioestimulación de los tejidos vegetales se presenta como una alternativa viable para reducir los efectos adversos del estrés salino. La nanotecnología agrícola ha emergido como una herramienta innovadora que optimiza el uso de recursos, como el agua, y minimiza la aplicación de insumos tradicionales. Las nanopartículas han demostrado ser efectivas en la bioestimulación de los tejidos vegetales, mejorando su desarrollo fisiológico y bioquímico bajo condiciones de estrés. El presente estudio tuvo como objetivo evaluar el efecto antiestrés y el comportamiento vegetativo del cultivo fresa, variedad San Andreas, sometido a nanopartículas aplicadas de manera foliar en condiciones de salinidad controlada. Se evaluaron nanopartículas de zinc-ferrita ($ZnFe_2O_4$) y de óxido de cobre (CuO) en concentraciones de 750 y 1500 $mg \cdot L^{-1}$, bajo dos niveles de conductividad eléctrica (1.5 y 2.5 dS/m^{-1}). El diseño experimental fue de bloques completamente al azar, con un total de 9 tratamientos y 5 repeticiones, dando un total de 45 unidades experimentales. Los datos obtenidos se analizaron mediante el programa estadístico Infostat, utilizando la prueba de comparación de medias Duncan $\alpha \leq 0.05$. El ciclo del cultivo fue de 303 días, con aplicaciones foliares de las nanopartículas cada quince días, con un total de 19 aplicaciones. El inicio de aplicaciones foliares comenzó a los 38 días después del trasplante, mientras que el aumento en la salinidad se implementó a los 45 días. Las variables evaluadas fueron: rendimiento de frutos, número de frutos, número de coronas, biomasa aérea, longitud de raíz, concentración de iones en savia y el contenido de °Brix en fruto. Los resultados indican diferencias estadísticas significativas donde el tratamiento T7 (CuO [750] con CE 2.5 dS/m) obtuvo el mayor número de frutos, el tratamiento T5 (CuO [1500] con CE 1.5 dS/m) arrojó el mayor número de coronas y el T6 ($ZnFe_2O_4$ [750] con CE 2.5 dS/m) obtuvo el mayor contenido de °Brix, por lo tanto, se concluye que la respuesta de la fresa varía según la combinación de nanopartículas y niveles de salinidad, destacando la necesidad de ajustar dosis y condiciones.

Palabras clave: Nanopartículas, Óxido de cobre, Zinc-ferrita, Estrés, Salinidad.

ABSTRACT

Evaluation of foliar Application of nanoparticles in strawberry cultivation under controlled salinity stress. Saline stress is one of the main factors limiting agricultural productivity, affecting a wide range of crops and regions. In this context, the biostimulation of plant tissues emerges as a viable alternative to reduce the adverse effects of saline stress. Agricultural nanotechnology has emerged as an innovative tool that optimizes resource use, such as water, and minimizes the application of traditional inputs. Nanoparticles have proven to be effective in the biostimulation of plant tissues, enhancing their physiological and biochemical development under stress conditions. The present study aimed to evaluate the anti-stress effect and vegetative behavior of nanoparticles applied foliarly on strawberries, specifically the San Andreas variety, under controlled salinity conditions. Zinc-ferrite (ZnFe_2O_4) and copper oxide (CuO) nanoparticles were evaluated at concentrations of 750 and 1500 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ under two levels of electrical conductivity (1.5 and 2.5 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$). The experimental design was a completely randomized block design, with a total of 9 treatments and 5 replications, resulting in 45 experimental units. Data obtained were analyzed using the Infostat statistical program, employing Duncan's multiple range test at $\alpha \leq 0.05$. The crop cycle lasted 303 days, with foliar applications of nanoparticles every fifteen days, for a total of 19 applications. Foliar applications began 38 days after transplanting, while salinity levels were increased 45 days post-transplant. The variables evaluated included: fruit yield, number of fruits, number of crowns, shoot biomass, root length, ion concentration in sap, and °Brix content in fruits. The results indicated that treatment T7 (CuO [750] with EC 2.5 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$) achieved the highest number of fruits, treatment T5 (CuO [1500] with EC 1.5 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$) showed the highest number of crowns, and T6 (ZnFe_2O_4 [750] with EC 2.5 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$) obtained the highest °Brix content. Therefore, it can be concluded that the strawberry response varies depending on the combination of nanoparticles and salinity levels, highlighting the need to adjust doses and conditions to optimize yield.

Keywords: Nanoparticles, Copper oxide, Zinc-ferrite, Stress, Salinity.

I. INTRODUCCIÓN

La variabilidad ambiental induce factores de estrés en las plantas, afectando su supervivencia y desarrollo (Varela 2010). Estos factores pueden actuar positivamente, generando mecanismos para la perpetuación de la especie (Lichtenthaler, 1988). El estrés se define como el conjunto de respuestas fisiológicas y bioquímicas ante condiciones que exceden la estabilidad óptima del organismo, afectando su crecimiento (Kozlowski y Pallardy, 1997). Los factores de estrés pueden ser abióticos (físicos, químicos, ambientales) y bióticos, al mismo tiempo en eu-estrés, que es beneficioso, y dis-estrés, que tiene efectos negativos en el crecimiento y desarrollo de las plantas (Lichtenthaler, 1988; Varela, 2010).

El estrés abiótico es uno de los mayores retos en la agricultura moderna, ya que disminuye el rendimiento y causa pérdidas económicas representativas (Almeida *et al.*, 2017; Godoy, 2021; Hanin *et al.*, 2016; Panta *et al.*, 2014; Cuñat-Cursá, 2022). Entre los factores que propician estrés abiótico se consideran: la sequía, inundación, temperaturas extremas, salinidad elevada, metales pesados y deficiencias nutrimentales, afecta negativamente el crecimiento cuando excede los límites de tolerancia de los cultivos (Mendoza, 2002). Destacando uno de estos factores es la salinidad del suelo, provocada por riego inadecuado y la acumulación de iones en el agua de riego, siendo un ejemplo significativo de estrés abiótico presente en la gran mayoría de suelos (Lamz y González, 2013; Zhou *et al.*, 2013). Se considera un suelo salino si su conductividad eléctrica es mayor a 4 dS/m, con un umbral de sodio intercambiable inicialmente establecido en 15% y luego reconsiderado a 10% o 6% debido a los efectos dañinos del sodio (Taboada y Lavado, 2009).

Siendo la salinidad una constante presente en la gran mayoría de suelos agrícolas, se requiere acudir a campos del conocimiento poco explorados, como la nanotecnología que ofrece herramientas avanzadas para la detección de estrés y la mejora de la absorción de nutrientes y pesticidas (Khot *et al.*, 2012; Nuruzzaman *et al.*, 2016). Los nanofertilizantes inducen la síntesis de metabolitos para la tolerancia al estrés (JuárezMaldonado *et al.*, 2018). En estudios con tomate, los nanotubos de carbono

influyeron en la expresión genética relacionada con el estrés (Khodakovskaya *et al.*, 2009). El quitosán y las nanopartículas son reconocidos como inductores para la defensa ante el estrés, resultando en la acumulación de metabolitos de defensa (Zhang y Lui, 2015; Usman *et al.*, 2020).

Dado lo anterior la salinidad es un parámetro que limita el crecimiento de los cultivos reduciendo su desarrollo, por tanto, su rendimiento en los diferentes sistemas de producción, y siendo la nanotecnología una herramienta propicia para determinar su potencial bioestimulante, este trabajo tiene como objetivo la evaluación del cultivo de fresa que es un cultivo sensible a la salinidad, sometido a cambios de conductividad eléctrica en fertirriego bajo un sistema de producción protegido, considerando el impacto del estrés salino.

II. JUSTIFICACIÓN

Dada la importancia del estrés ocasionado por la salinidad en los suelos del mundo y su control preciso en agricultura protegida a través del factor conductividad eléctrica, es necesario la búsqueda de tecnologías que reduzcan esta condición ocasionada por la acumulación de sales, las herramientas más utilizadas para controlar la cantidad de sales suele ser, el uso de riegos abundantes y prolongados, lo cual implica un uso inadecuado del recurso agua, por lo que es necesario considerar alternativas de control de este tipo de manejo. El uso de nanopartículas en la agricultura se ha encaminado a su uso como agentes del control de la sanidad de los cultivos y como nanofertilizantes, por lo que existen pocos estudios donde se demuestre su utilización como productos para mitigar el estrés generados cultivos, sobre todo en aquellos que presentan una baja tolerancia a la salinidad como el cultivo de fresa. Por lo que se esperar aportar una herramienta ambientalmente sostenible que pueda reducir el estrés ocasionado por el exceso de sales.

III. OBJETIVOS

3.1. Objetivo general

Evaluar el efecto del uso de nanopartículas de óxido de cobre (CuO) y zinc-ferrita (ZnFe₂O₄) en el cultivo de fresa sometido a estrés salino inducido por cambios en la conductividad eléctrica de la solución nutritiva.

3.2. Objetivos específicos

Evaluar diferentes concentraciones de óxido de cobre y zinc-ferrita en el cultivo de fresa sometido a estrés salino.

Evaluar un cambio de conductividad eléctrica de la solución nutritiva para incrementar la salinidad del cultivo de fresa.

Incrementar el crecimiento y desarrollo del cultivo de fresa sometidas a estrés salino con el uso de nanopartículas de óxido de cobre y zinc-ferrita.

IV. HIPÓTESIS

Al menos una concentración de nanopartículas y un tipo de nanopartícula tendrá un efecto positivo en el crecimiento, desarrollo y calidad de fruto de fresa en algunos de los diferentes cambios de conductividad eléctrica y, por tanto, su tolerancia al estrés salino.

V. REVISIÓN DE LITERATURA

5.1 Importancia económica

Actualmente la producción abarca la demanda nacional, con producción interna, asimismo las exportaciones han aumentado un 35% en la última década, los principales centros de destino son Estados Unidos y Canadá (SAGARPA, 2017).

Los frutos rojos son el producto mexicano que más se vendió durante el primer bimestre del 2023 a países como Estado Unidos de América, Arabia Saudita, Japón, China, entre otros. Dejaron atrás a otros productos de alta demanda y de mayor presencia e imagen como el tequila, cerveza o aguacate, según datos del Banco de México (Banxico), logrando un valor acumulado en ventas al exterior por 777 millones de dólares (Hernández, 2023).

5.2. Producción mundial

Los principales países productores de fresa son China con 2 851 100 t (35.3%), le continúa Estados Unidos de América (EE UU) con 1 234 134 t (15.3%), en tercer lugar, México con 658 436 t (8.2%), los cuales aportan cerca de 59% de la producción mundial. Asimismo, los principales países exportadores de fresa son España con 304 314 t (32%), Estados Unidos de América con 146 385 t (15.4%) y México con 126 157 toneladas (13.3%), los cuales concentran cerca de 61% de las exportaciones mundiales (FAOSTAT, 2020).

Cuadro 1. Producción y exportación mundial del cultivo de fresa.

Países productores de fresa		Países exportadores de fresa	
País	Porcentaje	País	Porcentaje
China	35.3 %	España	32 %
Estados Unidos de América	15.3 %	Estados Unidos de América	15.4 %
México	8.2 %	México	13.3 %

Elaboración propia.

Los principales importadores de fresa son Estados Unidos de América con 166 576 t (17.6%), Canadá con 110 487 t (11.7%) y Alemania con 108 407 t (11.4%), los cuales realizan alrededor de 41% de las importaciones en el mundo (FAOSTAT, 2020).

5.3. Producción nacional

Los principales estados productores son Michoacán (431 millones de toneladas), le sigue Baja California (123 miles de toneladas) el tercer lugar lo ocupa Guanajuato (79 miles de toneladas). El cultivo de fresa es una oportunidad para las y los agricultores mexicanos, quienes en 2020 obtuvieron una producción de 557,514 toneladas (SADER, 2022).

El 52.21% de la producción nacional se destina al mercado externo, por lo que la fresa es un producto exitoso en el comercio internacional, México es el tercer proveedor de fresa al mercado internacional, con 14.83% del valor de exportaciones mundiales. Las exportaciones mexicanas representaron 87.79% de las importaciones de Estados Unidos de América (SAGARPA, 2017).

5.4. Generalidades del cultivo

5.4.1. Origen

La palabra fresa se deriva del nombre de Frezier, ingeniero francés que llevó el fruto de Chile a Europa. El termino francés es "*fraise*". En Inglaterra se le llamaba "hayberry" este término pudo derivar en el actual nombre en inglés "*strawberry*" (Ferriol, 2010).

El origen de la fresa es europeo, de la región alpina; en ese entonces era una fruta pequeña y de sabor intenso. En el siglo XVIII se descubrió en Chile una fresa más grande, la cual conocemos hoy como fresón o frutilla y que es la que comúnmente se siembra en todo el mundo por sus altos rendimientos y que actualmente recibe el nombre genérico de fresa (Minagri, 2008).

Todas las fresas cultivadas se obtuvieron a partir de cuatro especies principales. La primera de ellas, la fresa silvestre o de bosque, es una especie frágil nativa de las montañas de América y de las Antillas. La fresa escarlata o fresa de Virginia, es nativa del este de América del Norte y se introdujo en Europa durante el siglo XVII. La fresa de playa o fresa de Chile, procede de las regiones montañosas del hemisferio occidental. La última especie se parece a la especie silvestre común, en Europa central se dio origen por hibridación a las variedades europeas de frutos más gruesos llamados fresones (Fernández *et al.*, 2016).

5.4.2. Clasificación taxonómica

Orden: Rosales

Familia: Rosaceae

Género: *Fragaria* L.

Subgénero: *Fragaria x ananassa*

(Hussain *et al.*, 2021)

5.4.3. Descripción morfológica

La planta es de tipo herbáceo y perenne, en tanto el sistema radical es fasciculado y se compone de raíces y raicillas (Nieto *et al.*, 2013). Es pequeña de no más de 50 cm de altura, con numerosas hojas originadas en una corona o rizoma muy corto que se encuentra a nivel del suelo y constituye la base de crecimiento de la planta, en la cual se observan escamas foliares, las hojas aparecen en roseta y se insertan en la corona.

Las flores son blancas organizadas en cimas y tienen cáliz de cinco piezas hendidas, cinco pétalos redondeados, numerosos estambres y pistilos. El fruto es el resultado de la agregación de muchos carpelos secos diminutos sobre un receptáculo pulposo hipertrofiado; mide cerca de 1 cm de largo, es rojo, tiene sabor dulce y presenta un aroma característico (SAGARPA, 2017).

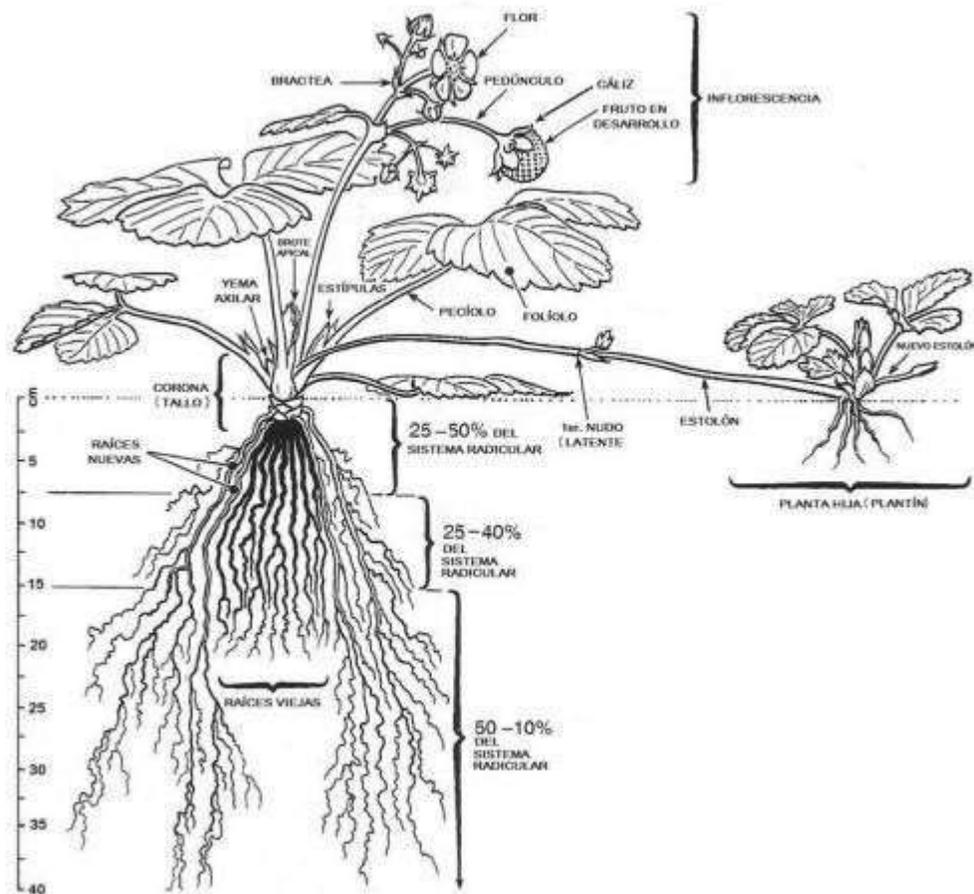


Figura 1. Diagrama de la planta de fresa, adaptado de Strand (1994).

5.4.4. Etapa fenológica

Según Bartual *et al.* (2005), la producción de la fresa se divide en dos etapas, la fase vegetativa que se lleva a cabo en el verano y otoño, y la fase productiva durante el invierno y la primavera. Durante estos periodos ocurre lo siguiente:

- a) Verano: periodo con influencia de largos días y temperaturas elevadas, la planta crece y se multiplica vegetativamente por estolones.
- b) Otoño: con incidencia de días cortos y temperaturas descendentes, se da un crecimiento con acumulación de reservas en las raíces. Comienza la iniciación floral y la latencia de la planta.

c) Invierno: periodo de días cortos y bajas temperaturas en el que se produce una paralización del crecimiento, hasta que la planta acumula el frío necesario y sale de la latencia.

d) Primavera: con la elevación de las temperaturas y el alargamiento progresivo de los días, aparece una reanudación de la actividad vegetativa, floración y fructificación, aumentando con la longitud del día.

La variedad San Andreas es moderadamente neutra, con mayor respuesta al fotoperiodo, las temperaturas inadecuadas generan exceso de crecimiento vegetativo, lo que retrasa la producción. El potencial de rendimiento son 78 t/ha en una temporada agrícola de nueve meses (Llahuen, 2017).

No obstante, la fresa necesita acumular una serie de horas frío, con temperaturas por debajo de 7°C, para dar una vegetación y fructificación abundante. Este requerimiento en horas frío, muy variable según los cultivares, no suele satisfacerse totalmente en las condiciones climáticas. Es muy importante determinar el frío requerido por cada variedad, debido a que insuficiente cantidad del mismo origina un desarrollo débil de las plantas, que dan frutos blandos y de vida comercial reducida. Un exceso de frío acumulado, por otra parte, da lugar a producciones más bajas, un gran crecimiento vegetativo y la aparición de estolones prematuros (Pérez-Saldaña *et al.*, 2008).

5.4.5. Marco de plantación

Por las diversas tecnologías aplicadas en el cultivo (coberturas plásticas y riego), la recomendación es establecerlo en líneas de 70-80 cm de ancho a 20 cm de altura. Se colocan dos hileras de planta en la cama, separadas a 40 cm entre sí, la profundidad radica en la cobertura del cuello de la raíz quedando a nivel de suelo, de manera que la corona no esté enterrada y las raíces expuestas. (SAGARPA, 2017).

5.4.6. Requerimientos hídricos

Las dosis de riego se calcularán dadas las características de evapotranspiración las cuales dependerán de las condiciones ambientales y del coeficiente del cultivo (BarbaQuiles, 2016).

5.4.7. Fertilización en sustrato

El sustrato es importante dado que afecte el establecimiento de la plantación propiciando crecimiento vegetativo no controlable. No se debe fertilizar dos semanas después del planteo, posteriormente se debe administrar una solución nutritiva para brindar los nutrientes necesarios. La fertilización se ajusta de acuerdo a la composición química del agua, dejando un pH ajustado en un rango de 5.3 a 6.3, dejando un óptimo de 5.8, el intervalo de CE va de 1.2 a 1.5 dSm⁻¹. Se debe considerar la etapa fenológica para determinar la fertilización, al inicio de año se reduce el contenido de nitrógeno, el potasio debe aumentarse durante la fructificación (Martínez-Tellez y León-Gallegos, 2004).

5.4.8. Temperatura

Dada la fisionomía y botánica de la fresa, se necesitan acumular entre 120-150 horas frío, sin embargo, es importante determinar el frío necesario ya que es variable entre las distintas variedades de fresa, la insuficiencia de horas frío puede provocar un débil desarrollo reproductivo de la planta, ocasionando un menor periodo de fructificación además de la reducción de frutos en cosecha. El exceso de horas frío puede provocar un gran crecimiento vegetativo aparición de estolones, pudiendo causar bajos rendimientos (Barba-Quiles, 2016).

5.4.9. Radiación

La fresa es un fruto no climatérico, el proceso de maduración es un proceso continuo. Son sensibles a la cantidad de luz recibida durante su crecimiento; con altos niveles de radiación aumenta la vaporización y con poca luz se retarda el crecimiento. Las bajas temperaturas inducen la floración y altas temperaturas producen crecimiento vegetativo (Gruda, 2005).

5.4.10. Podas

En el cultivo de fresa, la poda es una de las actividades más importantes para la correcta formación de corona, entre ellas se encuentra la poda de formación que tiene el objetivo eliminar las flores precoces desarrolladas posteriormente a la plantación. En etapas de producción, se cosechan los frutos para propiciar nuevos brotes de la planta. Se deben realizar podas de mantenimiento, en las que se eliminan las hojas con senescencia y enfermas (Paucar, 2022, como se citó en Rivadeneira-Santacruz, 2016).

Las podas se deben realizar después de ciclos fuertes de producción, eliminando racimos viejos, hojas dañadas, secas, restos de frutos; no se debe podar antes de la primera producción (Matamoros, 1996).

5.4.11. Principales plagas y enfermedades

Problemas en la producción de fresa es la aparición de diferentes plagas y enfermedades las cuales perjudican la producción al bajar el rendimiento por afectaciones en el fruto o causando pérdidas de material vegetal, por esta razón es importante conocer las características de las plagas o enfermedades y así identificar para tener un control y evitar pérdidas económicas que pudiesen provocar (Aguilar y García, 2008).

5.4.11.1. Plagas

Los insectos plaga más comunes en el cultivo de fresa son: la araña roja en condiciones de alta temperatura y baja humedad daña el tejido verde, habitando en el envés de las hojas; el *Thrips* afecta fuertemente la calidad de fruto en etapas tempranas, causando deformidad y marcas. El pulgón negro daña causa reducción en el crecimiento (Téllez y Gallegos, 2004).

5.4.11.2. Enfermedades

El cultivo de fresa está sujeto al ataque de enfermedades causadas por hongos, afectando las raíces y la parte aérea.

La podredumbre de raíz y corona producen marchitamiento total y/o parcial de la planta, pudiendo ser causadas por *Rhizoctonia sp.*, *Phytophthora sp.*, *Colletotrichum sp.*, *Verticillium sp.*, o complejos hongos de suelo que pueden sumar como *Fusarium*, *Pythium*, *Macrophomina*, y *Neopestalotiopsis sp.*

Las enfermedades del fruto radican en *botrytis*, antracnosis en fruta, podredumbre coriácea y *oidio*. Durante poscosecha afectan los hongos moho gris, *Rhizopus* y *Mucar* (Kirschbaum, 2022).

5.5. Impacto del estrés biótico en la agricultura

El estrés biótico es causado por el ataque de plagas y enfermedades, los cuales incluyen bacterias, hongos, nematodos, virus e insectos herbívoros (Hammond-Kosack y Jones 2015). El estrés por proximidad espacial entre plantas o comúnmente llamado competencia, se debe a los recursos limitantes para su desarrollo, que son por nutrientes, luz y agua (Callaway, 1994) surgiendo la alelopatía o el parasitismo.

5.6. Impacto del estrés abiótico en la agricultura

El término de estrés en términos de fisiología vegetal “reporta la magnitud de la presión ambiental que fuerza al cambio en la fisiología de una planta”. Resulta ser difícil

distinguir las respuestas que en la planta repercuten benéfica y negativamente (Nilsen y Orcutt, 1996). Otra definición es la que Levitt, (1980) define como cualquier factor ambiental potencialmente desfavorable para los organismos vivos.

El estrés abiótico se agrupa por el origen físico, químico, los cuales pueden agrupar estrés por exceso o déficit de agua, temperatura, metales pesados, salinidad (Tambussi, 2005).

5.6.1. Estrés salino

La salinidad se refiere a la presencia de una elevada concentración de sales las cuales perjudican a las plantas por su efecto tóxico. Se puede presentar dicha salinidad por NaCl, o distintas combinaciones de sales, siendo el sodio, calcio, magnesio, cloro y sulfatos (Jenks y Hasegawa, 2005). Los efectos de salinidad son más agudos en regiones áridas (Kuznetsov y Shevyakova, 1997). El estrés por salinidad produce un fuerte impacto sobre las producciones comerciales de cultivos hortícolas bajo agricultura hidropónica (Sonneveld *et al.*, 1999).

Los efectos perjudiciales de la salinidad están asociados al desbalance iónico, déficit de agua, al comportamiento estomático, la actividad fotosintética y la asimilación y distribución del carbono (Greenway y Munns, 1980). La salinidad causa problemas reduciendo el crecimiento y desarrollo vegetativo, causando mal funcionamiento de procesos fisiológicos (Shannon *et al.*, 1994), a su vez afecta la etapa vegetativa, reproductiva causando reducción en la acumulación de biomasa y rendimiento (AliDinar *et al.*, 1999).

5.6.2. Clasificación de los cultivos a la salinidad

La salinidad es la concentración elevada de sal en los suelos, la conductividad eléctrica (CE), es la capacidad que tiene una sustancia o material para permitir el paso de corriente eléctrica y se expresa en dS/m³. La salinidad más frecuente en los suelos es por cloruro de sodio (NaCl), sin embargo, los suelos salinos presentan distintas

combinaciones de sales, tales como cloruros, sulfatos, sodio, calcio y magnesio (LamzPiedra y González-Cepero, 2013). La salinidad de los suelos es una problemática que limita las actividades agrícolas, provoca la disminución de la capacidad productiva y de rendimiento en los cultivos (Mata-Fernández, 2014), La presencia de sales en el suelo afecta la asimilación de nutrientes por las plantas y la actividad microbiana del suelo (FAO, 2024).

SADER (2021), reportó que en la capa de 0-30 cm de profundidad, la afectación por salinidad en México es de 2.43 millones de hectáreas de salinidad leve en agricultura de riego, 3.43 millones de hectáreas afectadas por sodio, sumando el 60% de la superficie agrícola irrigada. En agricultura de temporal 1.75 millones de hectáreas presentaron problemas de sodicidad y 3.47 millones de hectáreas presentaron salinidad.

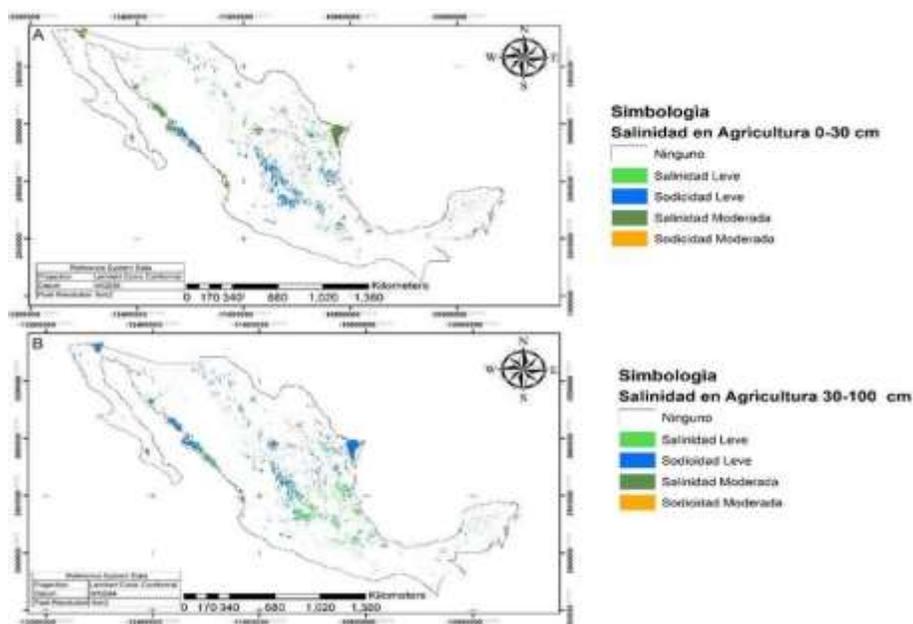


Figura 2. Mapa agrícola de afectación por salinidad en México (SADER, 2021).

Las plantas responden a la salinidad de diferente manera, existen cultivos que producen rendimientos por encima que los cultivos susceptibles a la salinidad (Ayers y Westcot, 1987). La salinidad del suelo se clasifica de la siguiente manera:

Cuadro 2. Interpretación de conductividad eléctrica (CE).

CE dS/m ⁻¹ a 25°C	Efectos
< 1.0	Efectos despreciables de la salinidad
1.1 - 2.0	Muy ligeramente salino
2.1 - 4.0	Moderadamente salino
4.1 - 8.0	Suelo salino
8.1 - 16.0	Fuertemente salino
> 16.0	Muy fuertemente salino

Fuente: Diario Oficial de la Federación, 2002.

La fresa, no tolera salinidad. La CE debe estar por debajo de 1 dS m⁻¹ para no causar pérdidas de rendimiento; si la CE tiene un valor de 1.3, 1.8, 2.5 o 4 dS/m⁻¹, el rendimiento se reduce 10, 25, 50 y 100%, respectivamente (Ayers y Westcot, 1985 citado en: Ruiz *et al.*, 2013).

Cuadro 3. Tolerancia de cultivos y potencial de rendimiento de cultivos influenciador por la salinidad de riego aplicado.

Cultivo	Potencial de rendimiento a diferentes dosis de salinidad del riego aplicado			
	100%	90%	75%	50%
Tomate	1.7	2.3	3.4	5
Fresa	0.7	0.9	1.2	1.7
Uva	1.0	1.7	2.7	4.5
Lechuga	0.9	1.4	2.1	3.4
Pepino	1.7	2.2	2.9	4.2

Fuente: Ayers y Westcot, (1989).

5.7. Tecnologías en la agricultura para mitigar el estrés

En la actualidad se emplean productos para combatir el estrés, a su vez elevar los rendimientos de las plantas, entre dichos productos se encuentran los bioestimulantes, las cuales han demostrado respuesta en promover crecimiento, modificar la fisiología de las plantas, mejorando la respuesta al estrés (Veobides-Amador *et al.*, 2018). El término bioestimulante se refiere a una sustancia que aplicada en pequeñas cantidades generan un impacto positivo en el proceso de germinación, crecimiento vegetativo, desarrollo, floración. Los bioestimulantes son de diferente origen pudiendo ser de extractos de plantas, algas, ácidos húmicos entre otros, a su vez se pueden

realizar combinaciones de bioestimulantes con productos de función conocida, por ejemplo, reguladores de crecimiento, nutrimentos etc. (Saborío, 2002).

5.7.1. Nanotecnología

En la actualidad la nanociencia y nanotecnología han ganado importancia en diversos campos, incluyendo la industria agroalimentaria (Dasgupta *et al.*, 2015). La nanociencia estudia los fenómenos y manipulación de materiales con escala molecular, atómica y supramolecular, donde las propiedades de los sistemas difieren significativamente de los que están en mayor escala (Chávez y Patiño 2009).

La nanotecnología estudia el diseño, caracterización, producción y aplicaciones de estructuras, dispositivos y sistemas mediante el control de la forma y tamaño a escala nanométrica. Las nanopartículas (NPs) se definen como partículas de tamaño que va de uno a cien nanómetros (nm), dado a su escala tan pequeña, posee una gran área por unidad de volumen, resultando una gran proporción de átomos en la superficie. Los materiales nanométricos son principalmente interesantes debido a sus propiedades físicas y químicas, lo cual hacen sean ligeros, de producción rápida y de una mayor funcionalidad (Schmid y Corain, 2003). Las propiedades de las NPs están ligadas a la forma y tamaño, dependiendo del método de síntesis utilizado que pueden ser, físico, biológico y químico (Khodashenas y Ghorbani, 2014).

5.7.2. Aplicaciones de la nanotecnología en la agricultura

Potencialmente la nanotecnología ha revolucionado para el cuidado de la salud, asimismo en la producción de textiles con propiedades antimicrobiales, o su uso en la fabricación de materiales con nuevas propiedades, empleándose en tecnologías de la información, sector energético, aeronáutica, sin embargo, las aplicaciones en el sector agroalimentario han comenzado a investigarse (Méndez -Argüello *et al.*, 2016).

Entre las estrategias de la nanotecnología en el sector agroalimentario, se ha destacado el incremento en la producción de alimentos utilizando menores insumos de

energía, a su vez disminuyendo costos de producción y desperdicios de agroinsumos (Mukherjee *et al.*, 2016), a su vez la nanotecnología ha permitido el desarrollo de empaques inteligentes de alimentos que pueden revelar el desarrollo bacteriano o fúngico al estar empaquetados (Vanderroost *et al.*, 2014). Las distintas aplicaciones desde el desarrollo de nanoformulaciones de agroquímicos para aplicar fertilizantes o pesticidas.

5.7.2.1. Nanofertilizantes

Se espera que los nanofertilizantes permitan mejorar significativamente el crecimiento y a su vez el rendimiento de los cultivos, mejorar la eficiencia y uso de fertilizantes, consigo la reducción de pérdidas nutrimentales y/o minimizar el impacto ambiental (Liu y Lal, 2015). Dentro de la categoría de nanofertilizantes se incluyen los materiales nanoporosos como las zeolitas y arcillas, minerales naturales que pueden ser utilizados para lenta liberación de nutrientes (Naderi y Danesh-Shahraki, 2013).

Existen dos tipos de nanofertilizantes por diseño, nanomateriales como nutrientes y nanomateriales cargados con nutrientes, las primeras se fabrican en base a nutrientes esenciales para las plantas, resulta ser la opción más sencilla y se basa en que las nanopartículas se absorberán con facilidad a través de los órganos de la planta y se distribuirán a través de ella, la descomposición gradual de la nanopartículas se da dentro de los tejidos vegetales, liberando el nutriente para que la planta lo aproveche. Las nanopartículas cargadas con nutrientes actúan como nanotransporte de nutrientes, dichos nutrientes se encuentran cargados al interior y/o en la superficie del nanofertilizante, que ayuda a internalizarlo dentro de la planta, protegiendo de la degradación; los nutrientes se pueden ir liberando de forma gradual en el interior del cultivo, por difusión o desintegración del nanomaterial (Miguel-Rojas, 2020).

5.7.2.2. Nanosensores

Algunas de las aplicaciones de la nanotecnología son los nanosensores y sistemas de suministro inteligentes basados en la nanotecnología, mismos que son empleados en el sector agrícola para combatir los patógenos de los cultivos, mejorar la fertilización a su vez mejorando la productividad agrícola a través de la optimización del recurso agua y los nutrientes demandados por el cultivo (Dubey Mailapalli, 2016). El potencial uso de los nanosensores permite la detección de plagas y/o enfermedades en los cultivos (Fraceto *et al.*, 2016), se considera que los nanosensores tendrán la capacidad de detectar deficiencias de nutrientes o problemas de sanidad vegetal, mucho antes que visualmente se exprese el problema (Fraceto *et al.*, 2016), existen nanosensores los cuales detectan pesticidas en concentraciones muy pequeñas, lo cual es de utilidad en la agricultura de precisión, reduciendo la contaminación y mejorando así las prácticas agrícolas (Malsch *et al.*, 2015).

5.7.2.3. Nanoplaguicidas

Dentro de las aplicaciones de la nanotecnología se destaca la elaboración de nanopesticidas encapsulados para su liberación controlada (Fraceto *et al.*, 2016), haciendo más eficiente el uso y aplicaciones de agroquímicos (Nuruzzaman *et al.*, 2016). Se denomina nanoplaguicidas a las partículas con un tamaño de 1 a 1,000 nm en alguna de sus dimensiones, las cuales muestren propiedades novedosas en la prevención, control o destrucción de plagas. (Kah *et al.*, 2013; citado en Robles y Cantú, 2017). Los nuevos desarrollos de nanoplaguicidas se formulan mediante el uso de un ingrediente activo convencional conjunto a estructuras nanométricas, tales como nanocápsulas, polímeros o nanopartículas derivadas de metales, óxidos metálicos, arcillas, o reciben tratamientos con surfactantes o tensoactivos que forman nanoemulsiones (Robles y Cantú, 2017).

5.7.3. Nanopartículas metálicas en la agricultura

Las NPs de naturaleza metálica y óxidos de metales, son estudiadas por la ingeniería y la ciencia debido a sus propiedades ópticas, químicas, electrónicas, mecánicas y físicas. Dichas propiedades están ligadas a la estructura, morfología, y composición de las partículas (Singla *et al.*, 2016). Las nanopartículas metálicas incluyen Al, Ag, Cu, Zn, Fe, entre otras, pueden usarse con un enfoque dual, ya sea como fuente nanopesticidas (Jeyasubramanian *et al.*, 2016) o como nanofertilizantes. Entre las propiedades interesantes de las NPs metálicas es la propiedad antimicrobiana que posee. (Acevedo-León *et al.*, 2023).

La utilización y aplicación de nanopartículas metálicas, ha sido exitosa debido a los beneficios en la producción de alimentos, ejemplos de ello son, el aumento en la tasa de producción, salud en las plantas y el control de plagas y enfermedades (SánchezValdés *et al.*, 2024).

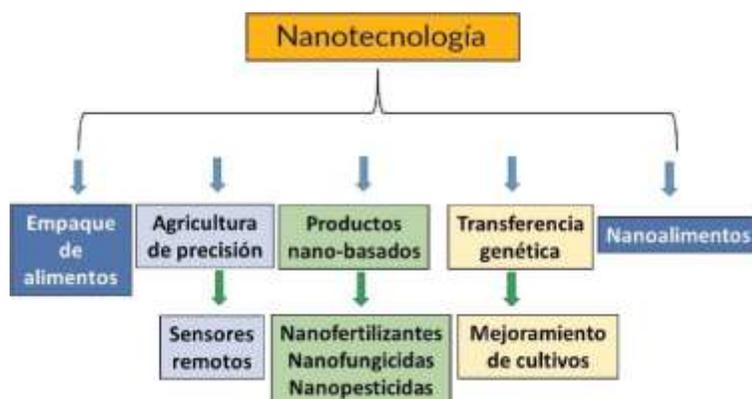


Figura 3. Aplicaciones de la nanotecnología en la agricultura.

Nota: La figura corresponde al uso de nanopartículas metálicas como cobre, zinc, hierro y plata; y las derivadas del carbono tienen notables efectos fisiológicos y bioquímicos en las plantas, por lo que también podrían tener aplicaciones en los empaques para recubrimientos de alimentos para extender la vida de anaquel o poscosecha, como para usarse en nanosensores, nanopesticidas, nanofertilizantes y para el mejoramiento genético de plantas. (Lira-Saldivar *et al.*, 2018).

5.7.3.1. Nanopartículas de CuO

El cobre (Cu) es un microelemento distribuido en los tejidos vegetales, el cual participa en procesos fisiológicos esenciales para el crecimiento vegetal (Rajput *et al.*, 2018), participa en la activación de enzimas clave en el ciclo de Calvin, incrementando el rendimiento y mejorando la actividad fotosintética (Pradhan *et al.*, 2015). Las NPs pueden funcionar como oxidantes o reductores en reacciones bioquímicas dentro de la célula puede catalizar la producción de especies reactivas de oxígeno e inducir el estrés oxidativo (Somasundaran *et al.*, 2010). Las nanopartículas de cobre u óxidos de cobre poseen propiedades antimicrobianas, son de bajo costo y de fácil obtención. Las NPs de cobre han sido utilizadas para promover el crecimiento en plantas, a su vez en aplicaciones como fungicidas y bactericidas (Acevedo *et al.*, 2023).

5.7.3.2. Nanopartículas de zinc-ferrita

El zinc es un micronutriente involucrado en la síntesis de proteínas, actúa como agente estabilizador para las membranas de amplia propagación y alargamiento celular (Mousavi *et al.*, 2014). Se ha reportado que las NPs de zinc pueden tener aplicación como nanofungicida (Kumar *et al.*, 2016) a su vez puede tener aplicaciones como nanofertilizante (Subramanian *et al.*, 2015). Por su parte el hierro es un microelemento esencial para el desarrollo fisiológico de las plantas, interviene en la formación del pigmento clorofílico, es el primer aceptor de electrones como la ferredoxina, el hierro se encuentra involucrado en procesos respiratorios de la planta, contribuyendo en la formación de proteínas (Mata, 2015).

La aplicación de nanopartículas ha demostrado un impacto positivo sobre parámetros nutricionales y fisiológicos en algunos cultivos (Hussain *et al.*, 2018), a su vez puede inducir estrés y toxicidad en las plantas y estimular los sistemas antioxidantes (García-Gómez *et al.*, 2018). Se ha indicado que las nanopartículas de zinc reducen la presencia de enfermedades por el efecto antifúngico, ya que causan malformación de hifas. (Servin *et al.*, 2015), por otro lado, el hierro se emplea en nanosensores para detectar pesticidas en concentraciones pequeñas (Lira-Saldivar *et al.*, 2018), La

aplicación de nanopartículas metálicas, ha demostrado incrementos en germinación, crecimiento de la planta, resistencia al estrés e indica un aumento en la absorción de nutrimentos (Yusefi-Tanha *et al.*, 2020).

Las nanopartículas a base de ferrita, son materiales interesantes debido a las propiedades físicas, eléctricas, estructurales y magnéticas, las nanopartículas a base de zinc ferrita han tomado importancia, debido a la moderada saturación magnética, baja coercitividad, estabilidad térmica y química, dureza mecánica y alto rendimiento electromagnético, (Abdelhameed *et al.*, 2021).

VI. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1. Ubicación del experimento

El presente estudio se llevó a cabo en el área de invernaderos del Departamento de Ciencias del Suelo de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, en Buenavista, Saltillo, Coahuila, México; ubicada a 25 ° 22' latitud Norte y 101 22' longitud Oeste, con altura de 1742 msnm. El clima es seco y templado, con lluvias en verano, presentando precipitación promedio anual de aproximadamente 460.7mm, temperatura que oscilan entre 10.4 y -10.4°C, con una media anual de 17.3 °C. El experimento inició en marzo 2022, finalizando en enero 2023.

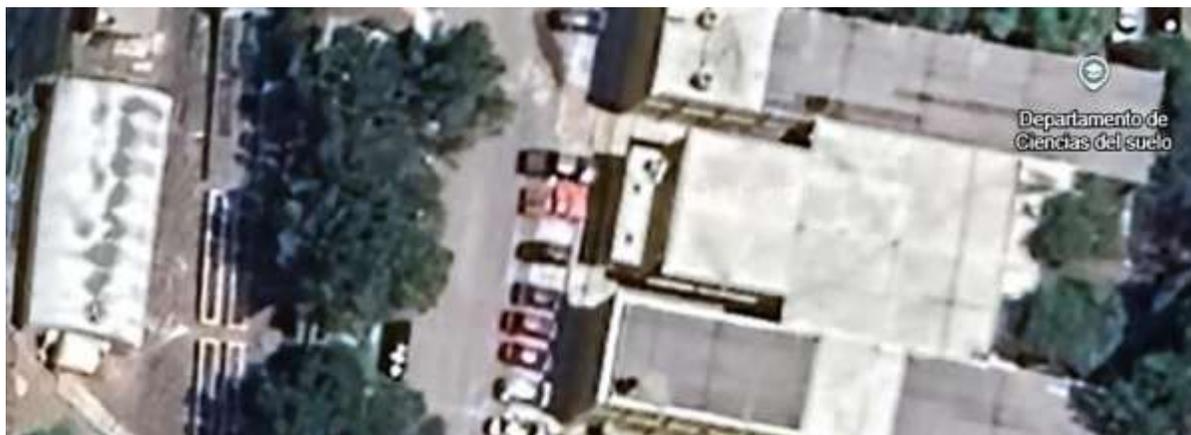


Figura 4. Imagen satelital del Departamento de Ciencias del Suelo e invernaderos de investigación. Obtenida de Google Earth.

6.2. Material vegetal utilizado

Se utilizaron plantas de fresa a raíz desnuda, variedad San Andreas, la cual es clasificada por ser variedad de día neutro, la cual indica que no responden a intervalos específicos de fotoperiodo, pero sí temperaturas adecuadas para una adecuada producción.

6.3. Muestreo de sustrato para determinar pH y CE

Para determinar el pH y la CE del sustrato se realizó el método de dilución 1:2, siendo un método para determinar características del sustrato. Se realizó con sustrato de la parte media de la maceta, colocando el sustrato en un recipiente por dos partes de agua, agitándola y dejando reposar la mezcla obtenida por media hora y sumergiendo el sensor para tomar la lectura. La toma de los valores de pH y CE se realizó con el medidor de bolsillo (potenciómetro y conductímetro) HANNA ph/ec/tds hi98130. Se realizaron dos muestreos durante el experimento.

Los muestreos indicaron niveles normales de pH y CE, se procuró medir constantemente el drenaje de la solución nutritiva para evitar altas concentraciones de sales en el sustrato por diferentes tratamientos utilizados en el incremento de conductividad eléctrica.

6.4. Establecimiento del cultivo

El cultivo fue establecido el 30 de marzo del 2022 en un invernadero de mediana tecnología. Para la siembra se utilizaron contenedores calibre 10 L en color negro, con mezcla de peat moss y perlita en proporción 70:30 respectivamente, se ajustó el pH del sustrato con bicarbonato de sodio (NaHCO_3) de 5.0 a 5.5, una vez ajustado el pH, se procedieron a llenar los contenedores, una vez listos se aplicó un riego a saturación del sustrato, para su posterior trasplante de la fresa a raíz desnuda.

6.4.1. Riego y nutrición

Se manejó un riego cada cuatro días las primeras tres semanas después de establecer el cultivo, conforme la planta desarrollaba coronas se aumentaba el riego. En la etapa de producción la planta requería un riego diario de 800 ml/planta debido a la alta demanda de agua por los frutos. El riego era realizado de manera manual, aplicando el volumen correspondiente por unidad experimental de acuerdo a su etapa fenológica.

La solución nutritiva fue distinta para las diferentes plantas, se tomó en cuenta la etapa fonológica para determinar los elementos que la planta requería y se ajustó de acuerdo al análisis de agua.

Desde el establecimiento del cultivo hasta el inicio de la aplicación de los tratamientos se utilizó la solución Steiner al 25%, posteriormente el manejo provocaba una salinidad inducida al cultivo de fresa se realizó utilizando incrementos en la solución nutritiva, donde se utilizaron diferentes niveles de conductividad eléctrica (1.5 y 2.5 dS).

Cuadro 4. Relación de concentraciones (meq/L) para aniones y cationes (Steiner, 1984).

Aniones (-)		Cationes (+)	
Nitrato NO ₃ ⁻	60%	Calcio Ca ²⁺	40%
Fosfato H ₂ PO ₄ ⁻	5%	Potasio K ⁺	35%
Sulfato SO ₄ ⁻²	35%	Magnesio Mg ²⁺	25%

Elaboración propia a partir de: Manuales prácticos para la elaboración de bioinsumos, (Gobierno de México, 2021).

6.4.2. Podas Realizadas

6.4.2.1. Poda de hojas

La poda se realizó cada dos semanas con la finalidad de eliminar hojas enfermas, viejas y/o con deficiencias. Se iniciaba con la eliminación de hojas enfermas, viejas y secas, las cuales presentaban coloración anormal causado por necrosis causadas por deficiencias, enfermedades y senescencia, con la finalidad de mantener órganos fuente activos sin que se transformaran en una demanda.

6.4.2.2. Poda de estolones

El comienzo de la aparición de estolones se dio a los 48 días después del trasplante los cuales se eliminaron conforme su aparición, con el propósito de evitar que los

estolones crecieran lo cual genera demanda de energía y nutrientes ya que de no eliminarlos estos mitigarían el crecimiento y desarrollo del cultivo y por tanto, los parámetros de calidad que se buscan en los frutos de fresa.

6.4.2.3. Poda de flores

Las flores aparecieron a los 25 días después del trasplante, se procedió a eliminar las primeras flores para que la planta creciera con mayor vigor estimulando el crecimiento vegetativo, generando porte y vigor de la planta y así evitar la etapa reproductiva antes del tiempo necesario.

6.4.3. Cosecha

La cosecha se evaluó a los 175 días después de trasplante, se realizó de forma manual dejando que todos los frutos tuvieran una maduración fisiológica, la cual se refiere a la etapa de desarrollo de la fruta que ha producido el máximo crecimiento y maduración, además de dejar el fruto uno o dos días más para aumentar los sólidos solubles totales.

En la colecta de frutos se colocaban en bolsas, las cuales estaban etiquetadas con el número de fruto y tratamiento del cual había sido cosechado para proceder al laboratorio donde se realizarían las mediciones y análisis correspondientes a las variables asignadas.

6.4.4. Manejo de plagas y enfermedades

Esta labor se realizó con monitoreo del cultivo, se contempló un calendario de aplicaciones de productor fitosanitarios para prevenir y controlar de manera eficiente las plagas y enfermedades presentes, se utilizaron diversos productos: químicos, tales como; Agry gent plus®, Danapyr^{MR} 40 CE®, Imidacproprid®, Spirotetramat, Sanatil 25 CE®, Funsin®, Acramite®. Los cuales se complementaron con productos orgánicos, los cuales fueron; extracto de gobernadora y vinagre.

6.4.5. Selección de tratamientos

Se seleccionaron nueve tratamientos con cinco repeticiones cada uno, teniendo un total de 45 unidades experimentales, a continuación, se presentan los tratamientos evaluados a diferentes concentraciones de NPs de ZnFe₂O₄ y CuO (Cuadro 5).

Cuadro 5. Tratamientos aplicados para determinar su efecto en plantas de fresa var. San Andreas mediante la aspersión foliar de nanopartículas de ZnFe₂O₄ y CuO

Tratamientos	NPs	[NPs] mg/L	CE dS/m
T1	TESTIGO	0	1.5
T2	ZnFe ₂ O ₄	[750]	1.5
T3	CuO	[750]	1.5
T4	ZnFe ₂ O ₄	[1500]	1.5
T5	CuO	[1500]	1.5
T6	ZnFe ₂ O ₄	[750]	2.5
T7	CuO	[750]	2.5
T8	ZnFe ₂ O ₄	[1500]	2.5
T9	CuO	[1500]	2.5

NPs= nanopartículas; CE = conductividad eléctrica

6.4.6. Aplicación de los tratamientos

Los tratamientos se llevaron a cabo disolviendo los nanomateriales en agua destilada para después ser asperjados de manera foliar con ayuda de bombas de capacidad de 1 L, la aplicación se realizaba a una distancia de 15 cm, cubriendo todo el follaje. La aplicación se realizaba cada 15 días durante las primeras horas del día, con la finalidad de realizar aplicaciones donde la planta se encuentra con los estomas abiertos, la aplicación se realizaba de forma uniforme sobre toda el área foliar, las plantas se cubrían con un plástico para evitar que las NPs contaminaran otras unidades experimentales. La primera aplicación se llevó a cabo a los 38 días después del trasplante.

6.4.7. Variables de respuesta

6.4.7.1. Bioquímicas

Grados °Brix del fruto: La medición del contenido de sólidos solubles totales se obtuvo con la ayuda de un refractómetro marca Mellth, se molía una parte del fruto en un mortero hasta obtener un extracto y se colocaba una gota de extracto para obtener la medición.

Contenido de nitrato en el fruto: Para obtener dicho parámetro se evaluaron los primeros tres frutos cosechados por planta, los frutos eran cosechados en madurez fisiológica, se utilizaban gotas de extracto del fruto y se colocaban en el sensor Horiba®.

Contenido de calcio en el fruto: Para obtener dicho parámetro se evaluaron los primeros tres frutos cosechados por planta, los frutos eran cosechados en madurez fisiológica, se utilizaban gotas de extracto del fruto y se colocaban en el sensor Horiba®.

Contenido de potasio en el fruto: Para obtener dicho parámetro se evaluaron los primeros tres frutos cosechados por planta, los frutos eran cosechados en madurez fisiológica, se utilizaban gotas de extracto del fruto y se colocaban en el sensor Horiba®.

6.4.7.2. Agronómicas

Rendimiento: Se determinó eliminando los sépalos de cada fruto para posteriormente pesar cada uno de los frutos en gramos (g), con ayuda de una balanza digital marca A&D Weighing.

Número de frutos: El conteo se realizó en cada cosecha para tener un mejor control de datos, contando el número de frutos producido por unidad experimental, durante el ciclo de cosecha (119 días).

Número de coronas: La variable se obtuvo cortando la zona radicular y la parte aérea, dejando únicamente las coronas para la toma de datos.

Biomasa total: Para obtener los datos se realizaron diversas podas, colectando todas las hojas, dejándose secar para pesar, al final del experimento la zona radicular y las coronas se secaron para la obtención total del peso, para dicha variable la biomasa se colocó en bolsas de papel, dejándose secar en el interior del invernadero para posteriormente pesar en una balanza analítica (g) marca A&D Weighing, sumando las partes de la planta para obtener la biomasa total.

Longitud de raíz: Se realizó un lavado de raíces al finalizar el experimento, quitando el exceso de sustrato y una vez limpia se procedió a pesar el peso fresco y con una cinta métrica se midió la longitud (cm) con el uso del flexómetro.

6.5. Diseño estadístico

En el presente experimento se realizó con un diseño estadístico de bloques completamente al azar, donde se evaluaron nueve tratamientos con cinco repeticiones por tratamiento, dando un total de 45 unidades experimentales. Se utilizó el programa estadístico Infostat versión 2019 y para el análisis de varianza se utilizó Duncan a un alfa de 0.05.

VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1. Variables agronómicas

7.1.1. Rendimiento

Los resultados obtenidos para la variable rendimiento indicados en la figura 5, indican diferencias estadísticas significativas entre el testigo y los tratamientos T2 y T8, este último reporta un 39% en la reducción del rendimiento, los cuales corresponden a la aplicación de NPs ZnFe, mientras que los tratamientos con mayor rendimiento fueron en el T3 y T7, los cuales corresponden a aplicaciones de 750 mg L⁻¹ de CuO-NPs, dichos tratamientos no reportaron una diferencia estadística con respecto al testigo sin embargo, esto destaca que los tratamientos con CuO a bajas concentraciones y bajo alto estrés salino parecen ser los más efectivos para mejorar el rendimiento en comparación con los tratamientos con ZnFe. Estos datos sugieren que el uso de CuO a concentraciones moderadas es más beneficioso bajo condiciones de estrés salino que el uso de ZnFe, especialmente en condiciones de alta salinidad (CE 2.5 dS/m), para el rendimiento de fresa.

Existe poca información sobre el efecto de las aplicaciones de nanopartículas y su uso como bioestimulante en condiciones de salinidad. Sin embargo, Rivera-Gutiérrez *et al.* (2021), encontró que la aplicación de NPs ZnO tuvo efectos favorables en el rendimiento de melón a una concentración de 200 mg L⁻¹ promoviendo un mayor peso en frutos y por tanto, su rendimiento, superando al control con un 32%. Comparado a este trabajo podríamos aunar de que se utilizaron concentraciones más elevadas de nanopartículas y esto pudo haber influido en el resultado del parámetro rendimiento. Mientras que López (2019) Reportaron que las aplicaciones de NPs Cu influyeron significativamente en el rendimiento de melón, a dosis de 9 mg L⁻¹, obteniendo diferencias entre tratamientos de 79% entre el rendimiento máximo y mínimo, esto podría atribuirse a que los autores utilizaron las NPs de Cu con la finalidad de aportar este como nanofertilizante, mientras que este trabajo pretendía que se generara un efecto inductor para mitigar el estrés salino. Finalmente, en el trabajo de Davarpanah *et al.* (2016) en árboles de granado asperjados con nanofertilizantes de zinc y boro aumentaron el rendimiento en un 8.6 y un 34% en comparación del control, lo que nos

dice que el uso de estas tecnologías prometen un efecto positivo como una alternativa de uso agrícola.

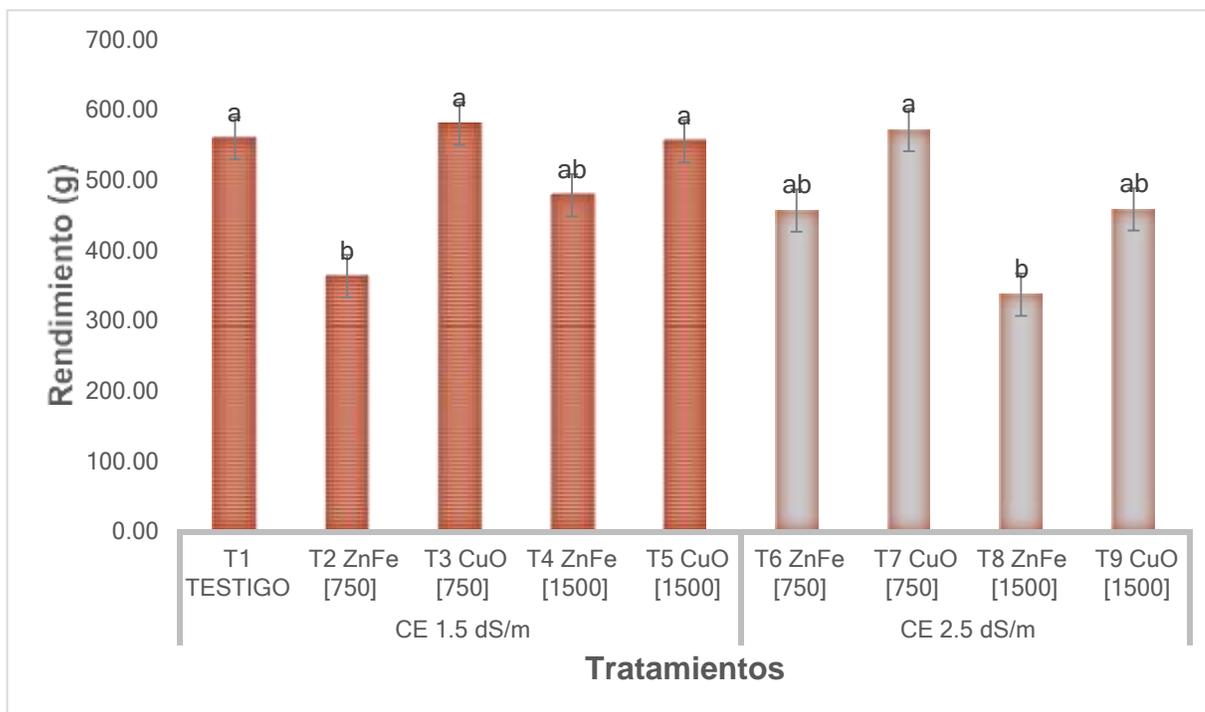


Figura 5. Efecto de la aplicación de manera foliar de NPs de óxido de cobre y Zinc-Ferrita en fresa sometida a estrés salino para rendimiento de frutos. Promedios seguidos de la misma letra indican diferencias no significativas con $p < 0.05$ de acuerdo a la prueba de Duncan. CE: conductividad eléctrica, ZnFe: zincferrita y CuO: óxido de cobre.

7.1.2. Número de frutos

En la figura 6, se pueden apreciar los resultados obtenidos para la variable número de frutos donde el tratamiento T7 CuO [750] con CE 2.5 dS/m obtuvo el mayor número de frutos, con un valor promedio estadísticamente significativo superior al testigo (T1). Esto sugiere que la aplicación de nanopartículas de óxido de cobre (CuO) a una dosis de 750 mg/L en condiciones de salinidad moderada (CE 2.5 dS/m) favorece el desarrollo de frutos en fresa, posiblemente debido a una mejor tolerancia al estrés salino inducido por el CuO-NPs. Mientras que el tratamiento T2 ZnFe [750] con CE 1.5 dS/m presentó el menor número de frutos, incluso por debajo del testigo, lo que indica

que, a esta dosis y nivel de salinidad, las nanopartículas de zinc-ferrita (ZnFe) podrían no estar promoviendo un efecto positivo en el número de frutos.

Esto sugiere que, para maximizar la producción de frutos en condiciones de estrés salino, la aplicación de nanopartículas de óxido de cobre a dosis moderadas es más efectiva que la aplicación de zinc-ferrita. Además, la respuesta al tipo y dosis de nanopartículas puede variar según el nivel de salinidad, lo que debe tenerse en cuenta al diseñar estrategias de manejo para cultivos sensibles al estrés salino como la fresa.

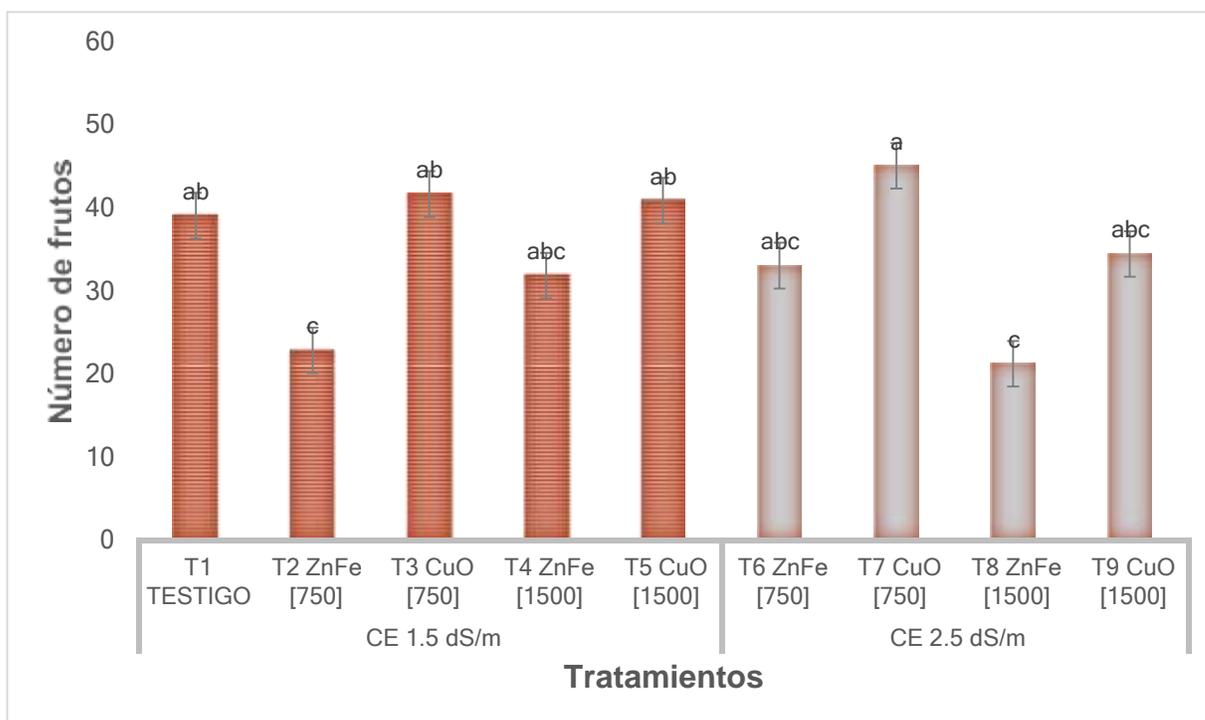


Figura 6. Efecto de la aplicación de manera foliar de NPs de óxido de cobre y ZincFerrita en fresa sometida a estrés salino para la variable número de frutos. Promedios seguidos de la misma letra indican diferencias no significativas con $p < 0.05$ de acuerdo a la prueba de Duncan. CE: conductividad eléctrica, ZnFe: zincferrita y CuO: óxido de cobre

Los resultados que obtuvo González-Jiménez *et al.* (2020) indican que el número de frutos de fresa variedad festival, no se vio afectado por la conductividad eléctrica incrementada, lo cual es atribuido a una salinidad baja (concentraciones de 2.0, 2.3, 2.5 y 2.7 $ds\ m^{-1}$), la cual no afecto la producción, por lo que debería de ser considerado sobre todo en cultivos con baja tolerancia a la salinidad como lo es el cultivo de fresa,

por lo que en la variable número de frutos los resultados indican que las NPs de CuO muestran que la fresa mejoro su tolerancia a la salinidad de acuerdo a los resultados obtenidos. Por su parte Davarpanah *et al.* (2016), reporta que en aspersiones foliares de nanofertilizantes a base de zinc y boro aumento el número de frutos por árbol de granado en un 24.5 y 30.25% en comparación al control. Mientras que en frutos secos como lo es el cultivo de nuez fue sometido a aplicaciones foliares con diferentes dosis de NPsZn donde no se encontraron diferencias significativas en el número de nueces por kilogramo según lo reportado por Estrada *et al.* (2023), esto podría atribuirse al tamaño que implica un frutal para el aprovechamiento de las nanopartículas o indicar que estas no se translocan, debido a que el factor salinidad en esta investigación podría propiciar un efecto adicional al evaluar el número de frutos.

7.1.3. Número de coronas

De acuerdo a los resultados obtenidos (figura 7) con respecto al análisis estadístico no se obtuvo una diferencia con respecto al testigo, pero el tratamiento T5 CuO [1500] con CE 1.5 dS/m mostró el mayor número de coronas, superando ligeramente al resto, lo que sugiere que una dosis alta de CuO es particularmente positiva en condiciones de salinidad moderada. Esto indica que las nanopartículas de óxido de cobre, en dosis de 1500 mg/L, pueden mejorar el desarrollo vegetativo de las plantas de fresa cuando la salinidad es baja, mientras que el tratamiento T7 CuO [750] con CE 2.5 dS/m tuvo el menor número de coronas, lo que sugiere que una dosis más baja de CuO no es suficiente para contrarrestar el efecto negativo de un nivel más alto de salinidad. Esto indica que, en condiciones de mayor estrés salino, aumentar la dosis de CuO podría ser necesario para mejorar el crecimiento de las coronas. Esto sugiere que la aplicación de nanopartículas de óxido de cobre a dosis altas puede mejorar significativamente el desarrollo vegetativo (número de coronas) en plantas de fresa bajo condiciones de salinidad moderada. En contraste, dosis más bajas de CuO no son efectivas bajo alta salinidad, lo que resalta la importancia de ajustar las dosis de nanopartículas según el nivel de estrés salino.

En el trabajo realizado por Roblero-Domínguez (2016), encontró que en aplicaciones de ácido salicílico a dosis de 1×10^{-3} y 1×10^{-4} , melaza $20 \text{ cm}^3/\text{L}^{-1}$, ácidos húmicos y

fúlvicos $20 \text{ dm}^3/\text{L}^{-1}$, algas marinas a dosis de 15 y $30 \text{ cm}^3/\text{L}^{-1}$, la variable número de coronas no mostró diferencia estadística con el testigo, por lo cual no obtuvo diferencias que favorecieran la estimulación y crecimiento, reportando que a altas dosis de aspersión se pueden ver afectados algunos procesos fisiológicos. Este comparativo se utiliza como indicador del antecedente del uso de diversas sustancias que podrían propiciar el incremento de este parámetro y no fue logrado, mismos resultados que coinciden con el uso de nanopartículas de CuO y las ferritas de zinc en esta investigación.

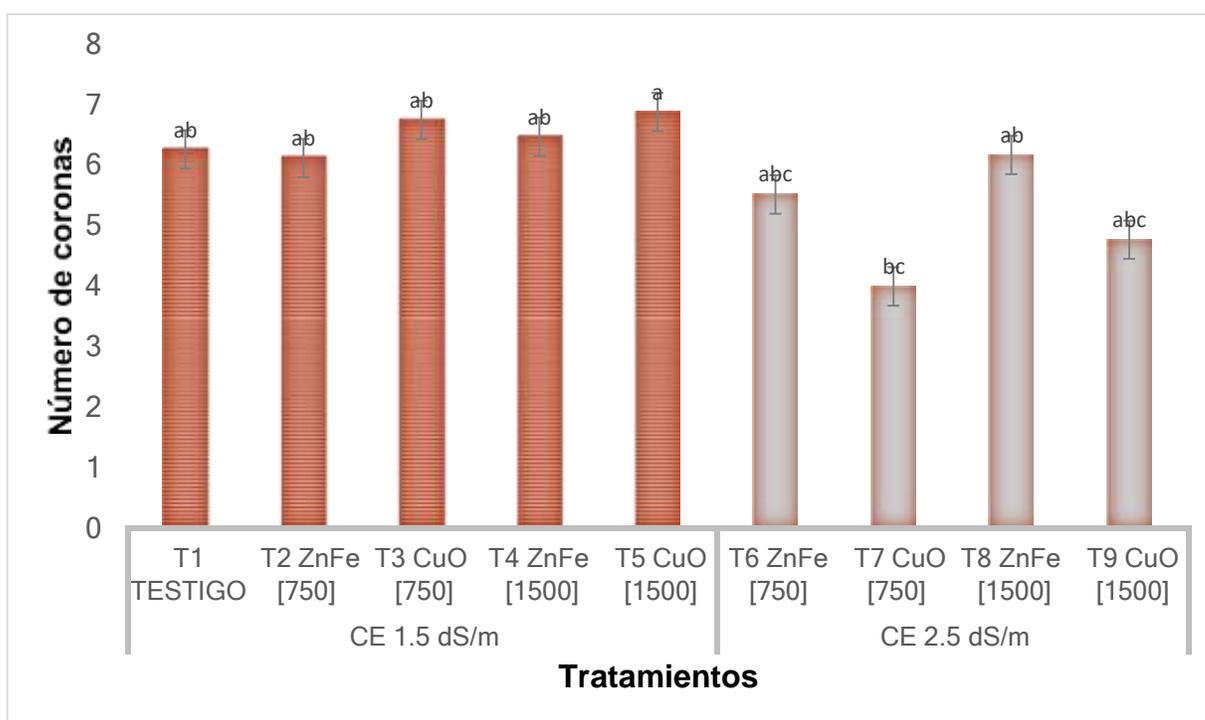


Figura 7. Efecto de la aplicación de manera foliar de NPs de óxido de cobre y ZincFerrita en fresa sometida a estrés salino para la variable número de coronas. Promedios seguidos de la misma letra indican diferencias no significativas con $p < 0.05$ de acuerdo a la prueba de Duncan. CE: conductividad eléctrica, ZnFe: zincferrita y CuO: óxido de cobre.

Por su parte Saini *et al.* (2021), reporta que la aplicación de NPsZn a dosis de $200 \mu\text{g/g}$, aumentó significativamente todos los rasgos de crecimiento vegetativo, reportando diferencia estadística entre tratamientos a diferentes dosis de NPsZn y fuentes de Zn-EDTA y ZnSO_4 , reportando un promedio de 9.52 coronas por planta.

Mientras que Rahman *et al.* (2016) registraron un aumento en la cantidad de coronas en la fresa, lo que se atribuyó a la participación del Zn en forma de nanopartícula para provocar una división celular efectiva con una mejor fotosíntesis.

7.1.4. Biomasa seca total

Los resultados obtenidos para la variable biomasa seca total se muestran en la figura 8, donde se aprecia la diferencia estadística significativa entre tratamientos, donde el tratamiento T2 (ZnFe a 750 ppm con CE 1.5 dS/m) mostró la mayor biomasa, superando significativamente a todos los demás tratamientos, lo cual sugiere que las NPs de ZnFe a baja concentración son eficaces para mejorar el crecimiento bajo condiciones moderadas de salinidad, mientras que los tratamientos T3 (CuO a 750 ppm) y T5 (CuO a 1500 ppm), ambos bajo CE de 1.5 dS/m, presentaron las menores biomásas, indicando que las NPs de CuO a estas concentraciones podrían tener un efecto inhibitorio en el crecimiento de las plantas.

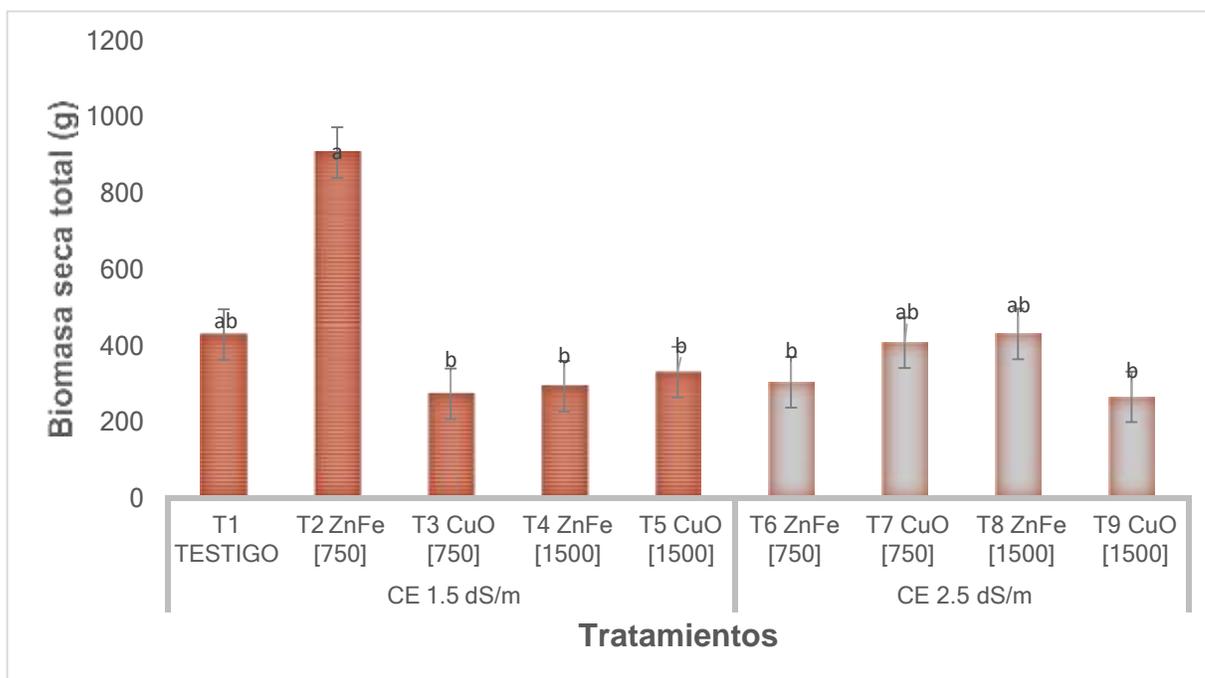


Figura 8. Efecto de la aplicación de manera foliar de NPs de óxido de cobre y ZincFerrita en fresa sometida a estrés salino para la variable biomasa seca total.

Promedios seguidos de la misma letra indican diferencias no significativas con $p < 0.05$ de acuerdo a la prueba de Duncan. CE: conductividad eléctrica, ZnFe: zincferrita y CuO: óxido de cobre.

Trabajos como el de González Jiménez *et al.* (2020) encontraron que el peso seco total disminuyó en conductividad de 2.7 dS/m, lo cual es atribuido al estrés hídrico ocasionado por la salinidad de la solución, lo cual está relacionado a la absorción de agua. Por su parte Navarro *et al.* (2008) consideran que los nanomateriales con mayores áreas superficiales podrían absorber, translocar y retener de manera más eficiente los nutrientes en el material vegetal mientras que Agnihotri *et al.* (2014) reportan que las NPs influyen en parámetros fisiológicos tales como; crecimiento de tallo y raíz en cultivos hortícolas como el chicharo, lo cual se puede atribuir a la producción de ácido indolacético actuando como un fitoestimulante hormonal, por lo que se espera un posible efecto positivo del uso de nanomateriales. El trabajo de Méndez-Argüello *et al.* (2015) reportan que las plantas expuestas a aplicaciones foliares de 50 mg/L de NPs ZnO dopadas con plata al 1.25 y 2.5%, incrementaron un 37.3% de biomasa total. Mientras que Panwar *et al.* (2012) encontraron mayor crecimiento y producción de biomasa seca en plantas de tomate en dosis de 20 mg L⁻¹ de NPs de ZnO de manera foliar, mismos resultados que concuerdan con los resultados obtenidos en esta investigación siendo el T2, donde la biomasa incrementó un 52% respecto al tratamiento control. Por su parte Prasad *et al.* (2012) obtuvieron que en plantas de cacahuate a dosis de 1000 mg L⁻¹ las NPs de ZnO promovieron la germinación, a su vez la elongación de tallo y raíz, por lo que el uso de NPs pueden tener un efecto positivo en estos parámetros agronómicos que determinan crecimiento y desarrollo en los cultivos.

7.1.5. Longitud de raíz

En el cuadro 6 se muestran los resultados obtenidos en la variable longitud de raíz, en el cual no se encontraron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos de nanopartículas con los diferentes niveles de salinidad y el tratamiento testigo. De

igual forma se mantiene la tendencia general, donde las aplicaciones con nanopartículas de CuO son las que presentan valores más interesantes respecto a la ferrita de zinc.

Cuadro 6. Efecto de la aplicación de manera foliar de NPs de óxido de cobre y ZincFerrita en fresa sometida a estrés salino para la variable longitud de raíz.

Tratamiento	Longitud de raíz
T1 Testigo	28.74 a
T2 ZnFe ₂ O ₄ [750] CE 1.5 dS/m	25.26 a
T3 CuO [750] CE 1.5 dS/m	26.06 a
T4 ZnFe ₂ O ₄ [1500] CE 1.5 dS/m	25.10 a
T5 CuO [1500] CE 1.5 dS/m	26.20 a
T6 ZnFe ₂ O ₄ [750] CE 2.5 dS/m	29.80 a
T7 CuO [750] CE 2.5 dS/m	30.00 a
T8 ZnFe ₂ O ₄ [1500] CE 2.5 dS/m	27.18 a
T9 CuO [1500] CE 2.5 dS/m	28.00 a

Promedios seguidos de la misma letra indican diferencias no significativas con $p < 0.05$ de acuerdo a la prueba de Duncan. CE: conductividad eléctrica, ZnFe: zincferrita y CuO: óxido de cobre.

Los datos obtenidos en este trabajo coinciden con lo reportado por Lin y Xing (2008), donde señalan que a dosis de 1000 mg L⁻¹ de NPs de óxido de zinc causa reducción en la biomasa, a su vez afectando el crecimiento del ápice de la raíz. Por su parte Stampoulis *et al.* (2009) reportaron que en plantas de calabaza a dosis de 1000 mg L⁻¹ de NPs ZnO afectaron la producción de biomasa total incluyendo la biomasa radicular. Sin embargo, González-Gómez (2017), reporta que en aplicación de NPs_{Cu} en el cultivo de sandía, la aplicación incremento un 14% el crecimiento de raíz con respecto al testigo, lo cual es atribuido a la estimulación por nanomateriales, esto podría atribuirse al hecho del tipo de cultivo o manejo que se utiliza en el cultivo de sandía, ya que sus resultados no coinciden con los obtenidos en este trabajo.

7.2. Variables bioquímicas

7.2.1. Contenido de savia y °Brix

En el cuadro N. 7 se muestran los resultados para la variable °Brix donde se identificaron diferencias estadísticas significativas, siendo el tratamiento T6 ZnFe₂O₄ [750] con CE 2.5 dS/m el que mostró el mayor nivel de °Brix (7.2), indicando un mayor contenido de azúcares en los frutos bajo estas condiciones. Esto sugiere que las nanopartículas de ZnFe a dosis bajas pueden mejorar la calidad del fruto en condiciones de alta salinidad, mientras que el tratamiento T5 CuO [1500] con CE 1.5 dS/m presentó el nivel más bajo de °Brix (4.8), lo que podría indicar que dosis altas de CuO no favorecen el contenido de azúcares bajo salinidad moderada. Respecto a la concentración de calcio en fruto los resultados señalan que los tratamientos T2 ZnFe₂O₄ [750] con CE 1.5 dS/m y T8 ZnFe₂O₄ [1500] con CE 2.5 dS/m mostraron las concentraciones más altas de Ca²⁺ (334 y 336 respectivamente). Esto indica que las nanopartículas de ZnFe pueden favorecer la absorción de calcio, especialmente bajo condiciones de salinidad elevada, mientras que el tratamiento T6 ZnFe₂O₄ [750] con CE 2.5 dS/m tuvo una concentración de calcio significativamente menor (68.4), lo cual podría estar asociado con un antagonismo en la absorción de calcio debido a la alta salinidad y/o a un efecto específico de las nanopartículas en esa dosis. Para la concentración de nitrato fue el tratamiento T9 CuO [1500] con CE 2.5 dS/m el que mostró la mayor concentración de nitratos (292), lo que podría ser indicativo de un efecto positivo en la absorción de nitratos bajo condiciones de alta salinidad. Mientras que el tratamiento T1 Testigo tuvo la menor concentración de nitratos (156), lo cual sugiere que la aplicación de nanopartículas, en general, mejora la absorción de nitratos. Finalmente, para la concentración de potasio los resultados muestran que el tratamiento T4 ZnFe₂O₄ [1500] con CE 1.5 dS/m presentó la mayor concentración de potasio (3340), lo que sugiere que la dosis alta de ZnFe en condiciones de salinidad moderada mejora significativamente la absorción de potasio y es el tratamiento T5 CuO [1500] con CE 1.5 dS/m mostró la menor concentración de potasio (1540), lo cual puede deberse a un posible antagonismo entre el cobre y el potasio.

Cuadro 7. Efecto de la aplicación de manera foliar de NPs de óxido de cobre y ZincFerrita en fresa sometida a estrés salino para la variable contenida de grados brix, calcio, nitrato y potasio en fruto.

Tratamientos	Parámetros de respuesta			
	°Brix	Ca ²⁺	NO ₃ ⁻	K ⁺
T1 Testigo	5.4 ab	258 ab	156 d	2480 abc
T2 ZnFe ₂ O ₄ [750] CE 1.5 dS/m	5.4 ab	334 a	184 abc	2620 abc
T3 CuO [750] CE 1.5 dS/m	6 ab	264 ab	180 abc	2266 abc
T4 ZnFe ₂ O ₄ [1500] CE 1.5 dS/m	6 ab	322 a	274 cd	3340 a
T5 CuO [1500] CE 1.5 dS/m	4.8 b	219 ab	264 bcd	1540 c
T6 ZnFe ₂ O ₄ [750] CE 2.5 dS/m	7.2 a	68.4 c	244 abcd	2840 ab
T7 CuO [750] CE 2.5 dS/m	5.9 ab	156 bc	200 abcd	2502 abc
T8 ZnFe ₂ O ₄ [1500] CE 2.5 dS/m	6.5 ab	336 a	224 abcd	2400 abc
T9 CuO [1500] CE 2.5 dS/m	6.6 ab	194 abc	292 a	1552 c

Promedios seguidos de la misma letra indican diferencias no significativas con $p < 0.05$ de acuerdo a la prueba de Duncan. CE: conductividad eléctrica, ZnFe: zincferrita y CuO: óxido de cobre.

El uso de las nanopartículas para la optimización de los cultivos está relacionado a la concentración aplicada. Jiménez-Avilez (2020) reporta que una aplicación mayor a la que tolera el cultivo puede tener efectos negativos, pudiendo llegar a sufrir intoxicación y no obtener el estímulo deseado. En el trabajo realizado por Rivera-Gutiérrez *et al.* (2021) reportaron un incremento en sólidos solubles a concentraciones de 200 mg L⁻¹ de NPs ZnO en el cultivo de melón, esto puede dar la pauta del hecho de considerar mitigar el uso de concentraciones altas de nanopartículas como las que se aplicaron en esta investigación. Por su parte González-Gómez (2017) reportó que en frutos de sandía la aplicación de NPs Cu, la concentración de potasio, calcio y zinc aumento, a su vez una mayor cantidad de sodio en la pulpa a dosis de 0.4 mg L⁻¹, lo cual coincide con los resultados en el T2 y T4, sin embargo no todas las dosis de NPs mostraron el mismo incremento en la variable calcio, a su vez el potasio no presentó un incremento,

ni diferencia estadística con respecto al testigo, esto podría deberse a que la dosis y número de aplicaciones repercuten en el comportamiento de la planta.

VIII. CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos se puede concluir que el uso de nanopartículas de óxido de cobre y zinc-ferrita puede ser una estrategia prometedora para mejorar tanto el rendimiento como la calidad de los cultivos de fresa bajo condiciones de estrés salino. Sin embargo, la efectividad de estas nanopartículas depende tanto de la dosis aplicada como del nivel de salinidad presente. En general, las dosis bajas a moderadas de $ZnFe_2O_4$ parecen ser más efectivas en mejorar la calidad del fruto (mayor °Brix) y la absorción de nutrientes (Ca^{2+} y K^+), mientras que las nanopartículas de CuO mostraron mejores resultados en la promoción del número de frutos. Estos resultados proporcionan un punto de partida para futuras investigaciones enfocadas en optimizar el uso de nanopartículas en la agricultura, con

el fin de desarrollar estrategias sostenibles para enfrentar los desafíos del estrés salino en cultivos sensibles como la fresa.

IX. LITERATURA CITADA

Abdelhameed, R. E., Abu-Elsaad, N. I., Abdel Latef, A. A. H., & Metwally, R. A. (2021). Tracking of zinc ferrite nanoparticle effects on pea (*Pisum sativum L.*) plant growth, pigments, mineral content and arbuscular mycorrhizal colonization. *Plants*, 10(3), 583.

Acevedo-León, D., Ossa-Orozco, C. P., & Torres-López, A. M. (2023). Evaluación de protocolos de síntesis de nanopartículas de cobre u óxidos de cobre. *Ingeniería*, 28(2).

Agnihotri, S., Mukherji, S., & Mukherji, S. (2014). Size-controlled silver nanoparticles synthesized over the range 5-100 nm using the same protocol and their antibacterial efficacy. *Rsc Advances*, 4(8), 3974-3983.

Aguilar Martínez, G., & García Domínguez, L. M. (2008). Diagnostico fitosanitario de la producción de fresa en Villa Guerrero, México [Informe técnico, Instituto Politécnico Nacional].

<https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/14640/1/DIAGNOSTICO%20FITOSANITARIO%20DE%20LA%20FRESA.pdf>

Ali-Dinar, H. M., Ebert, G., & Ludders, P. (1999). Crecimiento, contenido de clorofila, fotosíntesis y relaciones hídricas en guayaba (*Psidium guajava* L) bajo salinidad y diferente aporte de nitrógeno. *Gartenbauwissenschaft*, 64(2), 84.

Almeida, D. M., Oliveira, M. M. & Saibo, N. (2017). Regulation of Na⁺ and K⁺ homeostasis in plants: towards improved salt stress tolerance in crop plants. *Genetics and molecular biology*, 40(1): 326-345.

Ayers, R. S., & Westcot, D. W (1985). Water quality for agriculture. FAO Irrigation and Drainage Paper Núm. 29 Rev. 1. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. Rome. 186 p.

Ayers, R. S., & Westcot, D. W. (1989). Calidad del agua para la agricultura (Documento de la FAO sobre riego y drenaje No. 29). Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). Reimpreso en 1994

Barba Quiles, Rodrigo (2016). Producción de fresa sin suelo: Situación actual y perspectivas. Proyecto Fin de Carrera / Trabajo Fin de Grado, E.T.S.I. Agrónomos (UPM). https://oa.upm.es/43603/1/PFC_RODRIGO_BARBA_QUILES_1.pdf

Chávez, A. G., & Patiño, A. T. (2009). Las nanotecnologías: un paradigma tecnológico emergente. Dinámica y especialización en la innovación de las tecnologías. *Razón y Palabra*, (68), 1-32.

Bartual, R., Marsal, J. I., & Chomé, P. M. (2005). VARIEDADES DE FRESA. REGISTRO DE VARIEDADES COMERCIALES. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.

Callaway, R. M. (1994). Efectos facilitadores e interferentes de *Arthrocnemum subterminale* en las anuales de invierno. *Ecología*, 75(3), 681-686.

Cuñat Cursá, C. (2022). Efecto de un bioestimulante comercial (Balox®) sobre las respuestas a estrés salino del rábano (*Raphanus sativus*) (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València).

Dasgupta, N., Ranjan, S., Mundekkad, D., Ramalingam, C., Shanker, R. and Kumar, A. (2015). Nanotechnology in agro-food: From field to plate, *Food Research International* 69: 381-400.

Davarpanah, S., Tehranifar, A., Davarynejad, G., Abadía, J. y Khorasani, R. (2016). Efectos de las aplicaciones foliares de nanofertilizantes de zinc y boro sobre el rendimiento y la calidad del fruto de granada (*Punica granatum* cv. Ardestani). *Scientia horticulturae*, 210, 57-64.

DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN. NOM-021-RECNAT-2000. Norma Oficial Mexicana que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreos y análisis, 2002, vol. 31.

Dubey, A., & Mailapalli, D.R. (2016). Nanofertilizers, nanopesticides, nanosensors of pest and nanotoxicity in agriculture. En Lichtfouse, E. (ed.), *Sustainable Agriculture Reviews* (pp. 307-330). *Springer International Publishing*.

Estrada-Arellano, K. L., Vázquez-Vázquez, C., Betancourt-Galindo, R., MuyRangel, M. D., Valenzuela-Nuñez, L. M., García-Hernández, J. L., & GallegosRobles, M. Á. (2023). Fertilización foliar con nanopartículas de ZnO y su efecto en la producción, calidad biofísica y nutraceútica en frutos de nogal pecanero (*Carya illinoensis*). *Terra Latinoamericana*, 41.

FAO (2024). Suelos afectados por salinidad Recuperado 20 de octubre de 2024 <https://www.fao.org/soils-portal/soil-management/manejo-de-suelosproblematicos/suelos-afectados-por-salinidad/es/>

Faostat. 2020. Food and Agriculture Organization the United Nations Statistics. 2020 p. <http://www.fao.org/faostat/en/#home>.

Fernández, V. G. P., Cauich, I. C., Pat, Z. H. C., & Ascencio, F. J. (2016). Análisis de los indicadores de competitividad del cultivo de la fresa de México en el mercado mundial. *Textual*, (68), 45-63.

Ferriol, X. (2010). Propiedades nutritivas y otras curiosidades de la fresa. *CITRIFRUT*, 27(2).

Fraceto, L. F., Grillo, R., de Medeiros, G. A., Scognamiglio, V., Rea, G., & Bartolucci, C. (2016). Nanotechnology in agriculture: which innovation potential does it have?. *Frontiers in Environmental Science*, 4, 186737.

García-Gómez, C., Obrador, A., González, D., Babín, M., & Fernández, MD (2018). Estudio comparativo de la fitotoxicidad de nanopartículas de ZnO y acumulación de Zn en nueve cultivos cultivados en un suelo calcáreo y un suelo ácido. *Science of the total environment* , 644 , 770-780.

Gobierno de México. (2021). Solución Steiner. [httphttps ://www.gob.mx /cms /uplo/adjuntar/archivo/737326/7_Soluci.pag](https://www.gob.mx/cms/uplo/adjuntar/archivo/737326/7_Soluci.pag).

Godoy, F., Olivos-Hernández, K., Stange, C. & Handford, M. (2021). Abiotic Stress in Crop Species: Improving Tolerance by Applying Plant Metabolites. *Plants* (Basel, Switzerland),10(2):186.

González-Jiménez, S. L., Castillo-González, A. M., García-Mateos, M., ValdezAguilar, L. A., Ybarra-Moncada, C., & Avitia-García, E. (2020). Respuesta de fresa cv. Festival a la salinidad. *Revista fitotecnía mexicana*, 43(1), 53-60.

González-Gómez, H. (2017). Nanopartículas de cobre en hidrogeles de quitosán-PVA en el desarrollo y calidad nutracéutica de sandía injertada [Tesis de Maestría, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro]. <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/handle/123456789/43009>

Greenway, H., & Munns, R. (1980). Mecanismos de tolerancia a la sal en nonhalófitos. *Revista anual de fisiología vegetal*, 31(1), 149-190.

Gruda, N. 2005. Impact of environmental factors on product quality of greenhouse vegetables for fresh consumption. *Critical Reviews in Plant Sciences*. 24(3):227-247.

Hammond-Kosack, K. E. y Jones, J. D. G. (2015). Responses to plant pathogens. in: Jones, R. L., Buchanan, B. B. and Gruissem, W. (ed.) *Biochemistry and molecular biology of plants*, 2nd ed John Wiley & Sons Chichester, West Sussex. pp. 984-1050.

Hanin, M., Ebel, C., Ngom, M., Laplaze, L. & Masmoudi, K. (2016) New Insights on Plant Salt Tolerance Mechanisms and Their Potential Use for Breeding. *Front. Plant Sci.* 7:1787.

Hernández, E. (2023, 24 abril). Berries superan a la cerveza y el tequila: son el alimento mexicano con más ventas al mundo. *Forbes México*.

Hussain, A., Ali, S., Rizwan, M., ur Rehman, M. Z., Javed, M. R., Imran, M., & Nazir, R. (2018). Zinc oxide nanoparticles alter the wheat physiological response and reduce the cadmium uptake by plants. *Environmental Pollution*, 242, 1518-1526.

Hussain, S.Z., Naseer, B., Qadri, T., Fátima, T., Bhat, T.A. (2021). Fresa (*F. x ananassa*): morfología, taxonomía, composición y beneficios para la salud. En: Frutas cultivadas en las regiones montañosas del Himalaya. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-75502-7_17

Jenks, M. A., & Hasegawa, P. M. (Eds.). (2005). Estrés abiótico de las plantas (p. 270). Pub. Blackwell.

Jiménez Avilez, G. (2020). Aplicación foliar de nanopartículas de ZNO en la planta Cucurbita Pepo evaluando el crecimiento y desarrollo [Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro].
<http://repositorio.uaaan.mx/xmlui/handle/123456789/46964>

Juárez Maldonado, A., & González Morales, S. (2018). Aplicación de nanopartículas de selenio para inducir capacidad antioxidante y tolerancia a estrés en hortalizas. Protocolo de investigación Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.
<http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/handle/123456789/43224>

Kah, M., Beulke, S., Tiede, K. and Hofmann, T. (2013). Nanopesticides: State of Knowledge, Environmental Fate, and Exposure Modeling. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 43(16): 1823-1867.
<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10643389.2012.671750>

Kirschbaum, D. S. (2022). Características botánicas, fisiología y tipos de variedades de fresas. SPE3 (España).

Khodakovskaya, M., Dervishi, E., Mahmood, M., Xu, Y., Li, Z., Watanabe, F., & Biris, A. S. (2009). Carbon nanotubes are able to penetrate plant seed coat and dramatically affect seed germination and plant growth. *ACS nano*, 3(10), 3221-3227.

Khodashenas, B., & Ghorbani, H. R. (2014). Síntesis de nanopartículas de cobre: una visión general de los distintos métodos. *Revista Coreana de Ingeniería Química*, 31, 1105-1109.

Khot, L. R., Sankaran, S., Maja, J. M., Ehsani, R., & Schuster, E. W. (2012). Applications of nanomaterials in agricultural production and crop protection: a review. *Crop protection*, 35, 64-70.

Kozlowski, T. T. & Pallardy, S. G. (1997). Physiology of Woody Plants. Second Edition. Academic Press, San Diego. 411 pp.

Kumar, G. D., Natarajan, N., & Nakkeeran, S. (2016). Antifungal activity of nanofungicide Trifloxystrobin 25%+ Tebuconazole 50% against *Macrophomina phaseolina*. *African Journal of Microbiology Research*, 10(4), 100-105.

Kuznetsov, V. V., & Shevyakova, N. I. (1997). Respuestas al estrés de las células de tabaco a altas temperaturas y salinidad. Acumulación de prolina y fosforilación de polipéptidos. *Physiologia Plantarum*, 100(2), 320-326.

Lamz Piedra, A., & González Cepero, M. C. (2013). La salinidad como problema en la agricultura: la mejora vegetal una solución inmediata. *Cultivos tropicales*, 34(4), 3142

Levitt, J. (1980). Respuestas de las plantas al estrés ambiental, Volumen 1: Estrés por enfriamiento, congelación y alta temperatura (pp. 497-pp).

Lichtenthaler, H. K. (1988). In vivo chlorophyll fluorescence as a tool for stress detection in plants: En: Applications of Chlorophyll Fluorescence. Lichtenthaler, H. K. (Ed.). Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 129-142 pp

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

Liu, R., y Lal, R. (2015). Potencial de las nanopartículas diseñadas como fertilizantes para aumentar la producción agronómica. *Science of the total environment*, 514, 131139.

Lin, D. y Xing, B. (2008). Root uptake and phytotoxicity of ZnO nanoparticles. *Environmental Science and Technology*, 42: 5580-5585.

López Meza, G. S. (2016). *Respuesta al estrés provocado por medio de aplicación foliar de diferentes productos a altas concentraciones en fresa Cultivar «Albión»* [Tesina, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro]. <http://repositorio.uaaan.mx:8080/bitstream/handle/123456789/8154/T20871%20LOPEZ%20MEZA%20GREGORIO%20SAID%20%2064155.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Malsch, I., Subramanian, V., Semenzin, E., Hristozov, D., & Marcomini, A. (2015). Supporting decision-making for sustainable nanotechnology. *Environment Systems and Decisions*, 35(1), 54-75

Martínez Téllez, JJ, & León Gallegos, HM (2004). Producción de fresa en invernadero. En FMemorias del IV Simposio Nacional de Horticultura. Invernaderos: Diseño, Manejo y Producción (p. 123)

Matamoros-Solorzáno, G. (1996). La fresa, prácticas del cultivo. Programa de comunicación agrícola, Universidad de Costa Rica. 1-29 pp.

Mata-Fernández, I., Rodríguez-Gamiño, M. L., López-Blanco, J., & Vela-Correa, G. (2014). Dinámica de la salinidad en los suelos. *Revista Digital del Departamento El Hombre y srobu Ambiente*, 1(5), 26-35.

Mata, G. E. (2015). Importancia del hierro (Fe) en la agricultura peruana. Recuperado de [http://drokasa.pe/application/webroot/imgs/notas/Importancia del Hierro \(Fe\) en la agricultura peruana.pdf](http://drokasa.pe/application/webroot/imgs/notas/Importancia_del_Hierro_(Fe)_en_la_agricultura_peruana.pdf)

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 annum* por nanopartículas de óxido de zinc. *Nova scientia*, 8(17), 140-156.

Mendoza, A. B. (2002). Ecofisiología y bioquímica del estrés en plantas. Buenavista, México: Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

Miguel-Rojas, C., Perez-de-Luque, A., & Sillero, J. (2020). How nanotechnology would control fungal diseases. *ON PLANT NANOTECHNOLOGY*, 48.

Minagri (PERÚ, MINISTERIO DE AGRICULTURA). (2008). Estudio de fresa en el Perú y el mundo. (11 de Marzo de 2018).

Mousavi, S. C. T., Nguyen-Farmer, E. and Kellenberger, S. (2014). Measuring surface potential changes on leaves. *Nature Protocols*. 9(8):1997-2004. 10.1038/nprot.2014.136

Mukherjee, A., Majumdar, S., Servin, A. D., Pagano, L., Dhankher, O. P., & White, J. C. (2016). Carbon nanomaterials in agriculture: a critical review. *Frontiers in plant science*, 7, 172.

Naderi, M. R. and A. Danesh-Shahraki. 2013. Nanofertilizers and their roles in sustainable agriculture. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*. 5 (19): 2229- 2232.

Navarro, E., Baun, A., Behra, R., Hartmann, N. B., Filser, J., Miao, A. J., & Sigg, L. (2008). Environmental behavior and ecotoxicity of engineered nanoparticles to algae, plants, and fungi. *Ecotoxicology*, 17, 372-386.

Nieto, Z., & Donovan, R. (2013). Evaluación de técnicas hidropónicas de producción en el cultivo de fresa (*fragaria x ananassa*) bajo invernadero (Doctoral dissertation, TESIS. 73 pág).

Nilsen, E. T., & Orcutt, D. M. (1996). Fisiología de plantas sometidas a estrés. Factores abióticos (pp. xii+-689).

Nuruzzaman, M. D., Rahman, M. M., Liu, Y., & Naidu, R. (2016). Nanoencapsulation, nano-guard for pesticides: a new window for safe application. *Journal of agricultural and food chemistry*, 64(7), 1447-1483.

Panta, S., Flowers, T., Lane, P. A., Doyle, R., Haros, G., & Shabala, S. N. (2014). Halophyte agriculture: Success stories. *Environmental and Experimental Botany*, 107:71-83.

Panwar, J., Jain, N.; Bhargaya, A., Akthtar, M.S., Yun, Y.S. (2012). Positive effect of zinc oxide nanoparticles on tomato plants: A step towards developing nanofertilizers. *International Conference on Environmental Research and Technology (ICERT)*. Malaysia. 8 pp.

Paucar Guamialamá, L. J. (2022). Evaluación del rendimiento del cultivo de fresa (*Fragaria* sp) en las variedades Albión y Monterrey mediante dos sistemas de producción en el Centro Experimental “San Francisco” cantón Huaca, provincia del Carchi. UPEC

Pérez-Saldaña, I., & Fernández Batanero, J. Á. (2008). La Fresa de Huelva. Consejería de Agricultura y Pesca

Pradhan, S., Patra, P., Mitra, S., Dey, K. K., Basu, S., Chandra, S., and Goswami, A. (2015). Copper nanoparticle (CuNP) nanochain arrays with a reduced toxicity response: a biophysical and biochemical outlook on vigna radiata. *J. Agric. Food Chem.* 63(10):2606-2617.

Prasad, T.N., Sudhakar, P., Sreenivasulu, Y., Latha, P., Munaswamy, V., Reddy, K.R. y Pradeep, T. (2012). Effect of nanoscale zinc oxide particles on the germination, growth and yield of peanut. *Journal of Plant Nutrition*, 35:905-927.

Rajput, V. D., Minkina, T., Suskova, S., Mandzhieva, S. Tsitsuashvili, V., Chaplgin, V. and Fedorenko, A. (2018). Effects of copper nanoparticles (CuO NPs) on crop plants: a mini review. *Bionanoscience*. 8(1):36-42.

Rahman, MM, Sahadat, M., Rahul, S., Roni, MZK, Uddin, AFMJ, (2016). Efecto de la pulverización de B y Zn antes de la cosecha en el rendimiento y la calidad de la fresa. *Int. J. Bus. Soc. Sci. Res.* 5, 41-46.

Rivadeneira-Santacruz D. G., (2016). Evaluación de tres dosis de zeolita para optimizar el rendimiento del cultivo de Fresa (*Fragaria x ananassa*), en el cantón Tulcán provincia del Carchi (Bachelor's thesis).

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

Ruiz C., J.A., G. Medina G., I. J. González A., H.E. Flores L., G. Ramírez O., C. Ortiz T., K.F. Byerly M. y R.A. Martínez P. (2013). Requerimientos agroecológicos de cultivos. Segunda Edición. Libro Técnico Núm. 3. INIFAP. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias-CIRPAC-Campo Experimental Centro Altos de Jalisco. Tepatitlán de Morelos, Jalisco, México. 564 p.

Roblero Dominguez, A. de J. (2016). Efecto de compuestos orgánicos asperjados sobre el crecimiento y producción de fresa cultivar «Albión» [Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro]. <http://repositorio.uaaan.mx:8080/bitstream/handle/123456789/8156/64157%20ROBLERO%20DOMINGUEZ%2c%20ANTONIO%20DE%20JESUS%20%20TESIS.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

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

Saborío, D. F. (2002). Bioestimulantes foliares. Universidad de Costa Rica. Centro de investigaciones agronómica, Costa Rica. 75 p.

SAGARPA. 2017. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y

Alimentación. Planeación Agrícola Nacional 2017-2030. Fresa Mexicana. 20 p.

Saini, S., Kumar, P., Sharma, NC, Sharma, N. y Balachandar, D. (2021). Fertilización con Zn nano-habilitada contra análogos de Zn convencionales en fresa (*Fragaria x ananassa* Duch.). *Scientia Horticulturae*, 282, 110016.

SAN ANDREAS. (s. f.). Llahuen. Recuperado 20 de octubre de 2024, de <https://www.llahuen.com/san-andreas>.

Sánchez-Valdés, S., Rodríguez-González, J. A., Sánchez-Martínez, A. C., Bustos, K., Cruz, M. V., Martínez, L. C., ... & Ramírez-Barron, S. N. (2024). Tendencias en el uso de nanopartículas en la agricultura. *Revista Latinoamericana de Difusión Científica*, 6(11), 20-39.

Schmid, G., & Corain, B. (2003). Nanoparticulated gold: syntheses, structures, electronics, and reactivities. *European Journal of Inorganic Chemistry*, (17), 30813098.

Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural, S. (2021). Mapa Agrícola de afectación por salinidad en México. gov.mx. <https://www.gob.mx/agricultura/acciones-y-programas/mapa-agricola-de-afectacion-por-salinidad-en-mexico>

Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural, S (SADER). (2022). ¿Qué quiere la niña fresa? México y su producción nacional. gov.mx.

Servin, A., Elmer, W., Mukherjee, A., De la Torre-Roche, R., Hamdi, H., White, J.C. y Dimkpa, C. (2015). A review of the use of engineered nanomaterials to suppress plant disease and enhance crop yield. *Journal of Nanoparticle Research*, 17: 1-21.

Shannon, M. C., Grieve, C. M. and Francois, L. E. (1994). Whole-plant to salinity. p. 199-244. En: Wilkinson, R. E., ed. *Plant-environment interactions*. Nueva York: Marcel Dekker.

Singla, R., Guliani, A., Kumari, A., y Yadav, SK (2016). Nanopartículas metálicas, problemas de toxicidad y aplicaciones en medicina. *Materiales a nanoescala para la administración dirigida de fármacos, el diagnóstico y la regeneración tisular*, 41-80.

Somasundaran, P., Fang, X., Ponnurangam, S. and Li, B. (2010). Nanoparticles: Characteristics, mechanisms and modulation of biotoxicity. *KONA powder and particle journal*. 28(1):38-49.

Stampoulis, D., Sinha, S.K. y White, J.C. (2009). Assay-dependent phytotoxicity of nanoparticles to plants. *Environmental Science & technology*, 43: 9473-947.

Steiner A. A. (1984). The universal nutrient solution. In: Proceedings of the Sixth International Congress on Soilless Culture. 29 April - 5 May 2004. Secretariat of the International Society for Soilless Culture. Lunteren, The Netherlands. pp:633-649.

Strand, L. L. (1994). Integrated Pest Management for Strawberries. Publ. 3351. University of California, Division of Agriculture and Natural Resources. Berkeley, California.

Sonneveld, C., Baas, R., Nussen, H. M. C. and De Hoog, J. (1999). Salt tolerance of flower crops in soilless culture. En: *Journal of Plant Nutrition*. Vol. 22, no. 6; p. 1033-1048.

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).

Taboada, M. A., Damiano, F., & Lavado, R. S. (2009). Inundaciones en la región pampeana. Consecuencias sobre los suelos. Alteraciones de la fertilidad de los suelos: el halomorfismo, la acidez, el hidro-morfismo y las inundaciones, 103-127.

Tambussi, E. A. (2005). Fotosíntesis, fotoprotección, productividad y estrés abiótico: algunos casos de estudio. Universitat de Barcelona.

Usman, M., Farooq, M., Wakeel, A., Nawaz, A., Cheema, S. A., ur Rehman, H. and Sanauallah, M. (2020). Nanotechnology in agriculture: Current status, challenges and future opportunities. *Sci. Total, Environ.* 721(1):137778.

Vanderroost M., Ragaert, P., Devlieghere, F., y De Meulenaer, B. (2014). Envasado inteligente de alimentos: la próxima generación. *Tendencias en ciencia y tecnología de los alimentos*, 39 (1), 47-62.

Varela, S. A. (2010). Aspectos básicos de la fisiología en respuesta al estrés y el clima como condicionante del mismo en las plantas. INTA EEA Bariloche. Comun. Técnica, 78, 1-23.

Veobides-Amador, H., Guridi-Izquierdo, F., & Vázquez-Padrón, V. (2018). Las sustancias húmicas como bioestimulantes de plantas bajo condiciones de estrés ambiental. *Cultivos tropicales*, 39(4), 102-109.

Yusefi-Tanha, E., Fallah, S., Rostamnejadi, A., & Pokhrel, L. R. (2020). Zinc oxide nanoparticles (ZnONPs) as a novel nanofertilizer: Influence on seed yield and antioxidant defense system in soil grown soybean (*Glycine max* cv. Kowsar). *Science of the Total Environment*, 738, 140240.

Zhang, X. and Liu, C. J. (2015). Multifaceted regulations of gateway enzyme phenylalanine ammonia-lyase in the biosynthesis of phenylpropanoids. *Mol. Plant.* 8(1):17-27.

Zhou, D.; Lin, Z.; Liu, L.; Zimmermann, D. (2013). Assessing secondary soil salinization risk based on the PSR sustainability framework. *J. Environ. Manage.* 128(15): 642-654.