

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE HORTICULTURA



Efecto De Las Nanopartículas De Quitosán (NPs CS) En La Producción y Calidad
De La Lechuga (*Lactuca sativa. L*)

Por:

NILDA PATRICIA PÉREZ GÓMEZ

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN HORTICULTURA

Saltillo, Coahuila, México.

Noviembre, 2021.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO DE HORTICULTURA

Efecto De Las Nanopartículas De Quitosán (NPs CS) En La Producción y Calidad
De La Lechuga (*Lactuca sativa. L*)


Por:
NILDA PATRICIA PÉREZ GÓMEZ

TESIS
Presentada como requisito parcial para obtener el título de:
INGENIERO AGRÓNOMO EN HORTICULTURA

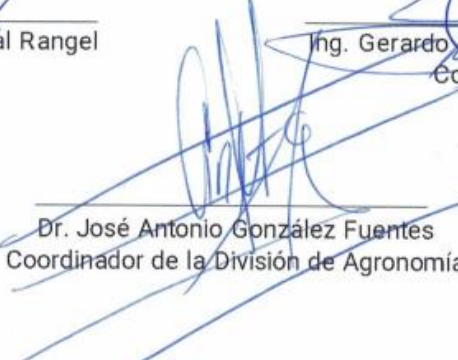
Aprobada por el Comité de Asesoría:


Dr. Marcelino Cabrera de la Fuente
Asesor Principal Interno


Dra. Hortensia Ortega Ortiz
Asesora Principal Externa


Dr. Alberto Sandoval Rangel
Coasesor


Ing. Gerardo Rodríguez Galindo
Coasesor


Dr. José Antonio González Fuentes
Coordinador de la División de Agronomía



Saltillo, Coahuila, México.

Noviembre, 2021.

Declaración de no plagio

El autor quien es el responsable directo, jura bajo protesta de decir verdad que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos: Reproducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (corta y pega); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio); comprar, robar o pedir prestados los datos o la tesis para presentarla como propia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin usar comillas; utilizar ideas o razonamientos de un autor sin citarlo; utilizar material digital como imágenes, 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 las autoridades correspondientes. Por lo anterior me responsabilizo de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaro que este trabajo es original.

Pasante



Nilda Patricia Pérez Gómez

AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirme concluir con mis estudios, bendiciendo mi camino día a día para lograr la finalización de mi carrera que me ayudará a fortalecerse en la vida.

A mi querida “**Alma Terra Mater**”, por brindarme la oportunidad de realizar mis estudios en sus instalaciones. Gracias por ser mi casa durante este tiempo y otorgarme las facilidades de lograr este proyecto de vida, que es un sueño hecho realidad.

Al Dr. Marcelino Cabrera De la Fuente: Le agradezco por darme la oportunidad de formar parte de este proyecto, por brindarme su apoyo, por su paciencia y por compartir su conocimiento profesional.

A la Dra. Julia Medrano: gracias por su apoyo incondicional, por dedicarme tiempo y por su paciencia.

A la Dra. Hortensia Ortega Ortiz: le agradezco por permitirme contribuir en el Proyecto de Ciencia Básica A1-S-20293, por su tiempo y dedicación hacia sus alumnos.

Al Dr. Alberto Sandoval Rangel y al Ing. Gerardo Rodríguez por su tiempo, dedicación y por formar parte de este proyecto.

A mis profesores

También quiero agradecer a todos los profesores que me impartieron clases, que gracias a ellos estoy donde estoy, por compartir sus conocimientos y por su dedicación. Ing. Galindo, Dr. Víctor Reyes, Dr. Armando, Dra. Fabiola, Dr. Leobardo, Ing. Martina, Ing. Cesar, Dra. Rosalinda, Dr. Bustamante, Dr. Valentín, Ing. Alfonso Rojas y Dr. Benavides.

A mis compañeros de generación, y también compañeros que me apoyaron durante este proyecto: Ángeles, Tomás, Felícito, Citlaly y Emmanuel.

A mis amigos

Le agradezco por brindarme su amistad y apoyo en todo momento a lo largo de mi desarrollo profesional y por los momentos compartidos: Micaela, Miguel, Selina, Lupita, Kelly, Claudia, Elisa y Verónica.

A mi familia

Por su apoyo incondicional a mis padres y hermanas Isabela, Wendy en especial a mi esposo Jesús García Quintana.

DEDICATORIA

A Dios por darme vida, salud y fuerza para seguir adelante día con día. Gracias por hacer este sueño realidad.

A mi hija Hannah Yamile García Pérez ella es mi gran motivación para seguir adelante, su afecto y su cariño son los detonantes de mi felicidad, de mi esfuerzo, de mis ganas de buscar lo mejor. Aun a tu corta edad, me has enseñado y me sigues enseñando muchas cosas de esta vida. Te agradezco por ayudarme a encontrar el lado dulce y no amargo de la vida.

A mis padres Ramiro Pérez Pérez y Carmen Gómez Sánchez realmente no me alcanzaría la vida para pagarles todas las oraciones, desvelos y bendiciones que siempre me dieron. Dios siempre esté con ustedes, los amo con todo mi corazón.

A mis Hermanos: le agradezco a Dios por haberlos mandado a formar parte de mi vida. Mary, Ángela, Braulio, Alex, Armando, Isabel, Grisi, Wendy y Erick. Gracias a todos ustedes por confiar en mí, por todo el amor y cariño que me tienen.

A mi esposo Jesús García Quintana tu ayuda ha sido fundamental. Este proyecto no fue fácil, pero estuviste motivándome y ayudándome hasta donde tus alcances lo permitían.

A mis cuñados: Paty, Mayra, Arturo gracias también a ustedes por formar parte de mi vida y por su gran apoyo.

A todos ellos con cariño les dedico mi logro como **Ingeniero Agrónomo en Horticultura** y sin ellos nada sería de mí, **gracias.**

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | Pág. |
|---|-------------|
| AGRADECIMIENTOS | <i>i</i> |
| DEDICATORIA | <i>ii</i> |
| ÍNDICE DE CUADROS | v |
| ÍNDICE DE FIGURAS | <i>vii</i> |
| RESUMEN | <i>viii</i> |
| I INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1 Objetivo general | 3 |
| 1.2 Objetivos específicos | 3 |
| 1.3 Hipótesis | 3 |
| 1.4 Justificación | 3 |
| II REVISIÓN DE LITERATURA | 4 |
| 2.1 La nanotecnología | 4 |
| 2.2 Descripción de quitosán | 5 |
| 2.3 Nanopartículas de quitosán (NPs CS) | 6 |
| 2.4 Importancia de las nanopartículas de quitosán en los cultivos | 6 |
| 2.5 Origen de la lechuga | 7 |
| 2.6 Importancia económica | 7 |
| 2.7 Clasificación taxonómica de lechuga | 8 |
| 2.8 Descripción botánica | 8 |
| 2.8.1 Raíz | 8 |
| 2.8.2. Hoja | 8 |
| 2.8.3 Semilla | 8 |
| 2.8.4 Flor | 9 |
| 2.8.5 Tallo | 9 |
| 2.9 Fenología | 9 |
| 2.10 Trasplante | 9 |
| 2.11 Problemas fitosanitarios | 10 |
| 2.12 Cosecha de lechuga | 10 |
| 2.13 Conductancia estomática | 10 |
| 2.14 Función e importancia de las estomas | 11 |
| 2.15 Importancia de los antioxidantes | 11 |
| III MATERIALES Y MÉTODOS | 12 |
| 3.1 Ubicación del experimento | 12 |
| 3.2 Material vegetal y sustrato | 12 |
| 3.3 Establecimiento del cultivo | 13 |
| 3.3.1 Trasplante | 13 |
| 3.4. Tratamientos evaluados | 13 |
| 3.5 Manejo del cultivo | 14 |
| 3.5.1 Riego | 14 |
| 3.6 Labores culturales | 15 |
| 3.6.1 Atado | 15 |

| | | |
|-----------|--|----|
| | 3.6.2 Deshierbe | 15 |
| | 3.6.3 Cosecha | 15 |
| | 3.6.4 Control de plagas | 16 |
| | 3.7 Diseño experimental | 16 |
| | 3.8 Variables de producción evaluadas | 16 |
| | 3.8.1 Determinación de las actividades enzimáticas | 17 |
| IV | RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 21 |
| | 4. 1 Resultados | 20 |
| | 4.1.1 Rendimiento (peso de cabeza) | 20 |
| | 4.1.2 Altura de planta | 21 |
| | 4.1.3 Diámetro de cabeza | 22 |
| | 4.1.4 Peso fresco | 23 |
| | 4.1.5 Porcentaje de materia seca (%MS) | 24 |
| | 4.1.6 Conductancia estomática | 25 |
| | 4.1.7 Catalasa | 26 |
| | 4.1.8 Ascorbato peroxidasa (APX) | 27 |
| | 4.1.9 Superóxido dismutasa (SOD) | 27 |
| | 4.1.10 Glutación Peroxidasa (GPX) | 27 |
| V | CONCLUSIONES | 30 |
| VI | LITERATURA CITADA | 31 |
| | APÉNDICE | 35 |

ÍNDICE DE CUADROS

| | | Pág. |
|-------------------|---|------|
| Cuadro 1 | Dosis aplicada de las NPs Cs en el cultivo de lechuga (Harris Island). | 14 |
| Cuadro 2 | Composición de la solución (Steiner, 1961). | 14 |
| Cuadro 2 | Tabla de fertilización para 200 L (Steiner, 1961). | 15 |
| Cuadro 3 | Procedimiento para la determinación de SOD. | 18 |
| Cuadro A1 | Análisis de varianza ($p<0.05$) para altura de planta con la aplicación de nanopartículas de quitosán en lechuga a las dosis de 0, 0.5, 1, 2, 4, 8 mg y TPP. | 35 |
| Cuadro A2 | Comparación de medias de la variable altura de planta con la aplicación de nanopartículas de quitosán en lechuga a las dosis de 0, 0.5, 1, 2, 4, 8 mg y TPP. | 35 |
| Cuadro A3 | Análisis de varianza ($p<0.05$) para conductancia estomática con la aplicación de nanopartículas de quitosán en lechuga a las dosis de 0, 0.5, 1, 2, 4, 8 mg y TPP. | 35 |
| Cuadro A4 | Comparación de medias de la variable conductancia estomática con la aplicación de nanopartículas de quitosán en lechuga a las dosis de 0, 0.5, 1, 2, 4, 8 mg y TPP. | 36 |
| Cuadro A5 | Análisis de varianza ($p<0.05$) en rendimiento, con la aplicación de nanopartículas de quitosán en lechuga a las dosis de 0, 0.5, 1, 2, 4, 8 mg y TPP. | 36 |
| Cuadro A6 | Comparación de medias en rendimiento (peso de cabeza) con la aplicación de nanopartículas de quitosán en lechuga a las dosis de 0, 0.5, 1, 2, 4, 8 mg y TPP. | 36 |
| Cuadro A7 | Análisis de varianza ($p<0.05$) en diámetro de cabeza, con la aplicación de nanopartículas de quitosán en lechuga a las dosis de 0, 0.5, 1, 2, 4, 8 mg y TPP. | 37 |
| Cuadro A8 | Comparación de medias en diámetro de cabeza, con la aplicación de nanopartículas de quitosán en lechuga a las dosis de 0, 0.5, 1, 2, 4, 8 mg y TPP. | 37 |
| Cuadro A9 | Análisis de varianza ($p<0.05$) en peso fresco, con la aplicación de nanopartículas de quitosán en lechuga a las dosis de 0, 0.5, 1, 2, 4, 8 mg y TPP. | 37 |
| Cuadro A10 | Comparación de medias en peso fresco, con la aplicación de nanopartículas de quitosán en lechuga a las dosis de 0, 0.5, 1, 2, 4, 8 mg y TPP. | 38 |
| Cuadro A11 | Análisis de varianza ($p<0.05$) en %MS, con la aplicación de nanopartículas de quitosán en lechuga a las dosis de 0, 0.5, 1, 2, 4, 8 mg y TPP. | 38 |

| | | |
|-------------------|--|----|
| Cuadro A12 | Comparación de medias en %MS, con la aplicación de nanopartículas de quitosán en lechuga a las dosis de 0, 0.5, 1, 2, 4, 8 mg y TPP. | 38 |
| Cuadro A13 | Análisis de varianza ($p<0.05$) en la enzima CAT, con la aplicación de nanopartículas de quitosán en lechuga a las dosis de 0, 0.5, 1, 2, 4, 8 mg y TPP. | 39 |
| Cuadro A14 | Comparación de medias en la variable CAT, con la aplicación de nanopartículas de quitosán en lechuga a las dosis de 0, 0.5, 1, 2, 4, 8 mg y TPP. | 39 |
| Cuadro A15 | Análisis de varianza ($p<0.05$) en la enzima APx, con la aplicación de nanopartículas de quitosán en lechuga a las dosis de 0, 0.5, 1, 2, 4, 8 mg y TPP. | 39 |
| Cuadro A16 | Comparación de medias en la variable APx, con la aplicación de nanopartículas de quitosán en lechuga a las dosis de 0, 0.5, 1, 2, 4, 8 mg y TPP. | 40 |
| Cuadro A17 | Análisis de varianza ($p<0.05$) en la enzima SOD, con la aplicación de nanopartículas de quitosán en lechuga a las dosis de 0, 0.5, 1, 2, 4, 8 mg y TPP. | 40 |
| Cuadro A18 | Comparación de medias en la variable APx, con la aplicación de nanopartículas de quitosán en lechuga a las dosis de 0, 0.5, 1, 2, 4, 8 mg y TPP. | 40 |
| Cuadro A19 | Análisis de varianza ($p<0.05$) en la enzima GPX, con la aplicación de nanopartículas de quitosán en lechuga a las dosis de 0, 0.5, 1, 2, 4, 8 mg y TPP. | 41 |
| Cuadro A20 | Comparación de medias en la variable GPX, con la aplicación de nanopartículas de quitosán en lechuga a las dosis de 0, 0.5, 1, 2, 4, 8 mg y TPP. | 41 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | | Pág. |
|------------------|---|------|
| Figura 1 | Estructura química del quitosán. | 5 |
| Figura 2 | Plantas de lechuga a los 9 días después de la siembra. | 12 |
| Figura 3 | Preparación de sustrato. | 12 |
| Figura 4 | Planta de lechuga Harris Island 3 DDT | 13 |
| Figura 5 | Cosecha de lechuga de la variedad Parris Island. | 15 |
| Figura 6 | Efecto de la aplicación de nanopartículas de quitosán en lechuga a las dosis de 0, 0.5, 1, 2, 4, 8 mg y TPP en rendimiento. | 21 |
| Figura 7 | Efecto de la aplicación de nanopartículas de quitosán en lechuga a las dosis de 0, 0.5, 1, 2, 4, 8 mg y TPP en altura de planta. | 22 |
| Figura 8 | Efecto de la aplicación de nanopartículas de quitosán en lechuga a las dosis de 0, 0.5, 1, 2, 4, 8 mg y TPP en diámetro de cabeza. | 23 |
| Figura 9 | Efecto de la aplicación de nanopartículas de quitosán en lechuga a las dosis de 0, 0.5, 1, 2, 4, 8 mg y TPP en peso fresco. | 24 |
| Figura 10 | Efecto de la aplicación de nanopartículas de quitosán en lechuga a las dosis de 0, 0.5, 1, 2, 4, 8 mg y TPP en %MS. | 25 |
| Figura 11 | Efecto de la aplicación de nanopartículas de quitosán en lechuga a las dosis de 0, 0.5, 1, 2, 4, 8 mg y TPP en conductancia estomática. | 26 |
| Figura 12 | Efecto de la aplicación de nanopartículas de quitosán en lechuga a las dosis de 0, 0.5, 1, 2, 4, 8 mg y TPP en catalasa. | 27 |
| Figura 13 | Efecto de la aplicación de nanopartículas de quitosán en lechuga a las dosis de 0, 0.5, 1, 2, 4, 8 mg y TPP en ascorbato peroxidasa. | 28 |
| Figura 14 | Efecto de la aplicación de nanopartículas de quitosán en lechuga a las dosis de 0, 0.5, 1, 2, 4, 8 mg y TPP en superóxido dismutasa. | 28 |
| Figura 15 | Efecto de la aplicación de nanopartículas de quitosán en lechuga a las dosis de 0, 0.5, 1, 2, 4, 8 mg y TPP en glutatión peroxidasa. | 29 |

RESUMEN

La nanotecnología es una alternativa en la agricultura moderna, que nos permite incrementar el rendimiento y calidad de los alimentos de manera sustentable. Las nanopartículas (NPs) son una amplia clase de materiales que incluyen sustancias particulares. La aplicación de las nanopartículas de quitosán (NPs CS) en los cultivos ha demostrado que hay mayor rendimiento, en el recubrimiento de semillas mostraron mayor germinación debido a que son materiales naturales con excelentes características fisicoquímicas, antimicrobianas, elicitoras y biológicas. La lechuga es una de las hortalizas más importantes a nivel mundial por su consumo y por su gran importancia económica debido a su alta demanda en el mercado, en los últimos años el aumento de la población humana es cada vez mayor por ello se espera que la producción y calidad de esta hortaliza se aumente, por lo cual la aplicación de las NPs CS y la agricultura protegida son una alternativa muy recomendable. En base a lo anterior, el objetivo de este proyecto fue determinar el efecto de la aplicación de las NPs CS tanto en el rendimiento y la calidad nutracéutica de la lechuga, utilizando un diseño experimental completamente al azar con 7 tratamientos y 10 repeticiones. Para ello, los tratamientos aplicados de forma foliar fueron las NPs CS en dosis de: 0, 0.5, 1, 2, 4, 8 mg, un testigo absoluto y un tratamiento control con TPP. Se utilizaron plantas de lechuga orejona variedad Parris Island, como sustrato se usó Peat moss y perlita en una relación 2:1 en bolsas de plástico negras de 10 L. Los resultados mostraron que tras la aplicación foliar de las NPs CS en plantas de lechuga hubo un incremento en rendimiento, diámetro de cabeza, conductancia estomática y respecto a la calidad se obtuvo un incremento en la enzima catalasa cuando se aplicó la dosis de 0.5 mg de NPs CS y una reducción en la superóxido dismutasa, glutatión peroxidasa. Aunque, se requieren más estudios para comprender los mecanismos por los cuales las NPs CS mejoran la calidad y rendimiento en el cultivo de la lechuga.

I. INTRODUCCIÓN

La nanotecnología es una alternativa en la agricultura moderna al producir agroproductos como nanofertilizantes, nanopesticidas, nanoherbicidas y nanosensores, que permiten incrementar el rendimiento de alimentos de manera sustentable y reducir el impacto ambiental. También ofrece una gran oportunidad en la industria agroalimenticia moderna, aunque no se debe perder de vista que también puede generar algunos riesgos debido a la incorporación de nanocompuestos en el ambiente (Saldivar, 2018).

Existe un gran número de nanopartículas (NPs) y recientemente se han descubierto los efectos de las nanopartículas de quitosán (NPs CS). El quitosán (CS) nombre dado a la quitina desacetilada, es un polisacárido natural que se obtiene principalmente del exoesqueleto de los crustáceos tales como cangrejos y camarones, es biocompatible, no tóxico y biodegradable, lo que lo convierte en un recurso renovable de gran potencialidad para aplicaciones agrícolas, dadas sus excelentes propiedades biológicas (Arrebato y Penice, 2015). Además, el CS es un bioestimulante natural que promueve la síntesis de compuestos fenólicos y algunos otros antioxidantes, los cuales incrementan el valor nutricional de los alimentos esto otorgará protección al consumidor de las enfermedades crónicas degenerativas. También se ha demostrado su efectividad en la protección de los cultivos (Mendez, 2020) y (Escalona, et al, 2016).

Se ha demostrado que las NPs CS aplicadas en semillas de tomate, arroz y trigo han mejorado la germinación debido a un incremento en la síntesis de metabolitos secundarios (Molina, 2019). Por todo lo anterior, se espera que en un futuro cercano

se incrementen las aplicaciones de las NPs CS y sus derivados en la agricultura principalmente como sustitutos de los actuales plaguicidas químicos y como reguladores de crecimiento.

Por otro lado, en México la agricultura protegida ha incrementado la superficie establecida, los invernaderos y casa sombras son una de las economías más pujantes del sector primario, este crecimiento se ha presentado tanto en el sector social, donde ha habido todo tipo de experiencia, como en el empresarial el cual está enfocado a la producción y exportación de hortalizas, frutillas y flores de corte según (Aurelio, 2017). Nos menciona (Morales, 2019) que la lechuga (*Lactuca sativa* L.) es un cultivo de gran importancia económica nacional e internacional debido a su alta demanda en el mercado ya que se consume en fresco para ensaladas, por su alto valor nutritivo, es un buen abastecedor de vitaminas, minerales y sales indispensables para el organismo. Una ventaja agronómica que tiene este cultivo es el presentar un ciclo corto vegetativo, lo que permite su producción durante todo el año. La producción de lechuga en México creció 4.5 % en 2020, al totalizar 539 toneladas de la hortaliza, superior a las 516 mil de un año previo, mientras que las exportaciones presentan una tendencia a la alza, de acuerdo con las cifras (SIAP, 2021).

1.1. Objetivo general

Determinar el efecto de la aplicación de las nanopartículas de quitosán (NPs CS) sobre el rendimiento y calidad de la lechuga bajo condición protegida.

1.2. Objetivos específicos

1.2.1. Evaluar la producción de biomasa y volumen de producción en el ciclo productivo de la lechuga con la aplicación de las NPs CS.

1.2.2. Evaluar la calidad nutraceutica de la lechuga con la aplicación de las NPs CS.

1.3. Hipótesis

La aplicación foliar de NPs CS puede afectar el crecimiento, rendimiento y calidad de la planta de lechuga.

1.4. Justificación

En los últimos años la población humana se ha incrementado significativamente, y por ello la producción de los alimentos debe ser suficiente para alimentar la población, se buscan alternativas para lograr un menor costo, con mayor producción y calidad del mismo. El uso de NPs CS es una buena alternativa ya que son compuestos orgánicos, biocompatibles, biodegradables y que pueden lograr un mejor rendimiento y mayor calidad hortícola para el consumo humano.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. La nanotecnología

Las políticas de ciencia, tecnología e innovación (PCTI) a nivel global consideran la nanotecnología como área estratégica para promover la competitividad económica, ya es común considerar a la innovación económica como requisito para el desarrollo, tanto para mantener posiciones de liderazgo en países más industrializados, como para impulsar el desarrollo en los menos avanzados, esto fue adquiriendo dominancia como substrato teórico para el diseño de PCTI a nivel internacional (Foladori y Invernizzi, 2017). La NT consiste básicamente en la manipulación de la materia a escalas nanométricas y es el resultado de los avances científicos y tecnológicos desarrollados en las últimas décadas. Estos progresos han permitido la creación de nuevos materiales llamados nanomateriales (NMs), cuyas propiedades físicoquímicas suelen variar respecto a sus homólogos macro, lo que da nuevas perspectivas, para ello hoy en día, la NT permite encapsular componentes naturales como los terpenos (Tanaka, 2020). La NT ha surgido como un avance tecnológico que puede transformar sectores de la agricultura, la NT en el sector agroalimentario es uno de los campos de más rápido crecimiento que permite innovar y generar tecnología para producir la cantidad y calidad de alimentos suficientes para alimentar a la población mundial. La NT es una alternativa en la agricultura moderna al producir agroproductos como nanofertilizantes, nanopesticidas, nanoherbicidas y nanosensores, que permiten incrementar el rendimiento de alimentos de manera sustentable y reducir el impacto ambiental (Saldivar, 2018).

2.2. Descripción de quitosán (CS)

El CS nombre dado a la quitina desacetilada, es un polisacárido, natural, biodegradable y no tóxico que se obtiene principalmente de la parte externa de crustáceos tales como cangrejos y camarones. Se menciona como otras fuentes de CS a los insectos, nematodos y la pared celular de algunos hongos (Penice, 2015).

El CS es un aminopolisacárido obtenido por N-desacetilación termoalcalina de la quitina aislada de los desechos de crustáceos. Químicamente, el término quitosano define a una familia de heteropolisacáridos lineales que están formados por 2-amino-2-deoxi-β-D-glucosa y 2-acetamido-2-deoxi-β-D-glucosa, unidas en (1→4) (Salavarieta, 2015), (**Figura 1**). El CS se ha utilizado en la agricultura como promotor del crecimiento vegetal (Zayed y Dawoud, 2017). El CS comercial se encuentra generalmente en forma de hojuelas o como un polvillo de color entre blanco y beige, cuya temperatura de transición vítrea depende del peso molecular, el GD y del contenido de humedad en la muestra analizada. Por otro lado, el material es soluble en ácidos orgánicos de cadena corta como el ácido fórmico, el láctico, el acético, el tartárico, el cítrico, etc., siendo una solución acuosa al 1% de ácido acético el solvente más comúnmente reportado; la obtención de valores de pH < 6 es fundamental para su disolución en estos sistemas. También es soluble en soluciones al 1% de ácidos minerales como el ácido clorhídrico y el nítrico pero resulta insoluble en ácidos como el sulfúrico y el fosfórico (Salavarieta, 2015).

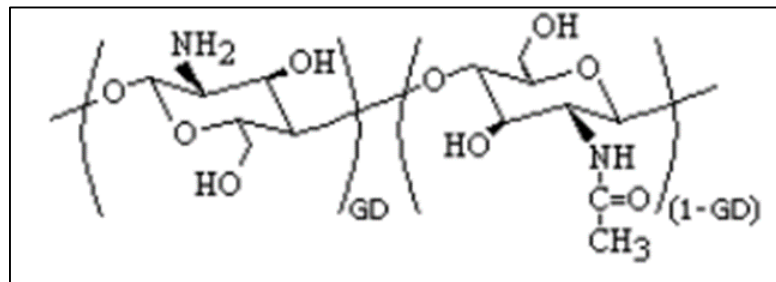


Figura. 1 Estructura química del quitosán (Salavarieta, 2015).

2.3. Nanopartículas de quitosán (NPs CS)

Los materiales reducidos a un tamaño nanoescala pueden mostrar propiedades muy diferentes a las que exhiben en una microescala, posibilitando aplicaciones únicas. Las nanopartículas a base de quitosano se forman de acuerdo a un proceso de auto asociación o entrecruzamiento en virtud de los cuales las cadenas poliméricas se ordenan en estructuras nanoscópicas ya sea por interacciones inter o intramoleculares de tipo covalente o no covalente.

Existen metodologías diversas para la obtención de NPs CS, dentro de estas la que mayor atención ha recibido es la gelificación iónica utilizando tripolifosfato de sodio (TPP). Entre las ventajas de este método cabe destacar que evita el uso de altas temperaturas, solventes orgánicos o procesos drásticos como la sonicación, que unido a la naturaleza policationica del quitosano le confiere a este sistema la capacidad para asociar de forma eficiente y preservar la estabilidad y bioactividad de macromoléculas terapéuticas contra su degradación (Goycoolea, 2009).

2.4. Importancia de las nanopartículas quitosán en el cultivo

El CS inhibe el desarrollo de numerosas especies de hongos, siendo menos efectivo con aquellas que lo poseen en sus paredes celulares. El CS cuando se aplica al inicio de la floración a los cultivos es capaz de estimular su crecimiento tanto en tallos, hojas y el tamaño de los frutos y aumenta los rendimientos de los cultivos al compararlos con las plantas que no se aplicó esta sustancia (Molina, 2017). En el área de la agricultura el CS ha mejorado el proceso de germinación, los rendimientos de la cosecha y adsorción de micronutrientes en diferentes cultivos como son trigo, maíz, fresa, tabaco, arroz y salicornia según (Gonzales, 2017), (Peña, 2016).

Estudios realizados por Zayed y Dawoud (2017), en el cultivo de frijol donde se investigó los efectos de las NPs CS sobre la germinación y los parámetros de crecimiento de las plántulas en condiciones de estrés salino. Donde los resultados indicaron que el tratamiento de la planta de frijol con 100 mM de sal combinado con diferentes concentraciones de nanoquitosán (0,1%, 0,2% y 0,3%) se promueve

significativamente la germinación de las semillas y longitud radical. El mejor tratamiento sobre la germinación fue el 0,3% de NPs CS. En cuestión de las variables de crecimiento (altura de la planta, área foliar, peso fresco y seco del brote y raíz) aumentaron significativamente, además la concentración de 0.1% aumento significativamente la actividad de catalasa, prolina, carotenoides y enzimas antioxidantes. Otros estudios realizados donde evaluaron el efecto de la aplicación foliar de fertilizante NPK de nano quitosán sobre la composición química de los granos de trigo. Donde los resultados revelan que la aplicación foliar de nanofertilizantes mostró un aumento significativo en el contenido total de sacáridos de los granos de trigo cultivados en arcilla-arena, arcilla y suelos arenosos. La magnitud del aumento fue más pronunciada en los granos tratados con nanofertilizantes, que en las plantas de trigo fertilizadas normales, las plantas con tratamiento de nanofertilizante indujo una disminución significativa en el contenido de proteínas y el contenido de nitrógeno de los granos de trigo. El tratamiento de las plantas de trigo con nanofertilizantes aumentó significativamente el contenido de elementos, especialmente los contenidos de potasio y fósforo en los granos de trigo (Mahmoud, 2018).

2.5. Origen de la lechuga

Hay autores que afirman que procede de la India, mientras que otros se descartan por regiones templadas de Europa, Asia y América del Norte. Esta planta fue domesticada por los egipcios hacia el 4500 A.C (Villarreal, 2015).

2.6. Importancia económica

La lechuga es de gran importancia económica, a nivel mundial, se cultiva por su cabeza u hoja, utilizándose como verdura o ensalada, cocida en curtido o industrializada. México es el octavo productor de lechuga con 370, 066 toneladas, superado en primer lugar por china con 13,434, 116 toneladas (SIAP, 2019).

2.7. Clasificación taxonómica de lechuga

La lechuga pertenece a la familia dicotiledónea más grande del reino vegetal, la Asteraceae, conocida anteriormente como Compositae (Saavedra, 2017).

Reino-----Plantae

División-----Magnoliophyta

Orden -----Asterales

Clase-----Magnoliopsida

Familia-----Asteraceae

Tribu-----Lactuca

Género-----Lactuca

Especie-----*Lactuca sativa L*

2.8. Descripción botánica

2.8.1 Raíz

La raíz no llega a sobrepasar 25 cm de profundidad, es pivotante corta y ramificaciones cuyos laterales se desarrollan en la capa superior del suelo o sustrato (Valadez, 2016).

2.8.2. Hoja

Las hojas de lechuga tienen diferentes formas, aunque predominan en muchos casos las alargadas, sésiles, lisas o rizadas. Pueden ser de coloración verde a amarillenta y púrpura. Forma una cabeza que se asemeja a un repollo, constituyendo la denominada lechuga de cabeza (Saavedra, 2017).

2.8.3 Semilla

La semilla es larga (4 a 5 mm) su color generalmente es blanco crema aunque también los hay pardas y castañas, la maduración de la semilla ocurre entre los 12 a 15 días después de la floración (Vilmorin, 2015). La semilla puede ser almacenada

conservando su viabilidad hasta por cuatro años a una humedad relativa de 46 a 58 por ciento y temperatura de 10°C (Ureña, 2017).

2.8.4 Flor

La flor consta de cinco estambres, ovario monocular de estigma dividido, con un óvulo que da origen a una semilla, que viene a ser un fruto seco y unilocular llamado aquenio (Ureña, 2017).

2.8.5 Tallo

El tallo se alarga para la floración alcanzando una altura de hasta 1 m (Ureña, 2017).

2.9. Fenología

Plántula: se da la aparición de la radícula y la emergencia de los cotiledones seguidamente un crecimiento radicular en profundidad y luego la aparición de 3 a 4 hojas verdaderas, esta fase comprende una duración entre 3 a 4 semanas (Cruz, 2017).

Fase de roseta: se da la aparición de nuevas hojas y una disminución en la relación largo-ancho de folíolos, se produce un acortamiento de los peciolo y finalmente la formación de una roseta con 12 a 14 hojas, la duración de esta fase varía de 3 a 4 semanas (Saavedra, 2017).

Fase de formación de la cabeza: las hojas se vuelven más anchas que largas y toman cierta curvatura por el eje de la nervadura central, con lo que las nuevas hojas quedan envueltas por las formadas anteriormente, la duración de esta fase va de las 2 a 3 semanas de duración (Cruz, 2017).

2.10. Trasplante

En el trasplante se utilizan plantas que tengan de 3 a 5 hojas, aproximadamente de 10 a 12 centímetro de altura, un color verde intenso y que no presenten problemas fitosanitarios. Se recomienda escoger el mejor momento para el trasplante y no enterrar demasiado de las plantas de tal manera que el cuello quede sobre el suelo (Saavedra, 2017).

2.11. Problemas fitosanitarios

El tema fitosanitario es uno de los principales problemas que se debe afrontar tanto en producción, como en comercialización (producto limpio, fresco y libre de residuos fitosanitarios).

2.11.1 Plagas en la parte aérea

Pulgón (*Myzus persicae*), mosca blanca (*Bemisia tabaci*) son plagas que hacen daños directos que ocasiona por las picaduras pueden portadores de virus, por ejemplo el virus de mosaico de la lechuga (Koppert, 2019).

2.11.2 Enfermedades en la parte área

Bacterias (*Pseudomonas cichorri*) y el virus del mosaico. Estas enfermedades son la más común afectando a las plantas cuando está cerca de la recolección. Donde presentan lesiones alargadas y oscuras en el nervio de la hoja (Martínez, 2016).

2.12. Cosecha de lechuga

La madurez en la lechuga es una característica de calidad que está basada en la compactación de la cabeza y es considerada apta para ser cosechada. Las cabezas inmaduras y maduras tienen mucho mejor sabor que las sobre maduras (Ramirez, 2017).

2.13. Conductancia estomática

La pérdida de agua hacia la atmósfera puede darse a través de la cutícula o a través de poros formados por estructuras especializadas llamadas “estomas”, que se encuentra en la superficie de las hojas. El tamaño del poro estomático viene determinado por la cantidad de agua que contiene las células oclusivas ya que puede tomar rápidamente agua aumentando su turgencia y abriendo el ostiolo, o alternativamente perderla, plasmolizándose y cerrando el poro según (Suarez, 2017). Los movimientos estomáticos brindan a la hoja la oportunidad de cambiar tanto la presión parcial de CO₂ como la tasa de transpiración. Los cambios en la tasa de transpiración pueden causar cambios en la temperatura y el potencial hídrico de la hoja (Medrano, 2017). Fundamental para cualquier examen del

funcionamiento de la estoma es la comprensión de cómo la tasa de asimilación de CO₂, la temperatura de la hoja y la tasa de transpiración. El porómetro mide la conductancia estomática mediante el flujo de vapor desde la hoja a través de los estomas, y permite distinguir entre la transpiración de las hojas y las que se han cerrado (Hipólito, 2017).

2.14. Función e importancia de las estomas

El volumen de la transpiración ocurre a través de las estomas. Una planta puede llegar a necesitar 500 litros de agua procedente del suelo para poder producir 1 kg de materia seca, esto nos da idea de la facilidad con que la pérdida de agua excesiva por transpiración, origina déficit hídrico con consecuencias negativas para el desarrollo y la productividad de la planta. Sin embargo, las plantas se encuentran con el compromiso de obtener CO₂ para mantener la fotosíntesis, a través de las estomas se lleva a cabo el intercambio más importante de H₂O y CO₂, jugando la apertura estomática un papel importante no solo en la transpiración sino también en la fotosíntesis foliar (Jose, 2017).

2.15. Importancia de los antioxidantes

El estrés oxidativo es una de las principales causas que afecta directamente al correcto desarrollo de los cultivos. La planta, que invierte su energía en defenderse de dicho estrés, presenta problemas de absorción y metabolismo de los nutrientes, reduciendo su potencial de crecimiento y por ende la calidad y rendimiento del cultivo (Reyes, 2018). Numerosos estudios demuestran que una correcta bioestimulación de la planta es muy beneficiosa para prevenir estreses (Civera, 2019) hace mención que una óptima bioestimulación es capaz de activar el metabolismo de la planta para generar y acumular sustancias naturales antioxidantes capaces de enfrentar y anular los ROS que provocan envejecimiento celular prematuro y conllevan mermas en la actividad y metabolismo de la planta.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ubicación del experimento

La presente investigación se llevó a cabo en el departamento de Horticultura de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro en Saltillo, Coahuila, México a los 25° 21' Latitud Norte y a los 101° 01' de Longitud Oeste y a la altura de 1790 msnm, durante los meses de febrero - abril del 2021.

3.2. Material vegetal y sustrato

Se utilizaron plantas de lechuga orejona variedad Parris Island, para su recolección de esta variedad puede tardar unos 60 días en verano y 90 en invierno. Como sustrato se utilizó peat moss y perlita (2:1) en bolsas de plástico negras de 10 L.



Figura 2. Plántulas de lechuga a los 9 días después de la siembra.



Figura 3. Preparación del sustrato

3.3. Establecimiento del cultivo

3.3.1 Trasplante

El trasplante se llevó a cabo el día 22 de febrero del presente año, con una población de 6 plantas por m². Durante el primer mes del cultivo se aplicó enraizador con una dosis de 10 g/L y 80 mL/planta, cada 8 días.



Figura 4. Planta de lechuga Harris Island a los 3 días después del trasplante (ddt).

3.4. Tratamientos evaluados

Se evaluó la aplicación de las NPs CS a las dosis de 0, 0.5, 1, 2, 4 y 8 mg, además de un tratamiento control con tripolifosfato de sodio (TPP) (**Cuadro 1**). Se empezó a aplicar a los 10 ddt y luego se aplicaron cada 15 días durante todo el ciclo del cultivo (52 días), su aplicación fue con aspersor manual directamente a la planta, las cuales se hicieron durante las mañanas (8:00 am).

Primera aplicación: 2 de marzo.

Segunda aplicación: 16 de marzo.

Tercera aplicación: 30 de marzo del presente año.

Cuadro 1. Dosis aplicada de las NPs CS en el cultivo de lechuga (Harris Island).

| Tratamientos | Dosis de NPs CS (mg) |
|---------------------|-----------------------------|
| T0 (testigo) | H ₂ O |
| Control | TPP |
| T1 | 0.5 |
| T2 | 1 |
| T3 | 2 |
| T4 | 4 |
| T5 | 8 |

3.5. Manejo del cultivo

3.5.1 Riego

El sistema de riego que se implementó fue riego por goteo. En la primera semana después del trasplante el riego fue con solución Steiner al 25%, la segunda semana con la solución al 50%, la tercera semana posterior al trasplante con la solución al 75% y la cuarta semana en adelante de igual manera con la solución Steiner al 100% (Cuadro 2).

Cuadro 2. Composición de la solución Steiner, (1961) en miliequivalentes (Meq).

| Steiner | NO₃ | H₂PO₄ | SO₄ | K | Ca | Mg |
|----------------|-----------------------|------------------------------------|-----------------------|----------|-----------|-----------|
| Meq | 12 | 1 | 7 | 7 | 9 | 4 |

Se preparó una solución Steiner según el **Cuadro 3** donde se muestran las fuentes de fertilización. La solución nutritiva se manejó con un pH de 6.7 y CE de 1.5

Cuadro 3. Tabla de fertilización para 200 L (Steiner 1961).

| Fuentes de fertilización | Steiner 100% |
|---------------------------------|---------------------|
| Nitrato de Calcio | 1062.4 mg/L |
| Nitrato de Potasio | 303.9 mg/L |
| Sulfato de Potasio | 261.3 mg/L |
| Sulfato de magnesio | 492 mg/L |
| Fosfato monopotásico | 136.1 mg/L |

3.6. Labores culturales

3.6.1 Atado. Mediante el atado de las plantas de lechuga se provocó la inducción del cogollo y así evitar la inducción floral.

3.6.2 Deshierbe. Con el objetivo de reducir la población de las plagas, se realizó el control manual de malezas, eliminando las que se encontraron cerca de las macetas y en el área del invernadero.

3.6.3 Cosecha. Se llevó a cabo el día 13 de abril del presente año. Con un cuchillo se cortó desde la base posterior, para así tomar las muestras a analizar para las diferentes variables.



Figura 5. Cosecha de lechuga de la variedad Parris Island.

3.6.4 Control de plagas

Durante el ciclo del cultivo se presentó diferentes plagas, como la mosca blanca, pulgón, gusano soldado.

Mosca blanca: la mosca blanca (*Bemisia tabaci*) tiene una gran cantidad de huéspedes y ha afectado a una amplia gama de cultivos de todo el mundo, también es una de las plagas temida debido a su elevado grado de resistencia a numerosos insecticidas y su tendencia a transmitir virus, en el cultivo se llevó el control con la aplicación de extracto de ajo (Bralic) con una dosis de 2 mL/L.

Pulgón: el daño del pulgón es muy elevado, es un transmisor de virus por ello es importante su control en los cultivos, en el cultivo se presentó esta plaga y se controló con la aplicación de jabón con vinagre y también su aplicación de extracto de ajo.

3.7. Diseño experimental

Las dosis de las NPs CS se manejaron bajo un diseño completamente al azar, con 7 tratamientos y 10 repeticiones, obteniendo un total de 70 plantas experimentales (una planta por maceta), con una distribución de 6 macetas por m².

3.8. Variables de producción evaluadas

Rendimiento (peso de cabeza). Se consideró el peso de las lechugas cosechadas (parte comercial), el cual se determinó en una balanza digital, el cual fue expresado en kilogramos.

Altura de planta. Para la determinación de esta variable se midió la altura de las plantas con una cinta métrica, los resultados fueron reportados en cm.

Diámetro de cabeza. Con una cinta métrica se determinó esta variable, expresando los resultados en cm.

Peso fresco. Para esta variable se pesaron las hojas, tallos y la raíz, utilizando una báscula digital con una capacidad de 5 kg, reportando los datos en gramos.

Materia seca en porcentaje. La materia fresca (hoja, tallo, y raíz) se dejó secar durante 4 días a temperatura ambiente y posteriormente se pesó en una báscula digital, los resultados obtenidos fueron expresados en %MS.

Conductancia estomática. Para esta variable se utilizó un porómetro (Leaf Porometer) Steady state diffusion porometer. model SC-1. Se reportan los resultados en Mmols/m²s.

3.8.1 Determinación de las actividades enzimáticas

Extracción de biomoléculas (extracto hidrofílico)

El material vegetal se liofilizó y posteriormente se maceró con mortero de mano, hasta la obtención de un polvo fino, de este se tomaron 100 mg, más 10 mg de polivinil pirrolidona (PVP) y se colocó en un tubo para centrifuga de 2 mL. Luego se añaden 2 mL de buffer de fosfatos 0.1 M a pH 7-7.2, se sometió a sonicación por 5 min, posteriormente se llevó a cabo una centrifugación a 12,500 revoluciones por minuto (RPM) por 10 min a 4 °C, el sobrenadante se recolectó y se filtró con una membrana de nylon de 0.45 µm y 17 mm de diámetro (Ramos *et al.*, 2010). Finalmente se diluye en una proporción 1:15 con buffer de fosfatos.

Catalasa (CAT). La actividad de CAT fue cuantificada mediante espectrofotometría donde, se llevó a cabo midiendo dos tiempos, 0 minutos (T0) y 1 minuto (T1). La mezcla de reacción para el blanco se preparó agregando 0.1 mL del extracto de biomoléculas, 1 mL de buffer de fosfatos pH 7.2 y 0.4 mL ácido tricloro acético al 5 %. La mezcla de reacción para el T0 se preparó agregando 0.1 mL de extracto de biomoléculas, 1 mL de H₂O₂ 100 mM e inmediatamente después se añaden 0.4 mL del ácido al 5 %. El T1 se preparó agregando 0.1 mL de extracto de biomoléculas, 1 mL de H₂O₂ a 100 mM. Pasando 1 min la reacción entre el extracto y el peróxido se agregó 0.4 mL del ácido al 5 %. La reacción se efectuó a una temperatura de 20 °C bajo agitación constante y finalmente se leyó a 270 nm en el espectro de UV-VIS el consumo de H₂O₂. Las unidades de la actividad (UI) fueron expresadas en mM de H₂O₂ min⁻¹/ proteínas totales (Cansev, Gulen & Eris, 2011).

Ascorbato peroxidasa (APX). La actividad de la enzima APX se determinó a temperatura ambiente (25 °C) y se procedió de la siguiente manera (Nakano & Asada, 1981). En un tubo de para centrífuga, para el (T0) 0 min se agregó 0.1 mL del extracto de biomoléculas, 0.5 mL de ascorbato a 10 mg L⁻¹ de concentración y 1 mL de H₂O₂ a 100 mM, inmediatamente se agregó 0.4 mL de ácido tricloroacético al 5%. Se prepararon muestras de blancos con el mismo procedimiento, solo a diferencia que en estas muestras en vez de agregar el extracto de biomoléculas se agregó buffer de fosfato. Para el (T1) 5 min se agregó 0.1 mL del extracto de biomoléculas, 0.5 mL de ascorbato a 10 mg L⁻¹ de concentración y 1 mL de H₂O₂ a 100 mM, después de 5 min la reacción fue detenida con 0.4 mL de ácido tricloroacético al 5 %. Se cuantificó por espectrofotometría la tasa de consumo del ascorbato a 266 nm. Las unidades de la actividad (UI) fueron expresadas en mM de ascorbato min⁻¹/ proteínas totales.

Superóxido dismutasa (SOD). Utilizando el kit comercial Cayman® 7060002. Su principio es la oxidación del colorante WST (Water soluble tetrazolium salt) a WST-formazán por los iones superóxido formados mediante el conjunto xantina (XO) – xantin (X) oxidasa. La inhibición en la oxidación del WST es atribuido a la neutralización de los radicales superóxido por la SOD. Se realizó el ensayo de muestras y blancos como se muestra en el **Cuadro 4**, para luego incubar a 37°C durante 20 min. Finalmente, se leyó a una absorbancia de 450 nm.

Cuadro 4. Procedimiento para la determinación de la enzima superóxido dismutasa (SOD).

| Solución | Muestra (μL) | Blanco 1 (μL) | Blanco 2 (μL) | Blanco 3 (μL) |
|-----------------------------------|---|--|--|--|
| Muestra | 80 | | 80 | |
| Agua | | 80 | | 20 |
| Reagent working solution (WST) | 800 | 800 | 800 | 800 |
| Emzyme solution | 80 | 80 | | |
| Dilucion buffer | | | 80 | 80 |

Glutati6n Peroxidasa (GPX). Se utiliz6 el m6todo modificado por Floe and Gunze (1984) usando H_2O_2 como sustrato. Se coloc6 0.2 mL del extracto en un tubo de ensaye m6s 0.5 ml de glutati6n reducido 10 mM y 0.2 mL de Na_2HPO_4 0.067 M, posteriormente se le agreg6 0.2 mL de H_2O_2 a 1.3 mM para iniciar la reacci6n catal6tica. Se dej6 reaccionar por 10 min y se detuvo mediante la adici6n de 1 mL de 6cido tricoloro ac6tico al 1%. Enseguida esta mezcla se centrifug6 a 3000 RPM por 10 min. Se tom6 0.48 mL del sobrenadante y se coloc6 en la celdilla donde se agreg6 2.2 mL de 0.32 M de Na_2HPO_4 y 0.32 ml de 1 mM del colorante 5,5 ditio-bis-2 acido nitro benzoico (DTNB). Finalmente se ley6 en un espectrof6t6metro UV-VIS a 412 nm.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Rendimiento (peso de cabeza)

De acuerdo con el análisis de varianza ($p < 0.05$) y con la comparación de medias con la prueba de LSD Fisher ($p < 0.05$) se encontró que no hay diferencias estadísticas entre tratamientos para la variable rendimiento, sin embargo, se observó que numéricamente el mayor rendimiento se obtuvo con la aplicación de 2 mg de NPs CS con 577.25 g, seguido con la aplicación de 8 mg con de 536 g, y con el testigo con 463 g (**Figura 6**). Lo cual podría atribuirse a que el 9-10% de nitrógeno, que es el componente principal del quitosán, sirve como macronutriente en una planta (Maluin y Hussein, 2020).

Reyes y colaboradores (2020) menciona que la aplicación de 2 g/L de las nanopartículas de quitosán mejoró notoriamente el diámetro de frutos y hubo mayor rendimiento en dos variedades evaluadas en tomate.

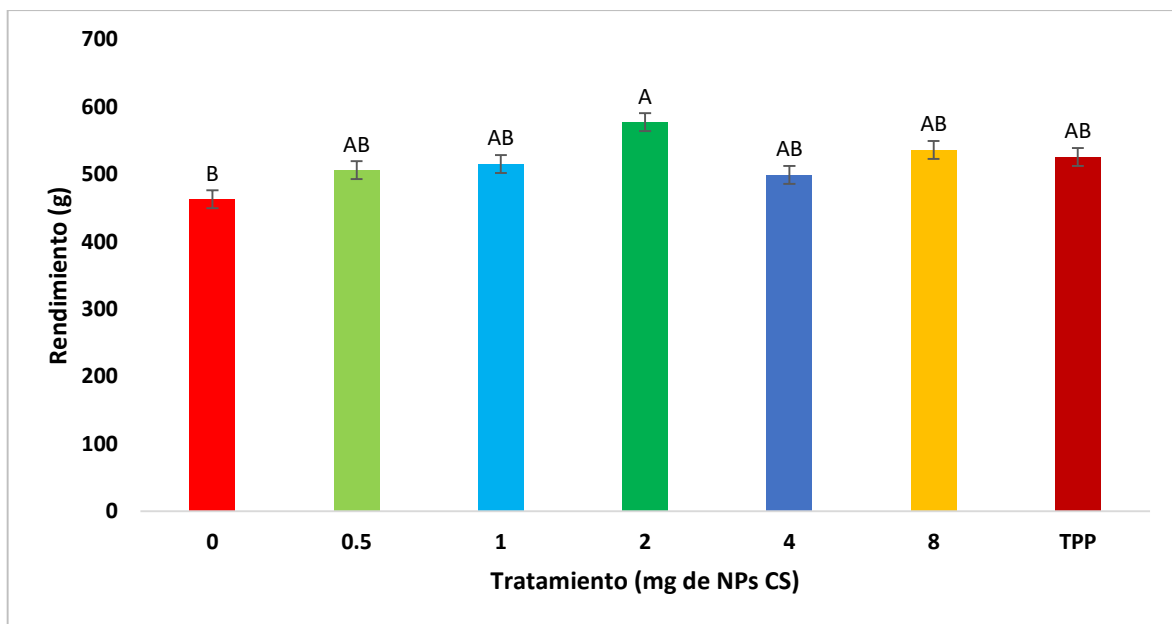


Figura 6. Efecto de la aplicación de nanopartículas de quitosán en lechuga a las dosis de 0, 0.5, 1, 2, 4, 8 mg y TPP (control) en rendimiento.

4.2 Altura de planta

De acuerdo con el análisis de varianza ($p < 0.05$) y con la comparación de medias según la prueba de LSD Fisher ($p < 0.05$) se encontró que no hay diferencias estadísticas entre los tratamientos para la variable altura, sin embargo, se observó que numéricamente la mayor altura se obtuvo con la aplicación de 4 mg de NPs CS con 14.89 cm, seguido con la aplicación de 2 mg de NPs CS con altura de 14.84 cm (**Figura 7**). Lo cual concuerda con los resultados de Sopalo (2019), donde la aplicación de nanopartículas de quitosán afectó en el indicador de altura de la planta, a medida que se incrementa la dilución de las nanopartículas de quitosán desde 200 mg/ha a 300 mg/ha (Sopalo, 2019).

Otro estudio realizado por (Zayed y Dawoud, 2017) en el cultivo de frijol donde se investigó los efectos de las nanopartículas de quitosán sobre la germinación y los parámetros de crecimiento de las plántulas en condiciones de estrés salino, se encontró que el tratamiento de la planta de frijol con 100 mM de sal combinado con diferentes concentraciones de nanoquitosán las variables de crecimiento (altura de la planta, área foliar, peso fresco y seco del brote y raíz) aumentaron

significativamente. Esto podría deberse por la concentración de las nanopartículas aplicadas, con las plantas de lechuga se aplicaron concentraciones muy bajas 0.5 mg, mientras en otros estudios ya mencionados se aplicaron de hasta 200 mg de nanopartículas de quitosán.

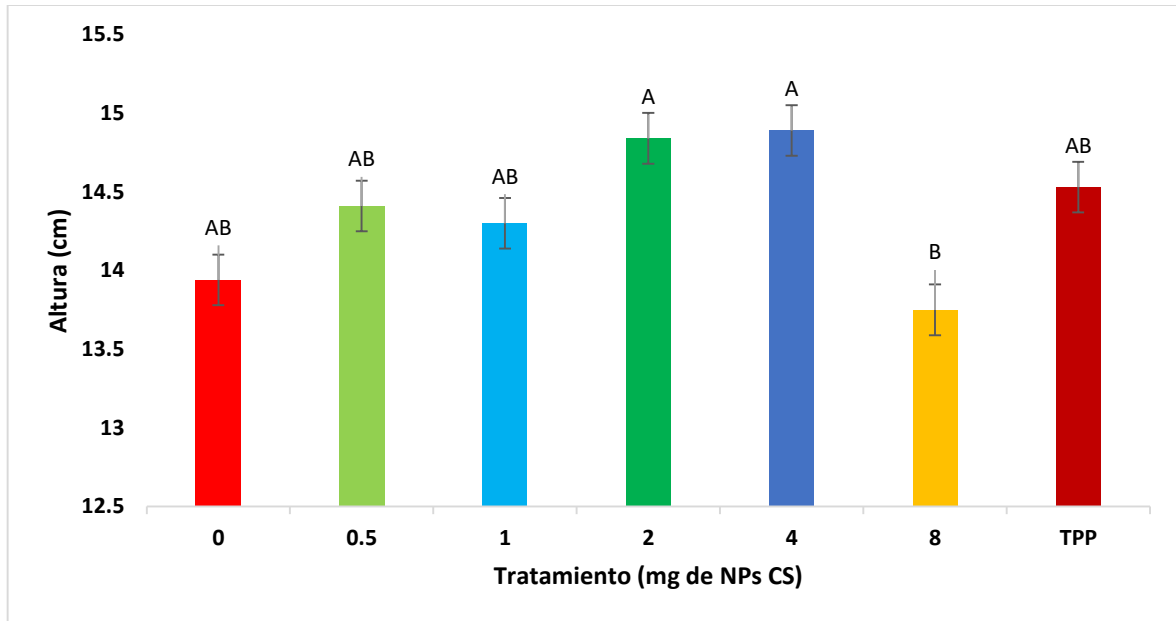


Figura 7. Efecto de la aplicación de nanopartículas de quitosán en lechuga a las dosis de 0, 0.5, 1, 2, 4, 8 mg y TPP (control) en altura de planta.

4.3 Diámetro de cabezas

De acuerdo con el análisis de varianza ($p < 0.05$) y con la comparación de medias con la prueba de LSD Fisher ($p < 0.05$) se encontró que no hay diferencias estadísticas entre tratamientos, sin embargo, se observó que numéricamente el mayor diámetro se obtuvo con la aplicación de 0.5 mg de NPs CS con 15.5 cm, seguido con el tratamiento 2 y 4 mg con diámetro de 15 cm y con el testigo con diámetro de 13.25 cm (**Figura 8**). Destacándose la dosis correspondiente a 0.5 mg la cual indujo a un incremento de diámetro de cabeza de hasta un 17.2 %.

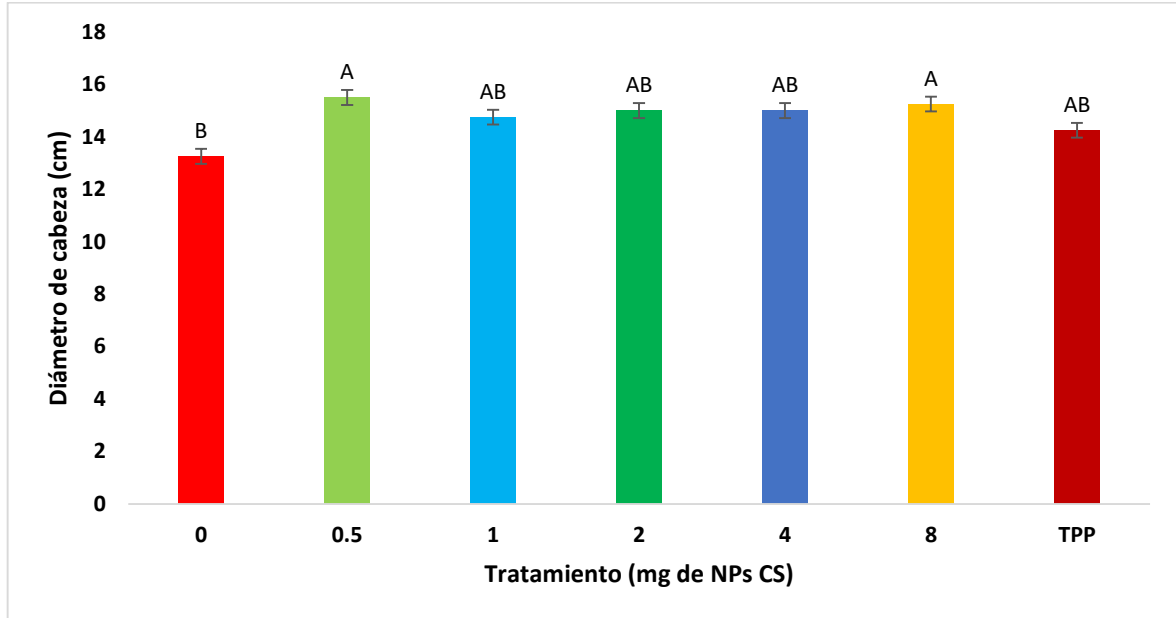


Figura 8. Efecto de la aplicación de nanopartículas de quitosán en lechuga a las dosis de 0, 0.5, 1, 2, 4, 8 mg y TPP (control) en diámetro de cabeza.

4.4 Peso fresco

De acuerdo con el análisis de varianza ($p < 0.05$) y con la comparación de medias con la prueba de LSD Fisher ($p < 0.05$) se encontró que no hay diferencias estadísticas entre tratamientos para la variable peso fresco, sin embargo, se observó que numéricamente el mayor peso fresco se obtuvo con la aplicación de 2 mg de NPs CS con 1,015 g, seguido con el tratamiento de 1 mg de NPs CS con 968.25 g, mientras que con el testigo se obtuvo 859.5 g (**Figura 9**). Molina y colaboradores (2020) reportan que las plantas sometidas a los tratamientos con NPs CS destacándose la dosis de 2 g/L presentó mayor peso fresco, mientras el peso bajo se obtuvo con la dosis de 3 g/L.

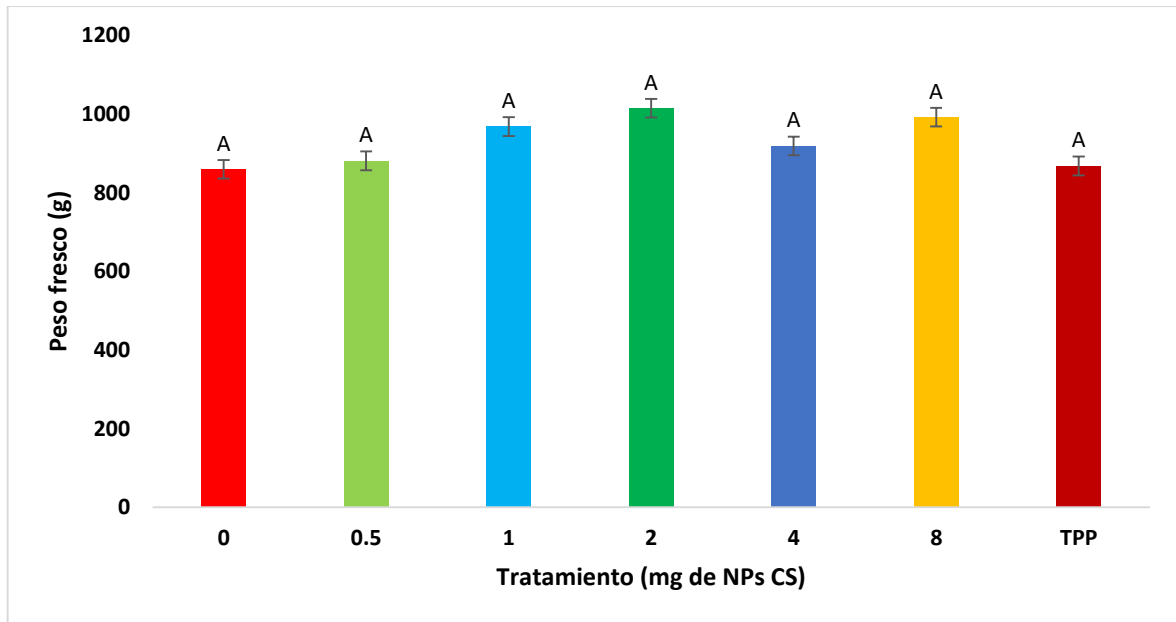


Figura 9. Efecto de la aplicación de nanopartículas de quitosán en lechuga a las dosis de 0, 0.5, 1, 2, 4, 8 mg y TPP (control) en peso fresco.

4.1.5 Porcentaje de materia seca (%MS)

De acuerdo con el análisis de varianza ($p < 0.05$) y con la comparación de medias con la prueba de LSD Fisher ($p < 0.05$) se encontró que si hubo diferencias estadísticas entre tratamientos para la variable peso seco. Con la aplicación de 0.5 mg de NPs CS se encontró mayor %ms con 4.91, seguido con la aplicación en dosis 4 mg con 4.47 %ms (**Figura 10**). El crecimiento vegetal y la consecuente acumulación de materia seca están relacionados directamente con la absorción continua de nutrientes minerales. (Barraza, 2012) menciona que al suministrar más nutrientes se ven favorecidos los procesos de crecimiento, desarrollo y formación de órganos.

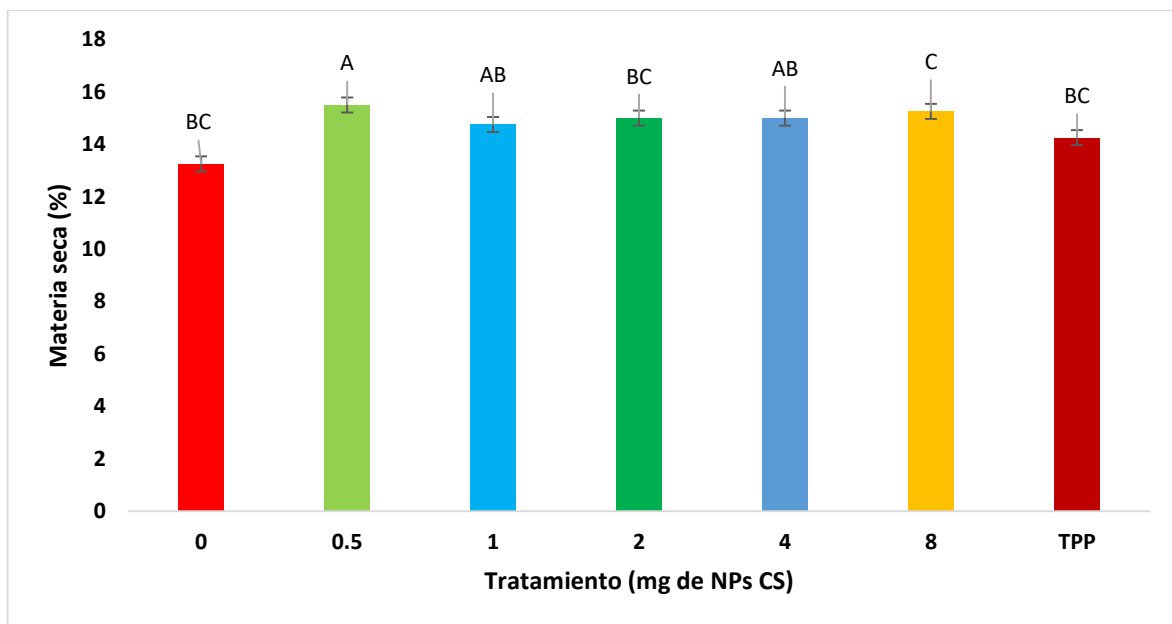


Figura 10. Efecto de la aplicación de nanopartículas de quitosán en lechuga a las dosis de 0, 0.5, 1, 2, 4, 8 mg y TPP (control) en porcentaje de materia seca.

4.1.6 Conductancia estomática

En esta variable, de acuerdo con el análisis de varianza ($p < 0.05$) y con la comparación de medias con la prueba de LSD Fisher ($p < 0.05$) se encontró que si hubo diferencias estadísticas entre tratamientos. Con la aplicación de las NPs CS en dosis 0.5 mg hubo mayor transpiración con $1011.93 \text{ mmol s}^{-1}\text{m}^2$ seguido con el tratamiento en dosis 4 mg con $994.28 \text{ mmol s}^{-1}\text{m}^2$ y superando al testigo hasta con un 95 %. Con menor transpiración se presentó con la dosis 1 mg de las NPs CS aplicada con $830.40 \text{ mmol s}^{-1}\text{m}^2$ (**Figura 11**). El quitosán puede ser un compuesto antitranspirante eficaz, reduciendo la transpiración a través del cierre estomático. Efecto similar se ha descrito en el cultivo de frijol (Akash, 2019).

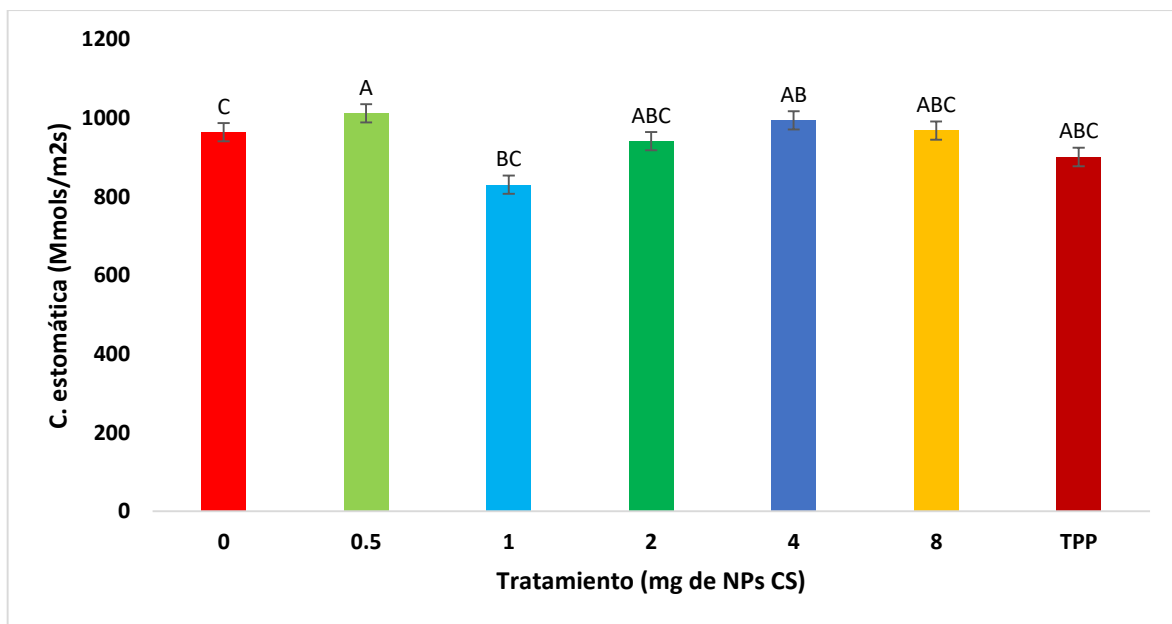


Figura 11. Efecto de la aplicación de nanopartículas de quitosán en lechuga a las dosis de 0, 0.5, 1, 2, 4, 8 mg y TPP (control) en conductancia estomática.

Actividad enzimática

La línea primaria de defensa de las plantas es la participación de enzimas antioxidantes, las cuales pueden reducir la energía de los radicales libres o hacer que cedan algunos de sus electrones, volviéndose estables.

De acuerdo con el análisis de varianza ($p < 0.05$) y con la comparación de medias según la prueba de LSD Fisher ($p < 0.05$) se encontró que no hay diferencias estadísticas entre tratamientos para CAT, sin embargo, se observó que numéricamente la mayor actividad se obtuvo con la aplicación de 0.5 mg de NPs CS con 1.53 U, seguido por la aplicación de 1 mg de NPs CS con 1.50 U (**Figura 12**). Lo cual concuerda con el estudio realizado por (Akash, 2019) en el cultivo de trigo hidropónico sometido a un estrés salino con NPs CS, aumentaron significativamente la enzima antioxidante (SOD, POD y CAT) y fue capaz de aliviar el estrés oxidativo.

Donde:

U= unidad de concentración por tiempo.

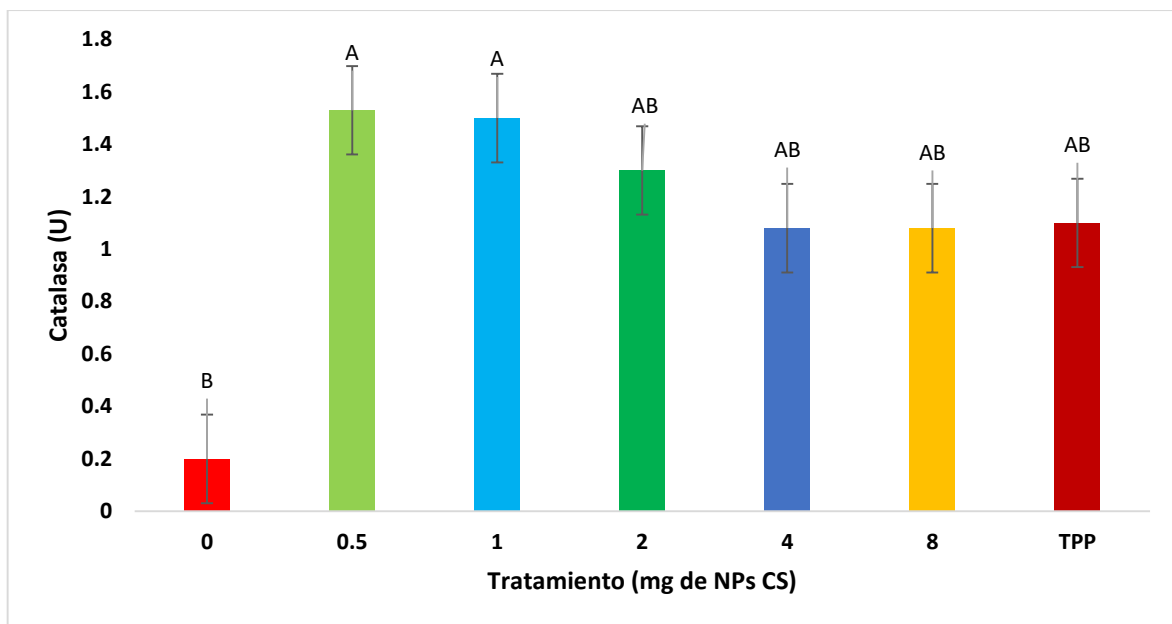


Figura 12. Efecto de la aplicación de nanopartículas de quitosán en lechuga a las dosis de 0, 0.5, 1, 2, 4, 8 mg y TPP (control) en catalasa (CAT).

Los resultados para APX, SOD y GPX mostraron que con la aplicación de las NPs CS hubo una reducción en la actividad enzimática (LSD Fisher ($p < 0.05$)), ya que para estas enzimas se observó mayor actividad con el testigo (0 g de NPs CS) con 50.55 U para APX, 2.60 U para SOD y 0.25 U para GPX, lo cual se puede observar en las **Figuras 13, 14 y 15** respectivamente, lo cual indica que las plantas de lechuga no activaron una sobresíntesis de las enzimas a las dosis evaluadas de NPs CS, para enfrentar algún tipo de estrés, ya que es uno de los mecanismos a través del cual los organismos toleran la presencia de algún contaminante ya sea biótico o abiótico, con la activación de sistemas de defensa que suprimen o eliminan las especies reactivas del oxígeno según (Akash, 2019). Se ha reportado que, luego de aplicar tratamientos con NPS de CS se induce la expresión de genes relacionados a SOD en hojas de tomate provenientes de plantas infectadas con *Fusarium andiyazi* (Chun y Chandrasekaran, 2019).

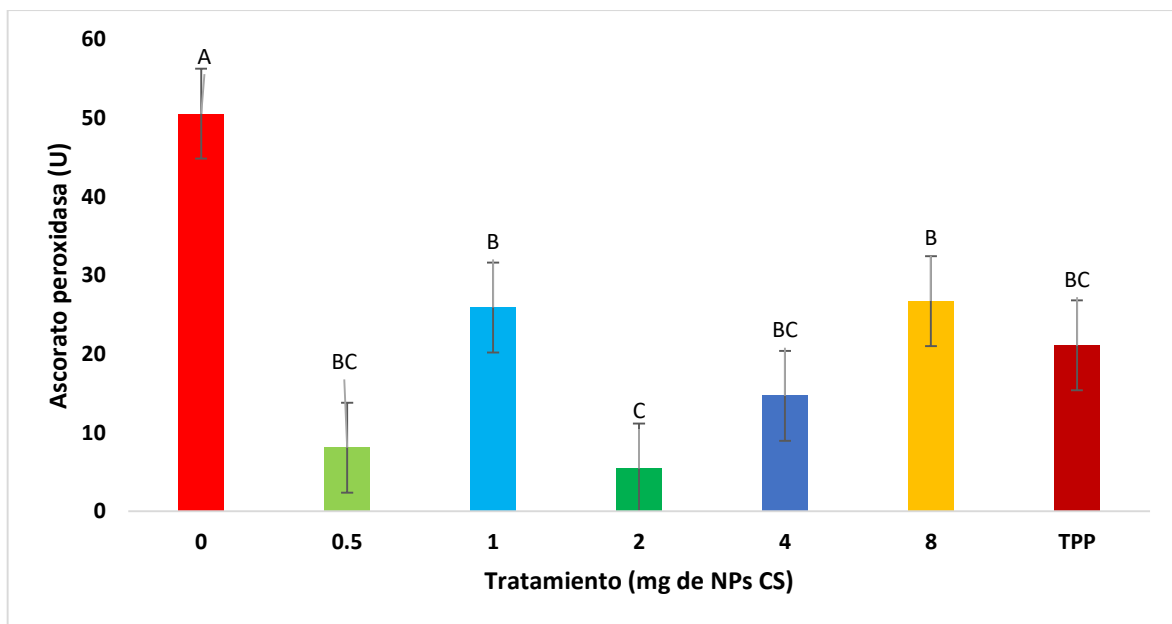


Figura 13. Efecto de la aplicación de nanopartículas de quitosán en lechuga a las dosis de 0, 0.5, 1, 2, 4, 8 mg y TPP (control) en ascorbato peroxidasa (APX).

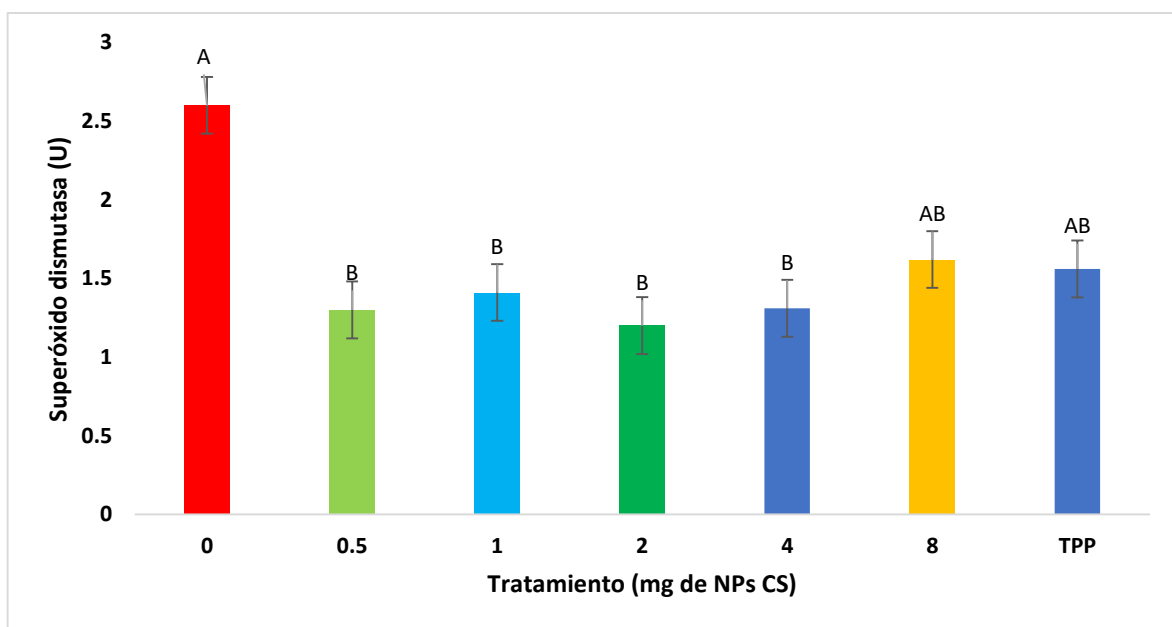


Figura 14. Efecto de la aplicación de nanopartículas de quitosán en lechuga a las dosis de 0, 0.5, 1, 2, 4, 8 mg y TPP (control) en superóxido dismutasa (SOD).

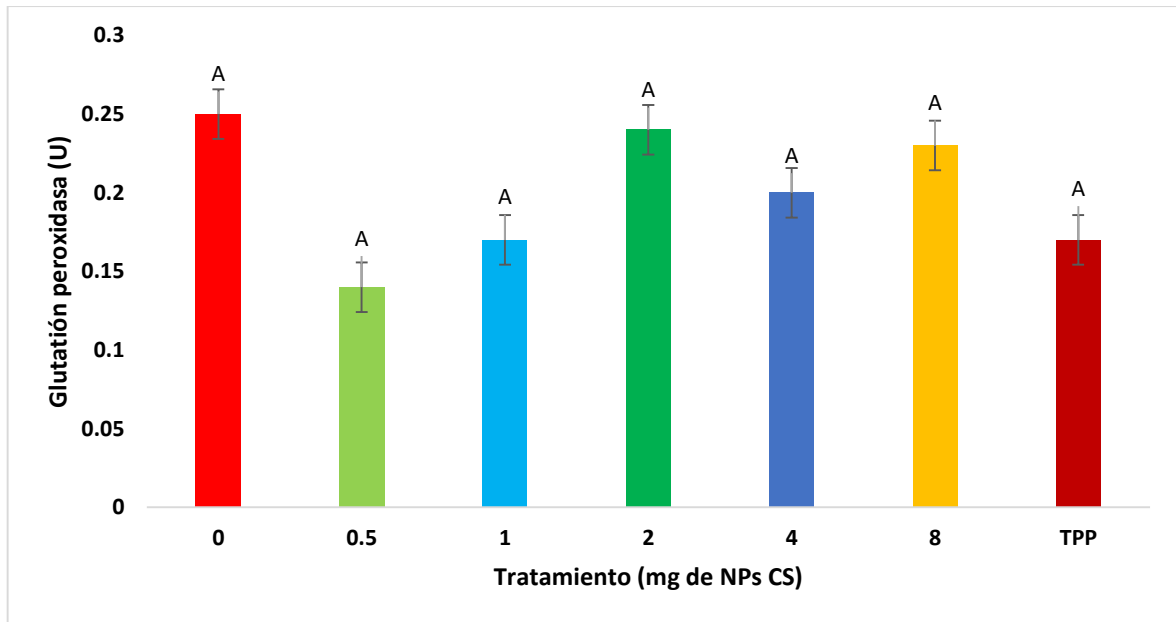


Figura 15. Efecto de la aplicación de nanopartículas de quitosán en lechuga a las dosis de 0, 0.5, 1, 2, 4, 8 mg y TPP (control) en glutatión peroxidasa (GPX).

Los resultados obtenidos en estas variables es posible atribuirlos a la cantidad de NPs de CS estudiadas, la forma de aplicación (foliar) y las veces que se aplicaron las NPs de CS (tres aplicaciones).

V. CONCLUSIONES

Es posible incrementar el rendimiento en lechuga (*Lactuca sativa*) al aplicar 2 mg de nanopartículas de quitosán (NPs CS) por vía foliar tres veces cada dos semanas durante todo el ciclo del cultivo.

Cuando se aplicaron 0.5 mg foliarmente las NPs CS, se obtuvo un mayor diámetro de cabeza y la conductancia estomática más alta.

Se presenta un aumento en la actividad de la enzima catalasa y una disminución de las enzimas superóxido dismutasa, glutatión peroxidasa al aplicar 0.5 mg de NPs CS.

En base a los resultados obtenidos, es posible utilizar las NPs CS en futuros trabajos para comprender los mecanismos por los cuales las nanopartículas de quitosán mejoran la calidad y rendimiento en los cultivos.

LITERATURA CITADA

- A. Vicent Civera, J. S. (2019). El efecto de los antioxidantes sobre el estrés oxidativo en los cultivos. *En Phytoma* (pág.76-79). España: No. 314.
- Aguero, H., Arrebato, M., y Penice, J. (2015). El quitosano y su impacto en la agricultura. Pág. 109.
- Akash Hidangmayum, *et al.* (2019). Application of chitosan on plant responses with special refrence to abiotic stress. *Physiology and molecular biology of plants*, pág. 303-326.
- Alamo, A. B. (2020). Nutricional de Varietats tradicionals I millorades d'enciam (*Lactuca sativa* L.). *Enginyeria de Sistemes Biològics*.
- Antonio Maldonado, *et al.* (2016). Cu Nanoparticles absorbed on chitosan hydrogels positively alter morphological, production, and quality characteristics of tomato. *Journal of Applied Botany andd Food Quality*, 183-189.
- Antonio Reyes, E. R. (2018). Evaluacion de la conductancia estomática en cuatro variedades de papa sometidas a los estreses de calor, frio y sequía. *Repositorio Dihgital INIAP*.
- Aurelio, B. T. Evolucion y situacion actual de la agricultura protegida en México. <https://hopelchen.tecnm.mx/principal/sylabus/fpdb/recursos/r126349.PDF> revisado el 21 y 22 de septiembre de 2017.
- Barraza Alvarez, F. (2012). Acumulación de materia seca del cultivo de pepino (*Cucumis sativus* L.) en invernadero. *Temas Agrarios*, 17(2), 18-29. <https://doi.org/10.21897/rta.v17i2.699>
- Méndez-Arguello, (2016). Promoción del crecimiento en las plantas de *Capsicum annum* por nanoparticulas de oxido de zinc. *Nova Scientia*, 140-156.
- Castellanos Diana Edit, J. M., y A., H. A. (2015). Evaluacion del efecto de un biofertilizante ligado a un soporte orgánico mineral en un cultivo de lecuga en la Sabana de Bogotá bajo condiciones de invernadero. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 72-85.
- Claudia Rodriguez Lemus, L. R.-P.-A. (Enero-Marzo de 2018). Aplicacion de la TI's a la cadena de valor agrícola para productores de agricultura protegida. *Tecnología en marcha*, 31-1, 178-189.

- Chun, S. C. & Chandrasekaran, M. J. I. j. o. b. m. (2019). Chitosan and chitosan nanoparticles induced expression of pathogenesis-related proteins genes enhances biotic stress tolerance in tomato. *125*, 948-954.
- Cruz Ramirez Juana, G. L. (2017). Fenología de los cultivos rabano, lechuga, cilantro y calabaza. Fenología de los cultivos en un periodo.
- Daimy Costales-Mendez, *et al.* (2020). Efecto de la masa molecular de quitosanos en la germinación y el crecimiento in vitro de soya. *Cultivos Tropicales*.
- Jose M, *et al.* (2017). Comportamiento de la conductancia estomática de dos variedades de tomate cubanas en condiciones de campo y riego limitado. *Cultivos Tropicales* , 7-9.
- Foladori, G., & Invernizzi, N. (2017). El papel de las organizaciones civiles en la innovación: discusión a partir del caso de la nanotecnología. *Revista Tecnología e Sociedade*, 13 (28), 111-131.
- García Edgar Iván, V. J. (2018). Sistema de innovación como marco analítico de la agricultura protegida en la region centro de México. *Cuadernos de desarrollo rural*.
- Ghasem Asgari-Targhi, A. I. (2018). Potencial benefits and phytotoxicity of bulk nano-chitosan on the growth, morphogenesis, physiology, and micropropagation of *Capsicum annum*. *Plant Physiology and Biochemistry*, 393-402.
- Gonzales-Gomez, *et al.* (2017). Evaluación de la aplicación de quitosana sobre plantulas de tabaco (*Nicotiana tabacum* L.). *Rev. Centro*, 44:34-40.
- Goycoolea, F., Remuñán-Lopez, C., & Alonso, M. J. (2009) Nanopartículas a base de polisacáridos: quitosano. En: (Vila, J.L. ed.) *Nanotecnología Farmacéutica*. Madrid: Monografías de la Real Academia Nacional de Farmacia, 103-131 p.
- Gabriel Saavedra, F. S. (2017). Manual de producción de Lechuga. Santiago, Chile: ISSN =0717 -4828.
- Heba Mahmoud Mohammad Abdel-Aziz, M. N.-G. (2018). Effect of Foliar Application of Nano Chitosan NPK Fertilizer on the Chemical Composition of Wheat Grains. *Egypt J. Bot* , 87-95.
- Hipólito Medrano, J. B.-c. (2017). Eficiencia en el uso del agua por las plantas . *Investigaciones Geográficas*, 63-84.
- Juan, Molina. (2017). Desmineralización de la quitina utilizando ácido fósfórico para la obtención del quitosano en el cultivo de arroz. Tesis Master Universidad del Zulia Venezuela, 17.
- Juan Carlos Suarez-Salazar, *et al.* (2017). Pigmentos fotosintéticos y conductancia estomática en ecotipos de copoazú (*Theobroma grandiflorum* Willd. Ex. Spreng K. Scum.). *Agron. Mesoam.*

- Juan José Reyes-Perez, *et al.* (2020). Aplicación de quitosano incrementa la emergencia, crecimiento y rendimiento del cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en condiciones de invernadero. *Biotecnia*, Vol. 22 no. 3.
- Koppert. (2019). *Biological systems*.
- L. Matinez-Corral, *et al.* (agosto 2019). Programa de cómputo para el cálculo de soluciones nutritivas. Chapingo. Serie horticultura, vol. 15 no.- 2.
- La Rosa Villarreal, O. J. (2015). Cultivo de lechuga (*Lactuca sativa*) bajo condiciones del valle del Rimac, Lima. agr-ho tesis.
- Lira Saldivar, B. M. (2018). Potencial de la nanotecnología en la agricultura. *Acta Universitaria* vol. 28, 4-8.
- Marchant, L. A., Tapia, M. L., Luchsinger, L., Rodriguez, S., & Escalona, V. (2016). tratamientos precosecha de radiación ultravioleta-b para aumentar la calidad funcional de lechugas "baby" hidropónicas. *Tecnología postcosecha* vol 17, 193-204.
- Mark, C. (2016). Enhancing phytochemical levels, enzymatic and antioxidant activity of spinach leaves by chitosan treatment and an insight into the metabolic pathway using dart-ms technique. *food chemistry* 199, 176-184.
- Maluin, F. N., & Hussein, M. Z. J. M. (2020). Chitosan-based agronanochemicals as a sustainable alternative in crop protection. 25(7), 1611.
- Miguel E. Medina, L. E. (2015). Las nanopartículas y el medio ambiente. *Universidad Ciencia y Tecnología*, vol. 19 no. 74.
- Molina Zerpa Jose, M. C. (2019). Effect of the use of chitosan in the improvement of rice cultivation. *Innovación Ambiental*, 7-11.
- Morales, V. A. (2019). *Repositorio digital UTEQ*. Obtenido de <https://hopelchen.tecnm.mx/principal/sylabus/fpdb/recursos/r126349.PDF>
- Morteza Sheikhalipour, B. E. (2021). Chitosan-Selenium Nanoparticle (Cs-Se NP) Foliar Spray Alleviates Salt Stress in Bitter Melon. *Nanomaterials*, 11, 684. Obtenido de file:///C:/Users/Usuario/Downloads/nanomaterials-11-00684-v2.pdf
- Mou, C. X. (2018). Chitosan as Soil Amendment Affects Lettuce Growth, Photochemical Efficiency, and Gas Exchange. *Hort Technology*, 476-480.
- Peña-Datoli, *et al.* (2016). Recubrimiento de semillas de maíz (*Zea Mays* L.) con quitosano y alginato de sodio y su efecto en el desarrollo radical. *Agrocencia*, 50: 1091-1106.
- Rastogi, T. D. (2019). Aplicación de nanopartículas de silicio en agricultura. *Biotech*, 90. Obtenido de <https://link.springer.com/article/10.1007/s13205-019-1626-7#citeas>

- Ruixin Li, J. H. (2018). Effects of chitosan nanoparticles on seed germination and seedling growth of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Biological Macromolecules*, 101-109.
- Salavarieta, P. J. (2015). nano-biotecnología y sus potenciales aplicaciones en la agricultura . *Nanopartículas: fundamentos y aplicaciones*, 225-239.
- SIAP. (2019). Lechuga. México.
- SIAP. (2021). Produccion y exportacion de lechuga mexicana.
- Sopalo, W. I. (2019). Repositorio. Obtenido de <http://repositorio.utc.edu.ec/bitstream/27000/4847/1/UTC-PIM-000192.pdf>
- Tanaka, L. S. (2020). Regulacion blanda, normas técnicas y armonización regulatoria internacional para la nanotecnología. *Mundo nano. Revista interdisciplinaria en nanociencia y nanotecnología*.
- Zayed, M., Elkafafi, S. H., & Dawoud, A. M. (2017). Effect of Nano Chitosan on Growth, Physiological and Biochemical Parameters of *Phaseolus vulgaris* under Salt Stress. *J. Plant Production*, 577-585.

APÉNDICE

Cuadro A1. Análisis de varianza ($p < 0.05$) para altura de planta con la aplicación de nanopartículas de quitosán en lechuga a las dosis de 0, 0.5, 1, 2, 4, 8 mg y TPP.

| F.V | SC | gl | CM | F | p-valor |
|-------------|-------|----|------|------|---------|
| Modelo | 10.96 | 7 | 1.57 | 1.18 | 0.3252 |
| Tratamiento | 10.96 | 7 | 1.57 | 1.18 | 0.3252 |
| Error | 82.04 | 62 | 1.32 | | |
| Total | 93.00 | 69 | | | |
| CV | 8.00 | | | | |

Cuadro A2. Comparación de medias de la variable altura de planta con la aplicación de nanopartículas de quitosán en lechuga a las dosis de 0, 0.5, 1, 2, 4, 8 mg y TPP.

| Tratamientos | Medias | n | E.E | Agrupamiento LSD Fisher | |
|-----------------|--------|----|------|----------------------------|---|
| 0 mg (NPs CS) | 13.94 | 10 | 0.36 | A | B |
| 0.5 mg (NPs CS) | 14.41 | 10 | 0.36 | A | B |
| 1 mg (NPs CS) | 14.3 | 9 | 0.38 | A | B |
| 2 mg (NPs CS) | 14.84 | 10 | 0.36 | A | |
| 4 mg (NPs CS) | 14.89 | 10 | 0.36 | A | |
| 8 mg (NPs CS) | 13.75 | 10 | 0.36 | | B |
| TPP | 14.53 | 10 | 0.36 | A | B |
| DSM= 1.50391 | | | | | |

Cuadro A3. Análisis de varianza ($p < 0.05$) para conductancia estomática con la aplicación de nanopartículas de quitosán en lechuga a las dosis de 0, 0.5, 1, 2, 4, 8 mg y TPP.

| F.V | SC | gl | CM | F | p-valor |
|-------------|-----------|----|----------|------|---------|
| Modelo | 226391.57 | 7 | 32341.65 | 2.66 | 0.0406 |
| Tratamiento | 226391.57 | 7 | 32341.65 | 2.66 | 0.0406 |
| Error | 243148.11 | 20 | 12157.41 | | |
| Total | 469539.68 | 27 | | | |
| CV | 12.09 | | | | |

Cuadro A4. Comparación de medias de la variable conductancia estomática con la aplicación de nanopartículas de quitosán en lechuga a las dosis de 0, 0.5, 1, 2, 4, 8 mg y TPP.

| Tratamientos | Medias | n | E.E | Agrupamiento LSD Fisher |
|-----------------|---------|---|-------|----------------------------|
| 0 mg (NPs CS) | 963.98 | 4 | 55.13 | C |
| 0.5 mg (NPs CS) | 1011.93 | 4 | 55.13 | A |
| 1 mg (NPs CS) | 830.4 | 3 | 63.66 | BC |
| 2 mg (NPs CS) | 941.3 | 4 | 55.13 | ABC |
| 4 mg (NPs CS) | 994.28 | 4 | 55.13 | AB |
| 8 mg (NPs CS) | 968.22 | 4 | 55.13 | ABC |
| TPP | 901.02 | 4 | 55.13 | ABC |
| DSM= 193.57349 | | | | |

Cuadro A5. Análisis de varianza ($p < 0.05$) en rendimiento, con la aplicación de nanopartículas de quitosán en lechuga a las dosis de 0, 0.5, 1, 2, 4, 8 mg y TPP.

| F.V | SC | gl | CM | F | p-valor |
|-------------|-----------|----|---------|------|---------|
| Modelo | 29720.71 | 6 | 4953.45 | 0.90 | 0.5142 |
| Tratamiento | 29720.71 | 6 | 4953.45 | 0.90 | 0.5142 |
| Error | 115766.25 | 21 | 5512.68 | | |
| Total | 145486.96 | 27 | | | |
| CV | 14.35 | | | | |

Cuadro A6. Comparación de medias en rendimiento (peso de cabeza) con la aplicación de nanopartículas de quitosán en lechuga a las dosis de 0, 0.5, 1, 2, 4, 8 mg y TPP

| Tratamientos | Medias | n | E.E | Agrupamiento LSD Fisher |
|-----------------|--------|---|-------|----------------------------|
| 0 mg (NPs CS) | 463 | 4 | 37.12 | B |
| 0.5 mg (NPs CS) | 506 | 4 | 37.12 | AB |
| 1 mg (NPs CS) | 515.25 | 4 | 37.12 | AB |
| 2 mg (NPs CS) | 577.25 | 4 | 37.12 | A |
| 4 mg (NPs CS) | 499 | 4 | 37.12 | AB |
| 8 mg (NPs CS) | 536 | 4 | 37.12 | AB |
| TPP | 525.75 | 4 | 37.12 | AB |
| DSM= 109.18149 | | | | |

Cuadro A7. Análisis de varianza ($p < 0.05$) en diámetro de cabeza, con la aplicación de nanopartículas de quitosán en lechuga a las dosis de 0, 0.5, 1, 2, 4, 8 mg y TPP.

| F.V | SC | gl | CM | F | p-valor |
|-------------|-------|----|------|------|---------|
| Modelo | 13.71 | 6 | 2.29 | 1.41 | 0.2566 |
| Tratamiento | 13.71 | 6 | 2.29 | 1.41 | 0.2566 |
| Error | 34.00 | 21 | 1.62 | | |
| Total | 47.71 | 27 | | | |
| CV | 8.65 | | | | |

Cuadro A8. Comparación de medias en diámetro de cabeza, con la aplicación de nanopartículas de quitosán en lechuga a las dosis de 0, 0.5, 1, 2, 4, 8 mg y TPP.

| Tratamientos | Medias | n | E.E | Agrupamiento LSD Fisher |
|-----------------|--------|---|------|----------------------------|
| 0 mg (NPs CS) | 13.25 | 4 | 0.64 | B |
| 0.5 mg (NPs CS) | 15.5 | 4 | 0.64 | A |
| 1 mg (NPs CS) | 14.75 | 4 | 0.64 | AB |
| 2 mg (NPs CS) | 15 | 4 | 0.64 | AB |
| 4 mg (NPs CS) | 15 | 4 | 0.64 | AB |
| 8 mg (NPs CS) | 15.25 | 4 | 0.64 | A |
| TPP | 14.25 | 4 | 0.64 | AB |
| DSM= 1.87110 | | | | |

Cuadro A9. Análisis de varianza ($p < 0.05$) en peso fresco, con la aplicación de nanopartículas de quitosán en lechuga a las dosis de 0, 0.5, 1, 2, 4, 8 mg y TPP.

| F.V | SC | gl | CM | F | p-valor |
|-------------|-----------|----|----------|------|---------|
| Modelo | 95447.71 | 6 | 15907.95 | 0.93 | 0.4947 |
| Tratamiento | 95447.71 | 6 | 15907.95 | 0.93 | 0.4947 |
| Error | 359619.25 | 21 | 17124.73 | | |
| Total | 455066.96 | 27 | | | |
| CV | 14.09 | | | | |

Cuadro A10. Comparación de medias en peso fresco, con la aplicación de nanopartículas de quitosán en lechuga a las dosis de 0, 0.5, 1, 2, 4, 8 mg y TPP.

| Tratamientos | Medias | n | E.E | Agrupamiento LSD Fisher |
|-----------------|--------|---|-------|----------------------------|
| 0 mg (NPs CS) | 859.5 | 4 | 65.43 | A |
| 0.5 mg (NPs CS) | 881 | 4 | 65.43 | A |
| 1 mg (NPs CS) | 968.25 | 4 | 65.43 | A |
| 2 mg (NPs CS) | 1015 | 4 | 65.43 | A |
| 4 mg (NPs CS) | 919 | 4 | 65.43 | A |
| 8 mg (NPs CS) | 992.25 | 4 | 65.43 | A |
| TPP | 868.25 | 4 | 65.43 | A |
| DSM= 192.43298 | | | | |

Cuadro A11. Análisis de varianza ($p < 0.05$) en %MS, con la aplicación de nanopartículas de quitosán en lechuga a las dosis de 0, 0.5, 1, 2, 4, 8 mg y TPP.

| F.V | SC | gl | CM | F | p-valor |
|-------------|-------|----|------|------|---------|
| Modelo | 9.98 | 6 | 1.66 | 3.16 | 0.0229 |
| Tratamiento | 9.98 | 6 | 1.66 | 3.16 | 0.0229 |
| Error | 11.06 | 21 | 0.53 | | |
| Total | 21.03 | 27 | | | |
| CV | 18.54 | | | | |

Cuadro A12. Comparación de medias en %MS, con la aplicación de nanopartículas de quitosán en lechuga a las dosis de 0, 0.5, 1, 2, 4, 8 mg y TPP

| Tratamientos | Medias | n | E.E | Agrupamiento LSD Fisher |
|-----------------|--------|---|------|----------------------------|
| 0 mg (NPs CS) | 3.81 | 4 | 0.36 | BC |
| 0.5 mg (NPs CS) | 4.91 | 4 | 0.36 | A |
| 1 mg (NPs CS) | 3.95 | 4 | 0.36 | AB |
| 2 mg (NPs CS) | 3.69 | 4 | 0.36 | BC |
| 4 mg (NPs CS) | 4.47 | 4 | 0.36 | AB |
| 8 mg (NPs CS) | 2.88 | 4 | 0.36 | C |
| TPP | 3.68 | 4 | 0.36 | BC |
| DSM= 1.06703 | | | | |

Cuadro A13. Análisis de varianza ($p < 0.05$) en la enzima CAT, con la aplicación de nanopartículas de quitosán en lechuga a las dosis de 0, 0.5, 1, 2, 4, 8 mg y TPP.

| F.V | SC | gl | CM | F | p-valor |
|-------------|-------|----|------|------|---------|
| Modelo | 4.76 | 6 | 0.79 | 1.38 | 0.2700 |
| Tratamiento | 4.76 | 6 | 0.79 | 1.38 | 0.2700 |
| Error | 12.12 | 21 | 0.58 | | |
| Total | 16.89 | 27 | | | |
| CV | 68.40 | | | | |

Cuadro A14. Comparación de medias en la variable CAT, con la aplicación de nanopartículas de quitosán en lechuga a las dosis de 0, 0.5, 1, 2, 4, 8 mg y TPP.

| Tratamientos | Medias | n | E.E | Agrupamiento LSD Fisher |
|-----------------|--------|---|------|----------------------------|
| 0 mg (NPs CS) | 0.2 | 4 | 0.38 | B |
| 0.5 mg (NPs CS) | 1.53 | 4 | 0.38 | A |
| 1 mg (NPs CS) | 1.5 | 4 | 0.38 | A |
| 2 mg (NPs CS) | 1.3 | 4 | 0.38 | AB |
| 4 mg (NPs CS) | 1.08 | 4 | 0.38 | AB |
| 8 mg (NPs CS) | 1.08 | 4 | 0.38 | AB |
| TPP | 1.1 | 4 | 0.38 | AB |
| DSM= 1.11726 | | | | |

Cuadro A15. Análisis de varianza ($p < 0.05$) en la enzima APx, con la aplicación de nanopartículas de quitosán en lechuga a las dosis de 0, 0.5, 1, 2, 4, 8 mg y TPP.

| F.V | SC | gl | CM | F | p-valor |
|-------------|---------|----|--------|------|---------|
| Modelo | 5501.36 | 7 | 785.91 | 4.62 | 0.0033 |
| Tratamiento | 5493.22 | 6 | 915.54 | 5.38 | 0.0019 |
| Error | 3402.34 | 20 | 170.12 | | |
| Total | 8903.70 | 27 | | | |
| CV | 59.84 | | | | |

Cuadro A16. Comparación de medias en la variable APx, con la aplicación de nanopartículas de quitosán en lechuga a las dosis de 0, 0.5, 1, 2, 4, 8 mg y TPP.

| Tratamientos | Medias | n | E.E | Agrupamiento LSD Fisher |
|-----------------|--------|---|------|----------------------------|
| 0 mg (NPs CS) | 50.55 | 4 | 6.52 | A |
| 0.5 mg (NPs CS) | 8.11 | 4 | 6.52 | BC |
| 1 mg (NPs CS) | 25.92 | 4 | 6.52 | B |
| 2 mg (NPs CS) | 5.46 | 4 | 6.52 | C |
| 4 mg (NPs CS) | 14.7 | 4 | 6.52 | BC |
| 8 mg (NPs CS) | 26.73 | 4 | 6.52 | B |
| TPP | 21.11 | 4 | 6.52 | BC |
| DSM= 19.23825 | | | | |

Cuadro A17. Análisis de varianza ($p < 0.05$) en la enzima SOD, con la aplicación de nanopartículas de quitosán en lechuga a las dosis de 0, 0.5, 1, 2, 4, 8 mg y TPP.

| F.V | SC | gl | CM | F | p-valor |
|-------------|-------|----|------|------|---------|
| Modelo | 5.46 | 6 | 0.91 | 1.82 | 0.1442 |
| Tratamiento | 5.46 | 6 | 0.91 | 1.82 | 0.1442 |
| Error | 10.51 | 21 | 0.50 | | |
| Total | 15.97 | 27 | | | |
| CV | 45.06 | | | | |

Cuadro A18. Comparación de medias en la variable APx, con la aplicación de nanopartículas de quitosán en lechuga a las dosis de 0, 0.5, 1, 2, 4, 8 mg y TPP.

| Tratamientos | Medias | n | E.E | Agrupamiento LSD Fisher |
|-----------------|--------|---|------|----------------------------|
| 0 mg (NPs CS) | 2.6 | 4 | 0.35 | A |
| 0.5 mg (NPs CS) | 1.3 | 4 | 0.35 | B |
| 1 mg (NPs CS) | 1.41 | 4 | 0.35 | B |
| 2 mg (NPs CS) | 1.2 | 4 | 0.35 | B |
| 4 mg (NPs CS) | 1.31 | 4 | 0.35 | B |
| 8 mg (NPs CS) | 1.62 | 4 | 0.35 | AB |
| TPP | 1.56 | 4 | 0.35 | AB |
| DSM= 1.04039 | | | | |

Cuadro A19. Análisis de varianza ($p < 0.05$) en la enzima GPX, con la aplicación de nanopartículas de quitosán en lechuga a las dosis de 0, 0.5, 1, 2, 4, 8 mg y TPP

| F.V | SC | gl | CM | F | p-valor |
|-------------|-------|----|------|------|---------|
| Modelo | 0.04 | 6 | 0.01 | 0.33 | 0.9153 |
| Tratamiento | 0.04 | 6 | 0.01 | 0.33 | 0.9153 |
| Error | 0.45 | 21 | 0.02 | | |
| Total | 0.49 | 27 | | | |
| CV | 73.07 | | | | |

Cuadro A20. Comparación de medias en la variable GPX, con la aplicación de nanopartículas de quitosán en lechuga a las dosis de 0, 0.5, 1, 2, 4, 8 mg y TPP.

| Tratamientos | Medias | n | E.E | Agrupamiento LSD Fisher |
|-----------------|--------|---|------|----------------------------|
| 0 mg (NPs CS) | 0.25 | 4 | 0.07 | A |
| 0.5 mg (NPs CS) | 0.14 | 4 | 0.07 | A |
| 1 mg (NPs CS) | 0.17 | 4 | 0.07 | A |
| 2 mg (NPs CS) | 0.24 | 4 | 0.07 | A |
| 4 mg (NPs CS) | 0.2 | 4 | 0.07 | A |
| 8 mg (NPs CS) | 0.23 | 4 | 0.07 | A |
| TPP | 0.17 | 4 | 0.07 | A |
| DSM= 0.21413 | | | | |