

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO**  
**DIVISIÓN DE INGENIERÍA**  
**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS BÁSICAS**



**PRODUCCIÓN DE QUITINA Y QUITOSÁN A PARTIR DE RESIDUOS  
AGROALIMENTARIOS Y SU USO COMO BIOESTIMULANTES EN PLANTAS DE  
LECHUGA SOMETIDAS A ESTRÉS POR SALINIDAD**

Por:

**LILIÁN ITZEL JIMÉNEZ MACÍAS**

TESIS

Presentada como requisito parcial para recibir el título de:

**INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA**

Saltillo, Coahuila, México

Junio 2025

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO**  
**DIVISIÓN DE INGENIERÍA**  
**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS BÁSICAS**

**PRODUCCIÓN DE QUITINA Y QUITOSÁN A PARTIR DE RESIDUOS AGROALIMENTARIOS Y  
SU USO COMO BIOESTIMULANTES EN PLANTAS DE LECHUGA SOMETIDAS A ESTRÉS  
POR SALINIDAD**

Por:


**LILIÁN ITZEL JIMÉNEZ MACÍAS**

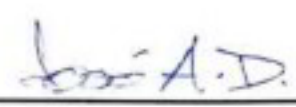
TESIS


Presentada como requisito parcial para recibir el título de:


**INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA**

Aprobada por el Comité de Asesoría:

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Adalberto Benavides Mendoza  
Asesor Principal

  
\_\_\_\_\_  
Dr. José Alejandro Díaz Elizondo  
Asesor Principal Externo

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Marcelino Cabrera de la Fuente  
Coasesor

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Marco Adán Juárez Verdayes  
Coasesor

Saltillo, Coahuila, México.

Junio 2025

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO**  
**DIVISIÓN DE INGENIERÍA**  
**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS BÁSICAS**

**PRODUCCIÓN DE QUITINA Y QUITOSÁN A PARTIR DE RESIDUOS**  
**AGROALIMENTARIOS Y SU USO COMO BIOESTIMULANTES EN PLANTAS DE**  
**LECHUGA SOMETIDAS A ESTRÉS POR SALINIDAD**

**Por:**

**LILIÁN ITZEL JIMÉNEZ MACÍAS**

**TESIS**

**Presentada como requisito parcial para recibir el título de:**

**INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA**

**Aprobada por el Jurado Examinador:**

---

 _____ Dr. Marco Adán Juárez Verdades Presidente	 _____ Dr. Adalberto Benavides Mondou Vocal
 _____ Dr. Marcelino Calles de la Fuente Vocal	 _____ Dr. José Alejandro Díaz Elizondo Vocal suplente
  _____ M.A.C. Sergio Sánchez Martínez Presidente de la División de Ingeniería	

Saltillo, Coahuila, México

Junio 2025


## DERECHO DE AUTOR Y DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

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

Reproducción de fragmentos o textos si 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 autor sin citarlo; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, gráficas, mapas o datos sin citar al autor original y/o fuente. Así mismo tengo conocimiento de que cualquier uso distinto de estos materiales como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

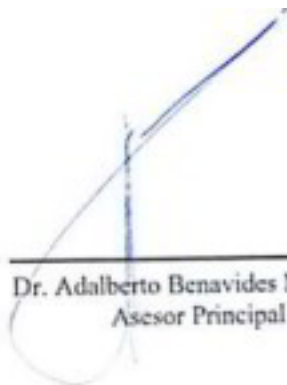
Por lo anterior nos responsabilizamos de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaramos que este trabajo no ha sido previamente presentado en ninguna otra institución educativa, organización, medio público o privado.

Atentamente,  
Alma Terra Mater



---

Lilian Itzel Jiménez Macías  
Autor Principal



---

Dr. Adalberto Benavides Mendoza  
Asesor Principal

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primer lugar a Dios, por haberme sostenido en cada paso de este camino. Su presencia me ha acompañado en los momentos más duros, dándome fuerza cuando las dudas me invadían y esperanza cuando sentía que no podía más. Gracias por regalarme la salud, la sabiduría y la perseverancia necesarias para concluir esta etapa. Sin Tu guía, esta meta no hubiera sido posible.

A mi familia, especialmente a mis padres, Lilia Macías y Ricardo Jiménez, que son mi mayor ejemplo de amor, trabajo y constancia. Gracias por confiar en mí incluso cuando yo dudaba de mis capacidades. Por cada palabra de ánimo, cada sacrificio silencioso y cada gesto de cariño que me impulsó a continuar. A mi hermano, Daniel, gracias por tu compañía, tu paciencia y tus bromas que aliviaron tantas jornadas de cansancio. Su apoyo incondicional ha sido mi mayor motor.

A mis mejores amigos, Max Orihuela, Ivonne Carrillo, Anahí Chávez, Margarita Puentes, quienes me acompañaron durante este proceso con palabras de aliento, oídos atentos y abrazos sinceros. Gracias por estar ahí en los momentos de desvelo, estrés y también en los de celebración. Ustedes me ayudaron a encontrar equilibrio entre la exigencia académica y el bienestar emocional, recordándome siempre que no estaba sola en este camino.

A mis asesores, especialmente a la Dra. Julia Medrano Macías y al Dr. Francisco Javier Enrique Medarano, quienes con su experiencia, dedicación y compromiso guiaron mi trabajo con sabiduría y paciencia. Agradezco profundamente cada corrección, sugerencia y conversación que me permitió crecer académica y personalmente. Gracias por confiar en mi proyecto y por sembrar en mí la inquietud por la investigación, el pensamiento crítico y el compromiso científico. Su ejemplo ha dejado una huella imborrable en mi formación.

Finalmente, agradezco a todos aquellos que, de alguna manera, formaron parte de este proceso. Cada palabra de ánimo, cada acto de apoyo y cada momento compartido sumaron para que hoy pueda ver este sueño hecho realidad.

A todos, ¡gracias de corazón!

## DEDICATORIA

A Dios, por ser mi guía constante, por darme fuerza en los momentos difíciles y por iluminar cada paso de este camino.

A mis padres, por su amor incondicional, sus sacrificios y que la perseverancia y la fe abren cualquier puerta.

A mi hermano, por su apoyo silencioso pero constante, y por recordarme que no estoy sola en esta travesía.

A mi abuelita, por sus palabras de aliento, ayudándome a creer en mí misma, y que todo es posible con un poquito de fe.

A mis amigos, por las palabras de aliento, las risas compartidas y por estar presentes cuando más los necesitaba.

Esta tesis es el fruto de un sueño, de muchos esfuerzos y de la compañía invaluable de quienes siempre creyeron en mí.

*"La felicidad no llega como un destino final, sino como la luz que se enciende mientras caminamos con propósito. Aquel que trabaja con amor, guiado por valores y sostenido por la esperanza, descubre que cada esfuerzo cobra sentido, y que el alma encuentra alegría incluso en los momentos más difíciles. Así, también se escribe una tesis: con fe, entrega y gratitud."*

*- Viktor Frankl*

## ÍNDICE

<b>RESUMEN</b>	<b>1</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>2</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>3</b>
1.1 JUSTIFICACIÓN	4
1.2 HIPÓTESIS	5
1.3 OBJETIVOS	5
1.3.1 <i>Objetivo General</i>	5
1.3.2 <i>Objetivos específicos</i>	5
<b>2. REVISIÓN DE LITERATURA</b>	<b>6</b>
2.1 RESIDUOS AGROALIMENTARIOS	6
2.1.1 <i>Industria camaronesa y generación de residuos en México</i>	6
2.1.2 <i>Composición química de la cáscara de camarón</i>	7
2.1.2.1 Quitina	7
2.1.2.2 Proteínas	7
2.1.2.3 Lípidos	8
2.1.2.4 Minerales	8
2.1.2.5 Otros compuestos bioactivos	8
2.2 BIOESTIMULANTES	9
2.2.1 <i>Generalidades de la quitina</i>	9
2.2.1.1 Características y aplicaciones	10
2.2.1.2 Efecto de la quitina en la lechuga	10
2.2.2 <i>Generalidades del quitosán</i>	11
2.2.2.1 Características y aplicaciones	12
2.2.2.2 Efecto del quitosán en la lechuga	13
2.3 GENERALIDADES DE LA LECHUGA <i>GREAT LAKES 118</i>	14
2.3.1 <i>Botánica</i>	14
2.3.1.1 Taxonomía de la lechuga	14
2.3.1.2 Morfología de la planta	16
2.3.1.2.1 Raíz	16
2.3.1.2.2 Hojas	17
2.3.1.2.3 Tallo	18
2.3.1.2.5 Flores	20
2.3.1.2.6 Fruto	21
2.3.1.3 Requerimientos edafoclimáticos	21
2.3.1.3.1 Clima	21
2.3.1.3.2 Temperatura	21
2.3.1.3.3 Tipo de suelo	21
2.3.1.3.4 Tipo de riego	21
2.3.1.3.5 Altura	22
2.3.1.3.6 Humedad	22
2.3.1.4 Forma de reproducción	22
2.3.1.4.1 Semilla	22
2.3.1.5 Distribución en el mercado	22
2.3.2 <i>Función especie – ecosistema</i>	23
2.3.3 <i>Estrés por salinidad en plantas de lechuga</i>	24
2.3.3.1 Mecanismos de respuesta al estrés por salinidad en la lechuga	24
2.3.3.2 Efectos específicos de la salinidad en la lechuga	24

2.3.3.3	Métodos de cuantificación de estrés por salinidad	25
2.3.3.4	Métodos para mitigar el estrés por salinidad	27
<b>3.</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b>	<b>28</b>
3.1	SELECCIÓN DE LOS RESIDUOS AGROALIMENTARIOS	28
3.2	EXTRACCIÓN DE QUITINA	28
3.3	SÍNTESIS DE QUITOSÁN	29
3.4	CARACTERIZACIÓN DE LA QUITINA Y QUITOSÁN	29
3.5	CULTIVO DE PLANTAS DE LECHUGA Y ESTRÉS POR SALINIDAD	31
3.6	TRATAMIENTOS DE LOS BIOESTIMULANTES	31
3.7	VARIABLES DEL CRECIMIENTO	32
3.8	VARIABLES BIOQUÍMICAS	33
3.8.1	<i>Cuantificación de clorofilas</i>	33
3.8.2	<i>Cuatificación de prolina</i>	33
3.9	MUESTREO Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO	34
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>34</b>
4.1	RENDIMIENTO DE LOS RESIDUOS AGRONÓMICOS	34
4.2	ESPECTROSCOPIA INFRARROJA CON TRANSFORMADA DE FOURIER	35
4.3	ESPECTROSCOPIA POR RESONANCIA MAGNÉTICA NUCLEAR DE PROTÓN	37
4.4	RESPUESTA DE LAS PLANTAS DE LECHUGA AL ESTRÉS SALINO	38
<b>5.</b>	<b>DISCUSIÓN</b>	<b>44</b>
5.1	INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS Y SU COMPARACIÓN CON ESTUDIOS PREVIOS	44
5.1.1	<i>Rendimiento de quitina y quitosán</i>	44
5.1.2	<i>Efecto bioestimulante en factores agronómicos</i>	46
5.1.3	<i>Contenido de clorofila en estrés salino</i>	47
5.1.4	<i>Reducción de prolina y manejo de estrés salino</i>	48
5.2	IMPLICACIONES Y RELEVANCIA DE LOS HALLAZGOS	48
5.2.1	<i>Implicaciones para la agricultura sostenible</i>	48
5.2.1.1	Reducción de residuos industriales	49
5.2.1.2	Alternativa natural a productos químicos	49
5.2.2	<i>Manejo del estrés salino en la agricultura</i>	49
5.2.2.1	Mejora de la tolerancia al estrés salino	49
5.2.2.2	Reducción de los efectos del estrés osmótico	49
5.2.3	<i>Relevancia económica y productividad agrícola</i>	50
5.2.3.1	Incremento en el rendimiento de cultivos	50
5.2.3.2	Reducir el uso de insumos costosos	50
5.2.4	<i>Implicaciones para la salud del suelo y la biodiversidad</i>	50
5.2.4.1	Mejora de la salud del suelo	50
5.2.4.2	Reducción de la dependencia de pesticidas	50
5.2.5	<i>Implicaciones para el desarrollo de nuevas formulaciones y tecnologías agrícolas</i>	50
5.2.5.1	Bioestimulantes de liberación controlada	51
5.2.5.2	Productos innovadores para cultivos específicos	51
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>51</b>
6.1	CUMPLIMIENTO DE LOS OBJETIVOS PLANTEADOS	51
6.2	APORTES Y LIMITACIONES DEL ESTUDIO	51
6.2.1	<i>Aportaciones del estudio</i>	51
6.2.2	<i>Limitaciones</i>	52

<b>7. RECOMENDACIONES</b>	<b>54</b>
7.1 RECOMENDACIONES PARA FUTURAS INVESTIGACIONES	54
7.2 APLICACIONES PRÁCTICAS Y POTENCIALES USOS DE LA QUITINA COMO BIOESTIMULANTE	55
7.3 APLICACIONES PRÁCTICAS Y POTENCIALES USOS DEL QUITOSÁN COMO BIOESTIMULANTE	55
<b>8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>56</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Ácidos grasos poliinsaturados (PUFA)	8
<b>Figura 2.</b> Estructura química de la astaxantina	8
<b>Figura 3.</b> Estructura química de la quitina	9
<b>Figura 4.</b> Estructura cristalina de la quitina	9
<b>Figura 5.</b> Estructura química del quitosán	12
<b>Figura 6.</b> Proceso de desacetilación de la quitina	12
<b>Figura 7.</b> Clasificación taxonómica de la lechuga <i>Great Lakes 118</i>	15
<b>Figura 8.</b> Morfología de la lechuga <i>Great Lakes 118</i>	16
<b>Figura 9.</b> Macerado de cáscara de camarón	28
<b>Figura 10.</b> Extracción de quitina	28
<b>Figura 11.</b> Transformación química de quitosán	29
<b>Figura 12.</b> Espectrómetro infrarrojo por Transformada de Fourier (FTIR)	30
<b>Figura 13.</b> Espectrómetro de resonancia magnética nuclear	30
<b>Figura 14.</b> Cultivo de plantas de lechuga	31
<b>Figura 15.</b> Aplicación foliar de tratamiento de los bioestimulantes de quitina y quitosán	32
<b>Figura 16.</b> Extracción de colorfilas	33
<b>Figura 17.</b> Extracción de prolina	34
<b>Figura 18.</b> Rendimiento porcentual de cáscara de camarón	35
<b>Figura 19.</b> Espectros traslapados de FTIR de quitina y quitosán	36
<b>Figura 20.</b> Espectros de <sup>1</sup> H-NMR de quitina y quitosán	38

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Composición de la cáscara de camarón	7
<b>Tabla 2.</b> Factores agronómicos	39
<b>Tabla 3.</b> Cuantificación de clorofila	42
<b>Tabla 4.</b> Cuantificación de prolina	43

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

<b>Gráfica 1.</b> Comparativa de las distintas concentraciones de quitina en los factores agronómicos	39
<b>Gráfica 2.</b> Comparativa de las distintas concentraciones de quitosán en los factores agronómicos	40
<b>Gráfica 3.</b> Comparativa del control con quitina y quitosán a 10 ppm, respectivamente	40
<b>Gráfica 4.</b> Comparativa del control con quitina y quitosán a 50 ppm, respectivamente	41
<b>Gráfica 5.</b> Comparativa del control con quitina y quitosán a 100 ppm, respectivamente	42
<b>Gráfica 6.</b> Curva de calibración de la determinación de prolina	43

## RESUMEN

La industria camaronera en México genera residuos en gran tonelaje, dada la cría y procesamiento de camarones, sus subproductos son ricos en nutrientes y compuestos valiosos como la cáscara de camarón que contiene quitina, un polisacárido que le proporciona resistencia, mismo que puede transformarse en quitosán. Un bioestimulante es una sustancia que promueve el crecimiento, desarrollo y salud de las plantas mejorando sus procesos biológicos y su resistencia a factores ambientales estresantes. Se ha reportado que la quitina como bioestimulante mejora el crecimiento de las plantas y controla plagas. Así mismo, su derivado, el quitosán, obtenido mediante desacetilación, promueve el crecimiento de raíces mejorando la absorción de agua y nutrientes, aumentando el crecimiento general de la planta. La lechuga *Great Lakes 118* pertenece a la especie *Lactuca sativa*, y uno de los mayores problemas del cultivo es el estrés por salinidad, afectando negativamente la absorción de agua y nutrientes provocando la activación de mecanismos antioxidantes. El objetivo del estudio fue obtener quitina de la cáscara del camarón, transformarla en quitosán y caracterizarlos por técnicas de FTIR y NMR. Además, evaluar su efecto bioestimulante en plantas de lechuga sometidas a estrés salino, mediante la aplicación foliar de tres concentraciones a 10, 50 y 100 ppm de quitina y quitosán, respectivamente. los resultados mostraron un incremento en el área foliar, el peso fresco de raíz y biomasa. El contenido de clorofila no mostró diferencias entre los tratamientos, sin embargo, hubo una reducción de prolina en los tratamientos en comparación con el control.

**Palabras clave:** Bioestimulante, Quitina, Quitosán, Agro-residuos, Lechuga, Camarón.

## ABSTRACT

The shrimp industry in Mexico generates a large tonnage of waste, given the shrimp farming and processing, its by-products are rich in nutrients and valuable compounds such as shrimp shell that contains chitin, a polysaccharide that provides resistance, which can be transformed into chitosan. A biostimulant is a substance that promotes the growth, development and health of plants by improving their biological processes and their resistance to environmental stressors. It has been reported that chitin as a biostimulant improves plant growth and controls pests. Likewise, its derivative, chitosan, obtained by deacetylation, promotes root growth by improving water and nutrient absorption, increasing overall plant growth. Great Lakes 118 lettuce belongs to the *Lactuca sativa* species, and one of the major problems of the crop is salinity stress, which negatively affects the absorption of water and nutrients, causing the activation of antioxidant mechanisms. The objective of the study was to obtain chitin from shrimp shell, transform it into chitosan and characterize it by FTIR and NMR techniques. In addition, to evaluate its biostimulant effect on lettuce plants subjected to salt stress, by foliar application of three concentrations at 10, 50 and 100 ppm of chitin and chitosan, respectively. The results showed an increase in leaf area, root fresh weight and biomass. Chlorophyll content showed no differences among treatments; however, there was a reduction of proline in the treatments compared to the control.

**Keywords:** Biostimulant, Chitin, Chitosan, Agro-waste, Lettuce, Shrimp.

## 1. INTRODUCCIÓN

La industria camaronera en México es crucial y genera una cantidad muy considerable de residuos debido a la cría y procesamiento de camarones. Los desechos incluyen restos de alimentos, heces de camarones, cáscaras y cabezas. Los subproductos del procesamiento de estos pueden ser ricos en nutrientes y compuestos valiosos, específicamente, la cáscara de camarón es rica en quitina, un polisacárido que le proporciona su resistencia, así mismo, la quitina puede convertirse en quitosán mediante reacciones sencillas de desacetilación (Hernández-Núñez, 2008). Por otra parte, un bioestimulante es una sustancia o mezcla de sustancias que promueve el crecimiento, desarrollo y salud de las plantas al mejorar sus procesos biológicos y su resistencia a factores ambientales estresantes, estos actúan a nivel fisiológico para potenciar la capacidad natural de las plantas para absorber nutrientes, resistir enfermedades y adaptarse a condiciones adversas (Falcón et al., 2015). La quitina es un polisacárido presente en la cáscara de camarón, crustáceos, insectos y hongos. Es biodegradable, resistente a solventes, flexible, ligera, y tiene propiedades antimicrobianas y antifúngicas, se utiliza en la industria agrícola como bioestimulante para mejorar el crecimiento de las plantas y como agente de control de plagas (Lárez-Velásquez, 2008). Así mismo, como se mencionó anteriormente, el quitosán es un polisacárido derivado de la quitina, obtenido mediante desacetilación, es soluble en agua, biocompatible, biodegradable y no tóxico. Utilizado como bioestimulante puede promover el crecimiento de raíces más fuertes y extensas, lo que mejora la absorción de agua y nutrientes, así como favorecer el desarrollo de hojas y tallos, aumentando el crecimiento general de la planta (Campos-Rodríguez et al., 2021).

La lechuga Great Lakes 118 pertenece a la especie *Lactuca sativa*, que a su vez se encuentra dentro de la familia Asteraceae. Ésta se distribuye a través de varios canales: mercados mayoristas, supermercados, tiendas de comestibles, restaurantes, cafeterías, y mercados locales o ferias agrícolas. Cada canal permite que el producto llegue a los consumidores finales de manera eficiente. Uno de los mayores problemas del cultivo es el estrés por salinidad, pues afecta negativamente a las plantas de lechuga Great Lakes 118 dificultando la absorción de agua y nutrientes debido a la alta concentración de sal en el suelo. Este estrés provoca respuestas como la acumulación de solutos compatibles (aminoácidos y azúcares) y la activación de mecanismos antioxidantes para protegerse del estrés oxidativo. La tolerancia a la salinidad varía según la genética de la lechuga, por lo que es crucial aplicar estrategias para mitigar el estrés como el uso de bioestimulantes (Terry-Alonso et al., 2011; Rodríguez-Santiesteban et al., 2024).

El presente estudio tiene como objetivo obtener quitina de residuos agroalimentarios, en particular de la cáscara del camarón, y transformarlo en quitosán, así mismo, evaluar su efecto bioestimulante en plantas de lechuga sometidas a estrés por salinidad. Además, se espera que la aplicación de la quitina

y el quitosán mitiguen los efectos negativos del estrés por salinidad en las plantas de lechuga. Los métodos incluyen diferentes etapas, iniciando con el tratamiento del material crudo, la eliminación de proteínas, minerales y pigmentos, obteniendo quitina, posteriormente, se desacetiló obteniendo quitosán. El cultivo de las plantas de la lechuga se llevó a cabo desde la germinación de las semillas hasta su trasplante a maceta con perlita nutriéndolas durante dos semanas con solución de Steiner al 25%.

Subsecuentemente se sometieron las plantas a estrés salino con 100 mM de cloruro de sodio (NaOH) durante una semana. Para la aplicación de los bioestimulantes de quitina y quitosán, se realizaron concentraciones de 10, 50 y 100 ppm. Los resultados obtenidos mostraron que el rendimiento de la obtención de quitina fue de un 27%, del cual 29.6% se transformó en quitosán. Se evidenció por espectroscopía de infrarrojo y de resonancia magnética nuclear la obtención de ambos compuestos, el compuesto extraído y el transformado químicamente. Por otro lado, se observó una variación significativa en los factores agronómicos evaluados, especialmente en el tratamiento con quitosán, mejorando aspectos como el área foliar de la planta, el peso fresco de la raíz y de la biomasa. Sin embargo, en cuanto a la cuantificación de clorofila, no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos con quitosán, quitina y el grupo de control. A su vez, hubo una reducción de prolina en el tratamiento de 10 ppm de quitina y quitosán a comparación del grupo de control.

### **1.1 Justificación**

La investigación sobre la utilización de quitina y quitosán derivados de los residuos de la industria camaronera en México es relevante por varias razones. Primero, la industria camaronera genera una cantidad significativa de desechos que, en lugar de ser considerados solo como residuos, pueden transformarse en recursos valiosos. La quitina, presente en las cáscaras de camarón, y su derivado, el quitosán, tienen propiedades bioestimulantes que pueden ser aprovechadas para mejorar el crecimiento y desarrollo de plantas. En un contexto agrícola donde el estrés por salinidad es un problema creciente, el uso de bioestimulantes como el quitosán se presenta como una alternativa viable para mitigar este estrés. La capacidad de estos compuestos para mejorar la absorción de agua y nutrientes en plantas, como la lechuga Great Lakes 118, es crucial para aumentar la productividad agrícola y la salud del cultivo, especialmente en condiciones adversas. Además, los resultados del estudio, que muestran un incremento en el área foliar, peso fresco de raíz y biomasa, respaldan la efectividad del quitosán como una estrategia para enfrentar el estrés salino. La reducción de prolina en los tratamientos indica una respuesta positiva en la adaptación de las plantas a condiciones de estrés, lo que sugiere que el uso de quitina y quitosán no solo promueve un crecimiento más robusto, sino que también ayuda a las plantas a gestionar mejor los factores de estrés ambiental. Por lo tanto,

esta investigación no solo contribuye al aprovechamiento sostenible de los subproductos de la industria camaronesa, sino que también ofrece soluciones innovadoras para mejorar la producción agrícola en un contexto de desafíos ambientales, lo que la convierte en un tema de gran relevancia científica y económica.

## **1.2 Hipótesis**

Se obtendrá quitina a partir de cascarilla de camarón y se podrá transformar químicamente quitosán mediante desacetilación. La aplicación de la quitina y el quitosán mitigarán los efectos negativos del estrés por salinidad en plantas de lechuga (*Lactuca sativa*).

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo General**

Obtener quitina de residuos de camarón y sintetizar quitosán a partir de ésta, y evaluar sus efectos bioestimulantes en plantas de lechuga sometidas a estrés por salinidad.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

1. Extraer y caracterizar quitina de cascarilla de camarón.
2. Producir y caracterizar quitosán a partir de la quitina obtenida de la cascarilla de camarón.
3. Evaluar el efecto bioestimulante de la quitina sobre el crecimiento de plantas de lechuga sometidas a estrés por salinidad.
4. Evaluar el efecto bioestimulante del quitosán sobre el crecimiento de plantas de lechuga sometidas a estrés por salinidad.
5. Evaluar el efecto sobre el contenido molecular y génico con indicadores de prolina y clorofila de las plantas de lechuga.

## **2. REVISIÓN DE LITERATURA**

### **2.1 Residuos agroalimentarios**

#### **2.1.1 Industria camaronera y generación de residuos en México**

Los residuos agroalimentarios abarcan todos los desechos generados a lo largo de la producción, procesamiento y distribución de alimentos. Estos pueden incluir restos de cultivos, subproductos de la industria alimentaria y residuos orgánicos que, si no se gestionan adecuadamente, representan un problema ambiental significativo. Sin embargo, estos residuos también pueden ser valorizados, convirtiéndose en recursos útiles para diversas aplicaciones, desde la producción de biocombustibles hasta la fabricación de bioplásticos (Rojas et al., 2020).

En México, la industria camaronera es una actividad importante ocupando los primeros lugares en valor comercial del producto, y en el número de embarcaciones mayores y menores involucradas en la pesca e infraestructura instalada que genera una cantidad significativa de residuos. El país cuenta con una extensa costa y condiciones favorables para la cría y producción de camarones, lo que ha llevado al desarrollo de una industria camaronera sólida. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), las actividades acuícolas en los países en vías de desarrollo han incrementado un 9.8% de la producción de alimentos marinos incluido el camarón, así mismo, en el año 2021 la Comisión Nacional de Acuicultura y Pesca (CONAPESCA, 2021) proclamó que México ocupó el décimo lugar en producción de camarón, en donde se produjo alrededor de 227 000 toneladas de camarón, lo que estimó un ascenso de desechos a más de 100 000 toneladas (FAO, 2021). Este crecimiento, sin embargo, genera un alto volumen de residuos. Se estima que entre el 40% y el 50% del peso total de los camarones se convierte en desechos, que incluyen cáscaras, cabezas, y vísceras (Brito et al., 2018).

La generación de residuos en la industria camaronera en México puede provenir de diversas fuentes. Durante el proceso de cultivo de camarones, se generan desechos orgánicos como restos de alimentos y heces de camarones. Estos desechos pueden afectar la calidad del agua y el equilibrio ecológico de los ecosistemas acuáticos si no se manejan adecuadamente. Por su parte, los subproductos del procesamiento de camarones, como las cáscaras y las cabezas, también generan una cantidad considerable de residuos, sin embargo, estos subproductos pueden ser ricos en nutrientes y compuestos valiosos, como la quitina, que se utiliza en diversas aplicaciones industriales y agrícolas.

## 2.1.2 Composición química de la cáscara de camarón

La cáscara de camarón es un subproducto de gran importancia en la industria camaronera, representando un desecho significativo que, si se gestiona adecuadamente, puede convertirse en un recurso valioso. La composición química de la cáscara de camarón es diversa y está formada principalmente por quitina, pero también incluye proteínas, minerales y otros compuestos bioactivos (tabla 1).

**Tabla 1.** Composición de la cáscara de camarón (Hamed et al., 2016).

	DESPERDICIO DEL CUERPO DE CAMARÓN PELADO (%)	DESPERDICIO DE LA CABEZA (%)	DESPERDICIO DE JAIBA (%)
Quitina	37	13.5 – 17.5	13 – 15
Proteína total	40	29 – 37.5	18 – 35
Proteína accidental	28	20 – 26	18 – 28
Proteína de uniones firmes	12	9 – 10	12 – 7
Cenizas (CaCO <sub>3</sub> )	33	25 – 27	50
Material soluble y otros como grasas y proteínas digeridas	0	32.5 – 35.2	7
TOTAL	100	100	100

### 2.1.2.1 Quitina

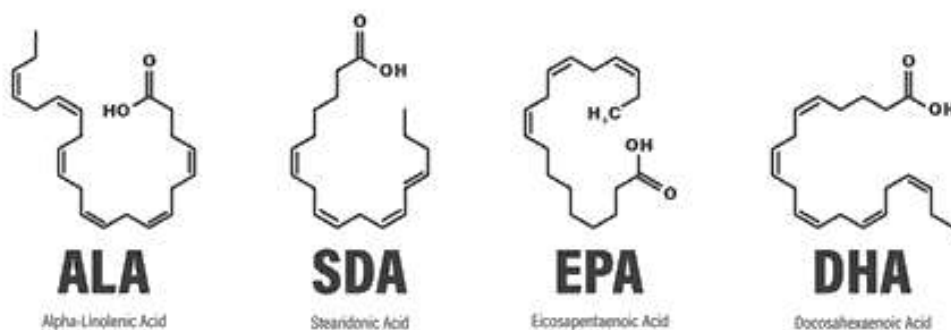
Este biopolímero es el componente principal de la cáscara de camarón, constituyendo más 20% de su peso seco en el cuerpo, y oscila entre el 13 y 17% en la cabeza. La quitina se compone de unidades de N-acetilglucosamina, lo que le confiere propiedades estructurales que permiten la protección y rigidez del crustáceo. La quitina no solo tiene un papel fundamental en la estructura de la cáscara, sino que también es un precursor valioso para la producción de quitosán, que se obtiene mediante un proceso de desacetilación. El quitosán es conocido por sus múltiples aplicaciones en biomedicina, farmacología y agricultura, destacándose por su capacidad para mejorar el crecimiento de las plantas y su resistencia a factores estresantes (Rinaudo, 2006; Mohammed et al., 2019).

### 2.1.2.2 Proteínas

La cáscara de camarón también contiene un porcentaje significativo de proteínas, que oscila entre el 40% de su peso seco en el cuerpo. Estas proteínas son ricas en aminoácidos esenciales y pueden ser utilizadas en la formulación de suplementos nutricionales y en la industria alimentaria. La extracción y purificación de estas proteínas han sido objeto de estudio, ya que pueden tener aplicaciones en la alimentación humana y animal (Zhao et al., 2011).

### 2.1.2.3 Lípidos

Los desechos de camarón contienen ácidos grasos poliinsaturados (PUFA), mayoritariamente aquellos derivados de omega 3, como el ácido eicosapentaenoico (EPA) y el ácido docosahexaenoico (DHA) que proporcionan beneficios al consumidor disminuyendo el riesgo de enfermedades cardiovasculares y cáncer, los cuales se muestran en la figura 1 (Gómez et al., 2017).



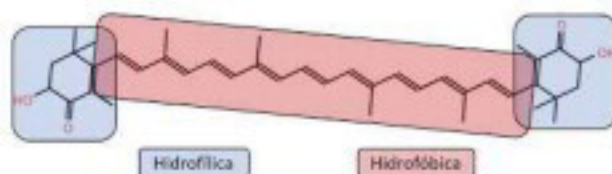
**Figura 1.** Ácidos grasos poliinsaturados (PUFA) (Gómez et al., 2017).

### 2.1.2.4 Minerales

Los residuos de cáscara de camarón son una fuente rica en minerales, incluidos calcio, fósforo y magnesio, que son esenciales para diversas funciones biológicas. Estos minerales no solo son importantes para la nutrición, sino que también pueden ser utilizados como fertilizantes en la agricultura, ayudando a mejorar la calidad del suelo y la salud de las plantas (López et al., 2018).

### 2.1.2.5 Otros compuestos bioactivos

Además de los mencionados anteriormente, la cáscara de camarón contiene carotenoides, pigmentos naturales con propiedades antioxidantes que pueden ofrecer beneficios para la salud humana. Uno de los que se encuentran en mayor proporción es la astaxantina (ver figura 2), así mismo, posee la mayor actividad antioxidante a comparación de los carotenoides  $\beta$ -caroteno y  $\alpha$ -tocoferol (Ambati et al., 2014). La extracción y utilización de carotenoides de la cáscara de camarón ha demostrado ser prometedora, no solo para la industria alimentaria, sino también para la formulación de suplementos dietéticos (Sang et al., 2021).



**Figura 2.** Estructura química de la astaxantina (Ambati et al., 2014).

## 2.2 Bioestimulantes

Los bioestimulantes son sustancias naturales o biológicas que promueven el crecimiento, desarrollo y salud de las plantas al mejorar sus procesos biológicos y su resistencia a factores ambientales estresantes. Entre los diversos tipos de bioestimulantes, la quitina ha ganado atención por sus propiedades beneficiosas en la agricultura (Rojas et al., 2020).

### 2.2.1 Generalidades de la quitina

La quitina es un polisacárido que se encuentra en la naturaleza y es uno de los componentes principales de varias conchas de organismos marinos, como la cáscara de camarón, así como de otros crustáceos, insectos y hongos (*Zygomycetes*). Químicamente, la quitina está compuesta por unidades repetidas de N-acetilglucosamina (ver figura 3), lo que le confiere propiedades únicas, como alta resistencia mecánica y biodegradabilidad (Rinaudo, 2006), así mismo, posee incontables grupos amida, los cuales pueden ser ionizados, lo que promueve su disolución (Bautista et al., 2017).

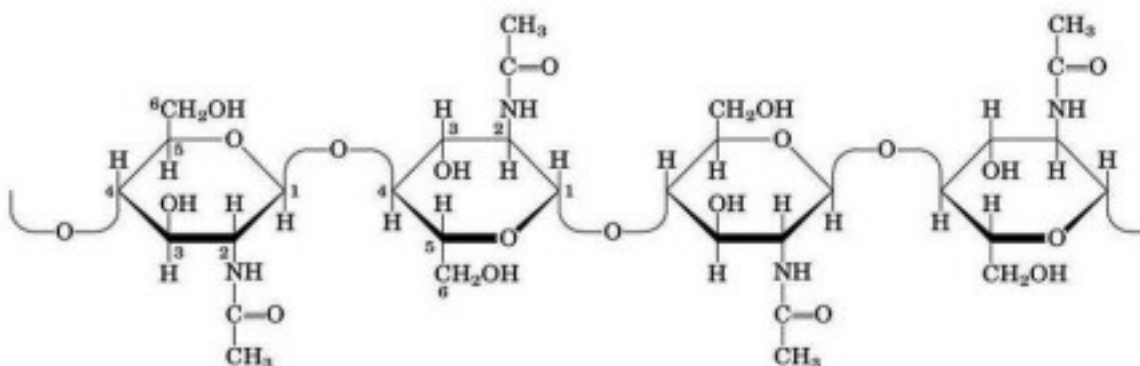


Figura 3. Estructura química de la quitina (Rinaudo, 2006).

La quitina se presenta en diversas formas, siendo las más comunes la quitina cristalina y la quitina amorfa (ver figura 4). Su estructura y propiedades físicas varían según su origen y el método de extracción. Este biopolímero no solo es abundante y renovable, sino que también se puede transformar en quitosán mediante un proceso de desacetilación, lo que amplía aún más su gama de aplicaciones.

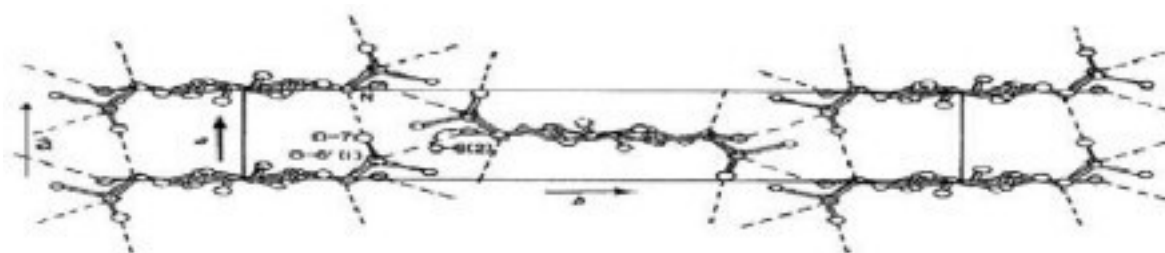


Figura 4. Estructura cristalina de la quitina (Bautista et al., 2017).

### **2.2.1.1 Características y aplicaciones**

En cuanto a sus características, la quitina es un material no tóxico, biodegradable y biocompatible, lo que la convierte en un candidato ideal para aplicaciones en diversos campos. Su capacidad para formar geles, su solubilidad en ciertos ácidos y su actividad biológica la hacen atractiva para la investigación y desarrollo de productos innovadores. Además, la quitina también se emplea como agente de control biológico. Al estimular la actividad de microorganismos beneficiosos en el suelo, puede ayudar a suprimir patógenos y mejorar la salud general de las plantas. Esto se traduce en una reducción del uso de pesticidas químicos, promoviendo prácticas agrícolas más sostenibles.

En la industria alimentaria, la quitina se utiliza como aditivo para mejorar la textura y estabilidad de los alimentos. También se ha investigado su uso como recubrimiento comestible para prolongar la vida útil de los alimentos y como agente de encapsulación para la liberación controlada de compuestos bioactivos (Sang et al., 2021).

En la industria farmacéutica, la quitina se utiliza en la fabricación de vendajes y apósitos para heridas, debido a sus propiedades de promoción de la cicatrización y su capacidad para absorber líquidos y mantener un ambiente húmedo en la herida. También se ha estudiado su uso en la liberación controlada de fármacos y en la ingeniería de tejidos.

Además, la quitina se utiliza en la industria agrícola como bioestimulante en el cultivo de plantas. Se ha demostrado que mejora el crecimiento de raíces, aumenta la absorción de agua y nutrientes, y potencia la resistencia de las plantas a enfermedades y estrés ambiental. Varios estudios han evidenciado que la aplicación de quitina o quitosán puede resultar en un aumento significativo del rendimiento de cultivos, así como en la mejora de la calidad de los productos agrícolas (Rojas et al., 2020).

### **2.2.1.2 Efecto de la quitina en la lechuga**

La quitina ha sido estudiada por su efecto en el cultivo de la lechuga y se ha encontrado que puede tener varios beneficios.

La aplicación de quitina ha demostrado promover el crecimiento de la lechuga al estimular la formación de raíces y la expansión de hojas. Los compuestos de quitina pueden inducir la producción de hormonas vegetales, como las auxinas, que son esenciales para el desarrollo de raíces y la división celular (Rojas et al., 2020). Algunos estudios han mostrado que la aplicación de quitina puede resultar

en un incremento significativo en la altura de la planta y el área foliar, mejorando así el rendimiento general del cultivo (Puglisi & Cattaneo, 2018).

La quitina mejora la estructura del suelo y fomenta la actividad microbiana beneficiosa, lo que puede facilitar la disponibilidad y absorción de nutrientes esenciales, como nitrógeno, fósforo y potasio (Sang et al., 2021). Esto es especialmente relevante en el cultivo de lechuga, ya que una adecuada nutrición es crucial para su desarrollo y calidad. Diversas investigaciones han indicado que el uso de quitina puede aumentar los niveles de nutrientes en las hojas de lechuga, contribuyendo a un crecimiento más saludable (Rojas et al., 2020).

La quitina también actúa como un agente que potencia las defensas naturales de las plantas. Al estimular la producción de metabolitos secundarios y proteínas de defensa, la quitina puede ayudar a la lechuga a resistir enfermedades fúngicas y bacterianas (Puglisi & Cattaneo, 2018). Varios estudios han reportado una disminución en la incidencia de enfermedades, como el mildiú veloso, en cultivos de lechuga tratados con quitina. Al formar una barrera física en la superficie de las hojas, la quitina puede dificultar la entrada de patógenos y reducir la incidencia de enfermedades fúngicas.

Otro efecto interesante de la quitina en la lechuga es su capacidad para mejorar la resistencia de las plantas al estrés abiótico, como la sequía o las altas temperaturas. Se ha observado que la aplicación de quitina puede aumentar la tolerancia de las plantas de lechuga a estas condiciones adversas, lo que puede ser beneficioso en regiones con climas desafiantes. Además de los beneficios en el crecimiento, la aplicación de quitina ha mostrado efectos positivos en la calidad de la lechuga. Las plantas tratadas con quitina tienden a tener un contenido más alto de antioxidantes y nutrientes, lo que mejora su valor nutricional (Sang et al., 2021). Asimismo, los productos obtenidos son más frescos y tienen una vida útil más prolongada, lo que es crucial para la industria de alimentos.

### **2.2.2 Generalidades del quitosán**

Como se puede apreciar en la figura 5, la estructura química del quitosán está formada por 2-amino-2-deoxybeta-D-glucosamina (Abdel et al. 2010), y se considera un biopolímero con carga positiva en solución ácida dando un pH aproximado de  $< 5.5$ , lo que le permite tener la capacidad de formar geles, films y emulsiones, para ser utilizado en la encapsulación de nutrientes y compuestos bioactivos (Sang et al., 2021).

El quitosán es un biopolímero derivado de la quitina, cuyo peso molecular comprende de 10,000 a 1,000,000 Dalton, y se obtiene a través de un proceso de desacetilación como se observa en la figura 6.

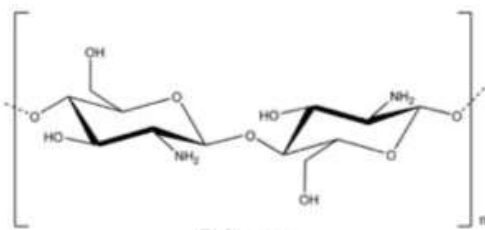


Figura 5. Estructura química del quitosán (Abdel et al. 2010).

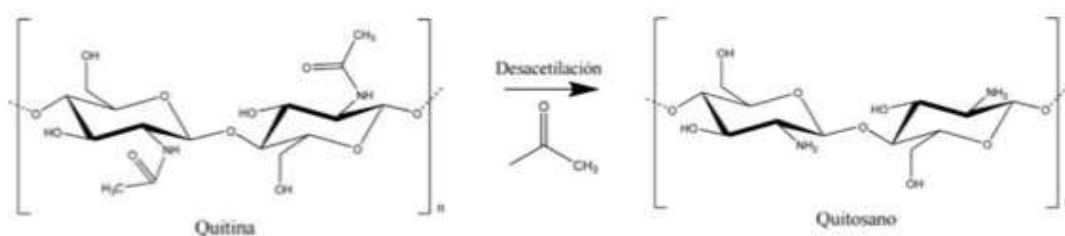


Figura 6. Proceso de desacetilación de la quitina (Bautista et al., 2017).

El principal índice de equilibrio entre la quitina y el quitosán es el grado de acetilación, y mediante la desacetilación se eliminan los grupos acetilo, lo que produce una despolimerización reflejada en los cambios de peso molecular particular del quitosán (Bautista et al., 2017). El rendimiento de quitosán sobre la quitina en exoesqueletos es consecuente a la materia prima manipulada, así mismo de su proveniencia y el método de extracción utilizado, sin embargo, puede llegar a figurar hasta un 78% sobre la quitina.

El quitosán se considera dentro de los polímeros más concentrados en la naturaleza posterior a la celulosa (Lopez-Moya et al., 2019). Este compuesto ha atraído la atención en diversos campos debido a sus propiedades únicas y versatilidad en aplicaciones industriales y agrícolas. Al ser soluble en medios ácidos, el quitosán tiene una amplia gama de aplicaciones, que abarcan desde la agricultura hasta la industria farmacéutica.

### 2.2.2.1 Características y aplicaciones

El quitosán es un material no tóxico, biocompatible y biodegradable, lo que lo convierte en una opción ecológica para diversas aplicaciones (Rinaudo, 2006). Una de las principales aplicaciones del quitosán es en la industria alimentaria. Se utiliza como recubrimiento comestible para prolongar la vida útil de los alimentos, tiene la capacidad de formar películas cuya atmósfera interna evita la

transpiración, así mismo tiene propiedades antimicrobianas dada su característica hidrocoloide con pH alcaloide, dicha propiedad está proporcionada por el grado de desacetilación y la longitud de la molécula, las condiciones ambientales, sustrato, pH, entre otros factores, es decir, a mayor grado de desacetilación mayor actividad antimicrobiana y el complejo polielectrolito del quitosán bloquea físicamente la membrana celular de la bacteria, imposibilitando el flujo normal de sustancias causandoles la muerte (Vargas et al., 2018). También se utiliza como agente clarificante en la producción de vinos y jugos, ya que puede ayudar a eliminar impurezas y mejorar la claridad de los productos (Puglisi & Cattaneo, 2018).

En la industria farmacéutica, el quitosán tiene varias aplicaciones. Se utiliza en la fabricación de vendajes y apósitos para heridas, debido a sus propiedades de promoción de la cicatrización y su capacidad para absorber líquidos y mantener un ambiente húmedo en la herida. También se ha estudiado su uso en la entrega de fármacos, ya que puede actuar como un vehículo para transportar medicamentos a través de las membranas celulares.

Además, el quitosán se utiliza en la agricultura como bioestimulante para mejorar el crecimiento de las plantas y como agente de control de plagas. Estimula la producción de fitohormonas estrechamente asociadas al sistema radicular su desarrollo, según Li (Li et al, 2020), el quitosán figura en la agricultura como bioregulador de los mecanismos de respuestas metabólicas de las plantas. También se ha investigado su uso en la remediación ambiental, como en la eliminación de metales pesados y contaminantes en el agua. Su estructura química le permite retener agua, lo que es ventajoso en aplicaciones agrícolas para mejorar la conservación de la humedad del suelo (Rojas et al., 2020).

Otras aplicaciones del quitosán incluyen su uso en la industria cosmética, en la fabricación de materiales biodegradables, en la ingeniería de tejidos y en la purificación de aguas residuales. Es importante destacar que las propiedades y aplicaciones del quitosán pueden variar dependiendo de factores como su grado de desacetilación, su peso molecular y su origen. Además, es necesario realizar más investigaciones para seguir explorando y optimizando sus aplicaciones en diferentes industrias.

#### **2.2.2.2 Efecto del quitosán en la lechuga**

El quitosán ha sido estudiado por su efecto en el cultivo de la lechuga y se ha encontrado que puede tener varios beneficios.

Uno de los efectos positivos del quitosán en la lechuga es su capacidad para estimular el crecimiento de las plantas. Se ha observado que la aplicación de quitosán en el suelo o como un recubrimiento en

las semillas puede promover el desarrollo de raíces más fuertes y un mayor crecimiento de las plántulas. Esto puede resultar en plantas de lechuga más saludables y vigorosas. Investigaciones indican que el quitosán puede aumentar la biomasa total de las plantas, con incrementos significativos en parámetros como la altura de la planta y el área foliar (Tae et al., 2021). Este crecimiento mejorado se atribuye a la activación de procesos fisiológicos y a la producción de fitohormonas.

Además, el quitosán puede tener propiedades antifúngicas y ayudar a proteger las plantas de lechuga contra enfermedades causadas por hongos. Al formar una barrera física en la superficie de las hojas, el quitosán puede dificultar la entrada de patógenos y reducir la incidencia de enfermedades fúngicas en los cultivos de lechuga (Raja et al., 2020).

Otro efecto del quitosán en la lechuga es su capacidad para mejorar la resistencia de las plantas al estrés abiótico, como la sequía o las altas temperaturas. Se ha observado que la aplicación de quitosán puede aumentar la tolerancia de las plantas de lechuga a estas condiciones adversas, lo que puede ser beneficioso en regiones con climas desafiantes. El quitosán también impacta la calidad de la lechuga. Las plantas tratadas con quitosán suelen tener un mayor contenido de compuestos bioactivos y antioxidantes, mejorando su valor nutricional (Rojas et al., 2020). Además, el quitosán puede prolongar la vida útil de la lechuga al mejorar su resistencia al deterioro, lo cual es crucial para el mercado de productos frescos.

Es importante tener en cuenta que los efectos del quitosán en la lechuga pueden depender de varios factores, como la dosis aplicada, el momento de la aplicación y las condiciones ambientales. Además, es necesario realizar más investigaciones para comprender completamente los mecanismos detrás de estos efectos y optimizar su aplicación en la producción de lechuga.

### **2.3 Generalidades de la lechuga *great lakes 118***

La lechuga Great Lakes 118 es una variedad de lechuga tipo cabeza, conocida por su robustez y adaptación a diversas condiciones de cultivo. Esta variedad es popular entre los agricultores debido a su capacidad para crecer en climas fríos y su resistencia a enfermedades (Davis et al., 2018).

#### **2.3.1 Botánica**

##### **2.3.1.1 Taxonomía de la lechuga**

La lechuga Great Lakes 118 pertenece a la especie *Lactuca sativa*, que a su vez se encuentra dentro de la familia *Asteraceae*. Esta familia incluye muchas otras plantas comestibles y ornamentales, como las margaritas y los girasoles. Dentro de la especie *Lactuca sativa*, existen numerosas variedades

cultivadas de lechuga, cada una con características específicas. A continuación, el fa figura 7 se presenta su clasificación taxonómica:



**Figura 7.** Clasificación taxonómica de la lechuga *Great Lakes 118* (Horton et al., 2019).

La lechuga *Great Lakes 118* se clasifica específicamente como una variedad de lechuga de tipo cabeza, caracterizada por formar un cabezal compacto y tierno. Esta variedad es conocida por su alta calidad y su resistencia al marchitamiento, lo que la convierte en una opción popular en el mercado de verduras frescas (Horton et al., 2019).

### 2.3.1.2 Morfología de la planta

La morfología de la lechuga Great Lakes 118 es fundamental para su desarrollo y adaptación a diferentes condiciones de cultivo. Esta variedad presenta características específicas en sus diferentes partes, siendo la raíz una de las más importantes para su crecimiento y salud general (ver figura 8).



**Figura 8.** Morfología de la lechuga Great Lakes 118.

#### 2.3.1.2.1 Raíz

La raíz de la lechuga Great Lakes 118 es predominantemente fibrosa, lo que le permite una rápida absorción de agua y nutrientes del suelo. Algunas características clave de la raíz incluyen:

##### Tipo de raíz

La lechuga presenta un sistema radicular superficial y extenso, que se extiende en las capas superiores del suelo. Esto le permite acceder a la humedad y nutrientes en la zona más fértil del sustrato (Santos et al., 2020).

##### Estructura

Las raíces son delgadas y numerosas, formando una red que ayuda a anclar la planta al suelo. Este sistema fibroso contribuye a una mejor estabilidad y resistencia a condiciones climáticas adversas (Hussain et al., 2021).

##### Función

La raíz es esencial para la absorción de agua y nutrientes. Además, juega un papel importante en la producción de fitohormonas que promueven el crecimiento, lo que es crucial para el desarrollo de la planta en sus etapas iniciales (Zhao et al., 2019).

## Adaptación

La capacidad de las raíces para expandirse rápidamente permite a la lechuga Great Lakes 118 adaptarse a diferentes tipos de suelo y condiciones climáticas, lo que es una ventaja en su cultivo (Santos et al., 2020).

### **2.3.1.2.2 Hojas**

Las hojas de la lechuga Great Lakes 118 son una de las características más distintivas de esta variedad, desempeñando un papel crucial en la fotosíntesis y en la calidad del producto final. A continuación se describen las principales características morfológicas de las hojas:

#### Forma y estructura

Las hojas son grandes, de forma ovalada a lanceolada, y tienen un borde ligeramente ondulado. Esta forma permite una amplia superficie para la captación de luz solar, esencial para la fotosíntesis, además, poseen una capa cerosa en la superficie, lo que les permite retener la humedad (Davis et al., 2018).

#### Textura

La superficie de las hojas es generalmente lisa y brillante, lo que no solo contribuye a la estética, sino que también puede ayudar a reducir la pérdida de agua. Además, la textura puede influir en la resistencia a plagas y enfermedades (Zhao et al., 2019).

#### Color

Las hojas de la lechuga Great Lakes 118 presentan un color verde intenso, que es indicativo de un alto contenido de clorofila. Este color es un factor importante en la percepción del consumidor y en el valor comercial del producto (Hussain et al., 2021).

#### Organización

Las hojas están organizadas en una roseta compacta, lo que permite que se formen cabezales densos. Este patrón de crecimiento es ventajoso para la producción, ya que facilita la cosecha y mejora la presentación del producto (Santos et al., 2020).

#### Función

Además de la fotosíntesis, las hojas también son responsables de la transpiración, que ayuda en la regulación de la temperatura de la planta y en la absorción de nutrientes a través del sistema radicular (Raja et al., 2020).

### **2.3.1.2.3 Tallo**

#### Estructura

El tallo de la lechuga Great Lakes 118 es generalmente corto y robusto, lo que permite una buena estabilidad a la planta. Esta estructura le ayuda a soportar el peso de las hojas y a mantener la roseta compacta. Además, el tallo tiene una textura lisa que puede variar en grosor según las condiciones de cultivo (Khan & Ali, 2019).

#### Función

El tallo cumple varias funciones importantes en la planta:

- Soporte: Proporciona un soporte físico para las hojas y el crecimiento de la planta, manteniendo la roseta en una posición adecuada para la captura de luz solar (Miller & Johnson, 2020).
- Transporte de Nutrientes: Actúa como un conducto para el transporte de agua y nutrientes desde las raíces hacia las hojas. Este proceso es vital para la fotosíntesis y el crecimiento general de la planta (Smith & Cramer, 2021).
- Almacenamiento: En algunas variedades, el tallo puede almacenar nutrientes y agua, lo que ayuda a la planta a sobrevivir en condiciones adversas.

#### Resistencia

El tallo de la Great Lakes 118 es resistente, lo que le permite soportar condiciones climáticas variables, incluyendo viento y lluvia. Esta resistencia es particularmente valiosa en la producción comercial, donde las plantas pueden estar expuestas a diferentes factores ambientales (Khan & Ali, 2019).

#### Variedades de crecimiento

Dependiendo de las condiciones de cultivo y manejo, el tallo puede presentar variaciones en su desarrollo. En entornos óptimos, el tallo tiende a ser más robusto y corto, mientras que en condiciones de estrés, puede alargarse en busca de más luz (Miller & Johnson, 2020).

#### **2.3.1.2.4 Inflorescencia**

La inflorescencia de la lechuga Great Lakes 118 es un aspecto importante de su ciclo de vida, aunque esta variedad se cultiva principalmente por sus hojas. De las características de la inflorescencia se encuentran:

##### Estructura de la inflorescencia

La inflorescencia de la lechuga Great Lakes 118 se presenta como un racimo, conocido como "capítulo", que se forma en la parte superior del tallo cuando la planta alcanza la madurez. Este capítulo está compuesto por numerosas pequeñas flores, generalmente de color amarillo pálido a blanco, que son típicas de las plantas de la familia Asteraceae, a la que pertenece la lechuga (Hwang & Kim, 2017).

##### Desarrollo

La inflorescencia comienza a formarse cuando la planta experimenta un proceso llamado "vernalización", que se activa por condiciones de luz y temperatura. Este proceso es crucial para la transición de la fase vegetativa a la fase reproductiva. A medida que la planta crece y se desarrolla, el tallo se alarga, lo que lleva a la aparición de la inflorescencia (Lutz & Albrecht, 2018).

##### Función

La principal función de la inflorescencia es la reproducción. Las flores son hermafroditas, lo que significa que contienen tanto órganos masculinos como femeninos, lo que permite la autopolinización. Sin embargo, la polinización cruzada también puede ocurrir a través de la acción de insectos como las abejas. Esto es fundamental para la producción de semillas, que son esenciales para la propagación de la especie (Pino & Manzano, 2020).

##### Consideraciones agronómicas

En el cultivo comercial de la lechuga, la formación de inflorescencias puede ser vista como un problema, ya que puede afectar la calidad de las hojas. La presencia de flores indica que la planta está en un estado de madurez y puede comenzar a desarrollar un sabor amargo, lo que disminuye su valor en el mercado. Por lo tanto, los productores suelen emplear técnicas de manejo para evitar la floración prematura, como el control de la temperatura y el riego adecuado.

### **2.3.1.2.5 Flores**

Las flores de la lechuga Great Lakes 118 son un componente crucial del ciclo de vida de la planta, aunque su desarrollo puede tener implicaciones en la calidad del producto final. A continuación, se detallan las características y funciones de las flores de esta variedad.

#### Estructura de las flores

Las flores de la lechuga Great Lakes 118 se organizan en capítulos, que son grupos de flores dispuestas en una inflorescencia. Cada capítulo contiene numerosas flores pequeñas que típicamente presentan un color amarillo pálido o blanco. Estas flores son hermafroditas, lo que significa que contienen tanto órganos reproductivos masculinos como femeninos, lo que facilita la polinización (Hwang & Kim, 2017).

#### Desarrollo y época de floración

La formación de flores en la lechuga Great Lakes 118 se activa principalmente por condiciones de luz y temperatura. Este proceso, conocido como vernalización, permite que la planta pase de la fase vegetativa a la fase reproductiva. La floración puede ser influenciada por factores ambientales como el fotoperiodo, y generalmente ocurre en climas más cálidos cuando las horas de luz son más prolongadas (Lutz & Albrecht, 2018).

#### Funciones de las flores

Las flores desempeñan funciones esenciales en el ciclo de vida de la lechuga:

- **Reproducción:** Las flores permiten la polinización y la producción de semillas. La polinización puede ser tanto autopolinización como cruzada, facilitada por insectos polinizadores (Pino & Manzano, 2020).
- **Generación de Semillas:** La formación de semillas es vital para la propagación de la especie, permitiendo que nuevas plantas crezcan en el futuro.

#### Consideraciones agronómicas

Desde una perspectiva comercial, la aparición de flores puede ser problemática. Las plantas que comienzan a florecer suelen experimentar un cambio en el sabor de las hojas, haciéndolas más amargas y menos atractivas para los consumidores. Por lo tanto, los cultivadores deben implementar

estrategias para minimizar la floración, tales como el control de la temperatura y el riego adecuado (Hwang & Kim, 2017).

#### **2.3.1.2.6 Fruto**

La lechuga Great Lakes 118 produce un tipo de fruto llamado aquenio. Estos aquenios son pequeñas semillas que se encuentran dentro de una estructura en forma de capítulo, que es lo que comúnmente conocemos como “cabeza” de lechuga. Estas semillas pueden ser utilizadas para la reproducción de la planta en futuros cultivos. El fruto de la lechuga es conocido como semilla y se le llama fruto seco. Este fruto es indehisciente, lo que significa que no se abre de forma natural, y tiene un vilano plumoso en su base que se desprende. Su tamaño no supera los 3 mm y puede ser de color blanco o negro. Según López (López, 1994), las semillas de lechuga tienen forma alargada, miden entre 4 y 5 mm, y presentan una coloración crema y castaña. Se estima que en 1 gramo de lechuga hay entre 1,000 y 1,200 semillas.

#### **2.3.1.3 Requerimientos edafoclimáticos**

##### **2.3.1.3.1 Clima**

La lechuga Great Lakes 118 prefiere un clima fresco y templado. Se adapta mejor a temperaturas moderadas y es sensible a las temperaturas extremas; temperaturas muy altas pueden inducir a la planta a florecer prematuramente, afectando la calidad de las hojas (Lutz & Albrecht, 2018).

##### **2.3.1.3.2 Temperatura**

La temperatura óptima para el desarrollo de la lechuga Great Lakes 118 se encuentra entre los 15°C y 20°C. Temperaturas superiores a 25°C pueden estresar a la planta, provocando un aumento en la tasa de floración y un cambio en el sabor de las hojas (Pino & Manzano, 2020), mientras que temperaturas más bajas pueden retrasar su crecimiento.

##### **2.3.1.3.3 Tipo de suelo**

Esta variedad de lechuga se desarrolla mejor en suelos que tengan una buena capacidad de drenaje y retención de humedad. Se requieren suelos ricos en materia orgánica y con un pH entre 6.0 y 7.0. Suelos arenosos o franco-arcillosos son ideales, ya que permiten un buen drenaje y aireación (Smith & Cramer, 2021).

##### **2.3.1.3.4 Tipo de riego**

La lechuga Great Lakes 118 requiere un suministro constante de agua para mantener el suelo húmedo, pero evitando el encharcamiento. El riego por goteo es el método más eficiente para el cultivo de

lechuga, ya que minimiza la pérdida de agua y reduce la humedad en las hojas, ayudando a prevenir enfermedades. Es importante mantener la humedad del suelo constante, evitando tanto el encharcamiento como la sequedad excesiva (Khan & Ali, 2019).

#### **2.3.1.3.5 Altura**

En cuanto a la altitud, la lechuga Great Lakes 118 no presenta restricciones significativas. Se adapta bien a diferentes altitudes, , preferentemente, la lechuga Great Lakes 118 se cultiva mejor en altitudes bajas a moderadas entre 0 y 1,500 metros sobre el nivel del mar. Aunque es importante tener en cuenta que a mayor altitud, las temperaturas suelen ser más bajas, por lo que, en altitudes más elevadas, las temperaturas más bajas pueden afectar el crecimiento y la calidad (Hwang & Kim, 2017).

#### **2.3.1.3.6 Humedad**

La humedad relativa óptima para el crecimiento de la lechuga se sitúa entre el 60% y el 80%. Niveles de humedad demasiado altos pueden favorecer el desarrollo de enfermedades fúngicas, mientras que niveles muy bajos pueden causar estrés hídrico (Lutz & Albrecht, 2018).

### **2.3.1.4 Forma de reproducción**

#### **2.3.1.4.1 Semilla**

La lechuga Great Lakes 118 se reproduce principalmente a través de semillas. La forma más común de propagar esta variedad es mediante la siembra de semillas en el suelo adecuado y proporcionando las condiciones óptimas de crecimiento. Las semillas pueden ser sembradas directamente en el campo o iniciarse en invernaderos antes de ser trasplantadas. La germinación ocurre mejor en condiciones de temperatura moderada y humedad adecuada (Pino & Manzano, 2020).

#### **2.3.1.5 Distribución en el mercado**

Esta variedad de lechuga es muy popular y ampliamente cultivada, por lo que su se distribuye ampliamente en mercados de todo el mundo, siendo popular en ensaladas y como guarnición. Su resistencia y calidad hacen que sea una opción favorita tanto para productores comerciales como para jardineros aficionados. La demanda de lechuga fresca ha ido en aumento debido a la creciente conciencia sobre la alimentación saludable (Hwang & Kim, 2017). Se realiza a través de diferentes canales:

- Mercados mayoristas: La lechuga Great Lakes 118 se distribuye a través de mercados mayoristas, donde los agricultores y productores venden sus cosechas a intermediarios o

distribuidores. Estos mercados suelen abastecer a supermercados, restaurantes y otros establecimientos de alimentos.

- Supermercados y tiendas de comestibles: Los supermercados y tiendas de comestibles son uno de los principales canales de distribución para la lechuga Great Lakes 118. Los agricultores y distribuidores venden sus productos directamente a estos establecimientos, donde los consumidores pueden adquirirlos fácilmente.
- Restaurantes y cafeterías: La lechuga Great Lakes 118 también se distribuye a través de proveedores de alimentos para restaurantes y cafeterías. Estos establecimientos suelen requerir grandes cantidades de lechuga para sus preparaciones y la adquieren a través de distribuidores especializados.
- Mercados locales y ferias agrícolas: En algunas regiones, la lechuga Great Lakes 118 se distribuye directamente a través de mercados locales y ferias agrícolas. Los agricultores venden sus productos directamente a los consumidores, lo que permite una conexión más directa y fresca garantizada.

### **2.3.2 Función especie – ecosistema**

La lechuga Great Lakes 118, al ser una especie vegetal, desempeña una función importante en el ecosistema. Como parte de la comunidad de plantas, la lechuga contribuye a la producción de oxígeno a través de la fotosíntesis, lo que es esencial para la vida en la Tierra. Además, las plantas, incluida la lechuga, desempeñan un papel crucial en la captura de dióxido de carbono y la reducción de los niveles de este gas de efecto invernadero en la atmósfera.

En el ecosistema, la lechuga también proporciona alimento y refugio para diversos organismos. Las hojas de la lechuga pueden ser consumidas por herbívoros, como insectos y ciertos mamíferos, que obtienen nutrientes de esta planta. A su vez, estos herbívoros pueden ser presa de otros organismos, como aves o depredadores más grandes, lo que contribuye a la cadena alimentaria y al equilibrio del ecosistema.

Además, la lechuga, al ser cultivada en sistemas agrícolas, puede tener un impacto en el ecosistema local. Dependiendo de las prácticas agrícolas utilizadas, como el uso de fertilizantes o pesticidas, puede haber efectos tanto positivos como negativos en la biodiversidad y la calidad del suelo y el agua (Khan & Ali, 2019)..

### **2.3.3 Estrés por salinidad en plantas de lechuga**

El estrés por salinidad en las plantas de lechuga Great Lakes 118 es un tema relevante en la investigación agrícola. La salinidad del suelo puede afectar negativamente el crecimiento y desarrollo de las plantas, incluida la lechuga. Cuando el suelo tiene altos niveles de sal, las plantas pueden experimentar estrés osmótico, lo que dificulta la absorción de agua y nutrientes.

#### **2.3.3.1 Mecanismos de respuesta al estrés por salinidad en la lechuga**

El estrés por salinidad puede provocar una serie de respuestas fisiológicas y bioquímicas en las plantas de lechuga Great Lakes 118. Estas respuestas incluyen:

1. Acumulación de solutos compatibles, como aminoácidos (prolina), azúcares solubles y glicerol, para contrarrestar el efecto osmótico de la sal. Además, las plantas pueden activar mecanismos de defensa antioxidante para protegerse del estrés oxidativo causado por la salinidad.
2. Estrés oxidativo induciendo la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS) como el peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ), que daña las membranas celulares y las proteínas. Sin embargo, las plantas de lechuga también incrementan la actividad de enzimas antioxidantes como la superóxido dismutasa (SOD), catalasa (CAT) y peroxidasa (POD), que ayudan a mitigar este daño (Munns & Tester, 2008).
3. Interferencia en el transporte iónico pues la salinidad altera la homeostasis iónica, aumentando la concentración de iones  $Na^+$  en las células vegetales y reduciendo la eficiencia de la absorción de nutrientes esenciales como  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$ . Esto afecta el funcionamiento de las bombas iónicas y los transportadores de membranas, lo que dificulta la absorción de agua y nutrientes (Schachtman et al., 2008).

#### **2.3.3.2 Efectos específicos de la salinidad en la lechuga**

##### Crecimiento y biomasa

Uno de los efectos más evidentes de la salinidad es la reducción en el crecimiento de las plantas. En la lechuga, este efecto se traduce en una reducción en el área foliar, la biomasa y la altura de las plantas. Estudios previos han demostrado que el crecimiento de las plantas de lechuga se ve afectado por la concentración de NaCl en el medio. La salinidad reduce la expansión de las células y, por ende, limita el crecimiento de las hojas (Hasegawa et al., 2000).

El daño al sistema radicular y la disminución en la capacidad de la planta para absorber agua y nutrientes también contribuyen a este fenómeno. Las plantas de lechuga sometidas a salinidad tienen raíces más pequeñas y menos eficientes para captar agua (Munns & Tester, 2008).

#### Contenido de clorofila

El contenido de clorofila en las hojas disminuye considerablemente bajo estrés salino. La clorofila es esencial para la fotosíntesis, y su disminución reduce la capacidad fotosintética de la planta, afectando su productividad (Munns, 2002). El estrés salino también puede dañar los cloroplastos y alterar las membranas celulares, lo que lleva a la reducción en la producción de clorofila.

Algunos estudios indican que, aunque el contenido de clorofila disminuye en respuesta a la salinidad, los mecanismos antioxidantes de la planta pueden compensar parcialmente este efecto (Hernández et al., 2000). No obstante, la pérdida de clorofila sigue siendo un indicio claro de los daños causados por el estrés salino.

#### **2.3.3.3 Métodos de cuantificación de estrés por salinidad**

El estrés por salinidad en la lechuga Great Lakes 118 puede ser evaluado cuantitativamente mediante diferentes parámetros y técnicas de medición. Algunas de las medidas cuantitativas utilizadas para evaluar el estrés por salinidad en las plantas de lechuga incluyen:

#### Indicadores fisiológicos

Uno de los indicadores más directos para cuantificar el impacto de la salinidad en la lechuga es la medición del crecimiento vegetal. La salinidad provoca una inhibición del crecimiento de la planta, que puede ser cuantificada mediante la evaluación de:

- Área foliar: el área de las hojas es un indicador crucial, ya que refleja la capacidad de la planta para realizar la fotosíntesis. La reducción en el área foliar debido al estrés salino es común.
- Biomasa fresca y seca: el peso de las raíces, el tallo y las hojas también se utiliza para evaluar el impacto de la salinidad en el crecimiento. Una disminución en la biomasa suele ser indicativa de estrés por salinidad.
- Altura de la planta: en condiciones de salinidad, la altura de la planta puede verse afectada, ya que las plantas destinan menos energía al crecimiento vertical debido a los efectos adversos de la sal.

- Contenido de clorofila: la clorofila es esencial para la fotosíntesis, y su disminución indica una respuesta negativa a condiciones de estrés. La salinidad puede dañar los cloroplastos, reduciendo la capacidad fotosintética de la planta.
- Medición de la conductividad eléctrica del suelo: la salinidad del suelo se puede determinar mediante la medición de la conductividad eléctrica del suelo. Esta medida se realiza utilizando un medidor de conductividad eléctrica, que proporciona un valor numérico que indica la concentración de sales en el suelo. Valores más altos de conductividad eléctrica indican una mayor salinidad del suelo.

#### Indicadores bioquímicos

- Prolina: la acumulación de este aminoácido en las plantas es considerada como un marcador bioquímico de adaptación al estrés osmótico, pues cumple roles importantes como osmorregulador, estabilizador de proteínas y protector antioxidante.
- Peróxido de hidrógeno: es un indicador de la acumulación de especies reactivas de oxígeno (ROS) en la planta, lo que ocurre en respuesta al estrés abiótico, incluida la salinidad. El  $H_2O_2$  actúa como un intermediario en el daño celular, y su acumulación puede llevar a la peroxidación lipídica y a la alteración de membranas celulares. Se cuantifica mediante un ensayo colorimétrico basado en la reacción con yoduro de potasio, que produce un cambio de color proporcional a la cantidad de  $H_2O_2$  presente en el extracto de planta.
- Contenido de  $Na^+$  y  $K^+$  en las plantas: la salinidad causa una acumulación de  $Na^+$  en las células vegetales, lo que interfiere con los procesos de transporte de nutrientes y el equilibrio osmótico, afectando el crecimiento de la planta. Los niveles de  $Na^+$  y  $K^+$  se determinan mediante espectrometría de absorción atómica (AAS) o cromatografía iónica.

#### Indicadores moleculares

- Expresión génica de proteínas asociadas al estrés: se pueden identificar genes involucrados en la tolerancia a la salinidad, como los que codifican para proteínas de choque térmico (HSPs), bombas de iones, y enzimas antioxidantes. La cuantificación de la expresión génica se realiza mediante qPCR (reacción en cadena de la polimerasa en tiempo real), que permite medir los niveles relativos de expresión de genes específicos en respuesta a la salinidad.

#### Indicadores visuales

- Índice de clorosis: es una evaluación visual del daño causado por la salinidad, especialmente en las hojas de la lechuga. La clorosis es un síntoma común que indica deficiencia de nutrientes y daño en los cloroplastos debido al estrés salino. Se evalúa la intensidad de la clorosis en una escala visual, y los resultados se correlacionan con mediciones de parámetros fisiológicos, como el contenido de clorofila.

#### **2.3.3.4 Métodos para mitigar el estrés por salinidad**

##### Uso de bioestimulantes

Una estrategia prometedora para mitigar los efectos del estrés salino en la lechuga es el uso de bioestimulantes, como la quitina y el quitosán. Estos compuestos, que provienen de residuos de la industria camaronera, han demostrado efectos positivos en la mejora del crecimiento y la tolerancia al estrés en varias especies vegetales.

La quitina y el quitosán actúan como inductores de resistencia al estrés, promoviendo la absorción de nutrientes, la mejora en la estructura de las raíces y la reducción de la acumulación de ROS. En el caso de la lechuga, estudios previos han mostrado que la aplicación foliar de estos compuestos mejora la biomasa, el crecimiento de las raíces y reduce el daño por estrés oxidativo (Ahgmed et al., 2023).

##### Manejo del Riego

El manejo del riego también es fundamental en el manejo del estrés por salinidad. Técnicas como el riego por goteo o el riego deficitario controlado permiten una distribución más eficiente del agua, reduciendo la exposición de las raíces a concentraciones elevadas de sales. Además, la fertilización adecuada con nutrientes como calcio y magnesio puede ayudar a las plantas a mantener un equilibrio iónico en las raíces y reducir los efectos negativos de la salinidad (Flowers & Colmer, 2008).

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 Selección de los residuos agroalimentarios

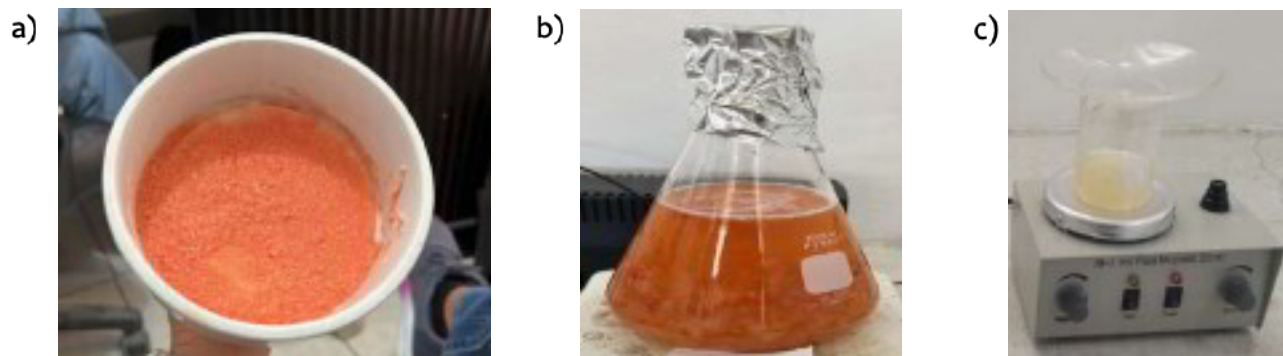
Se recolectó cáscara de camarón de residuos del restaurante marisquero “Los Jaibo’s”. Se maceró y tamizó en el Centro de Investigación en Química Aplicada. Se pesaron 10 g iniciales para evaluar su rendimiento (ver figura 9).



**Figura 9.** Macerado de cáscara de camarón.

#### 3.2 Extracción de quitina

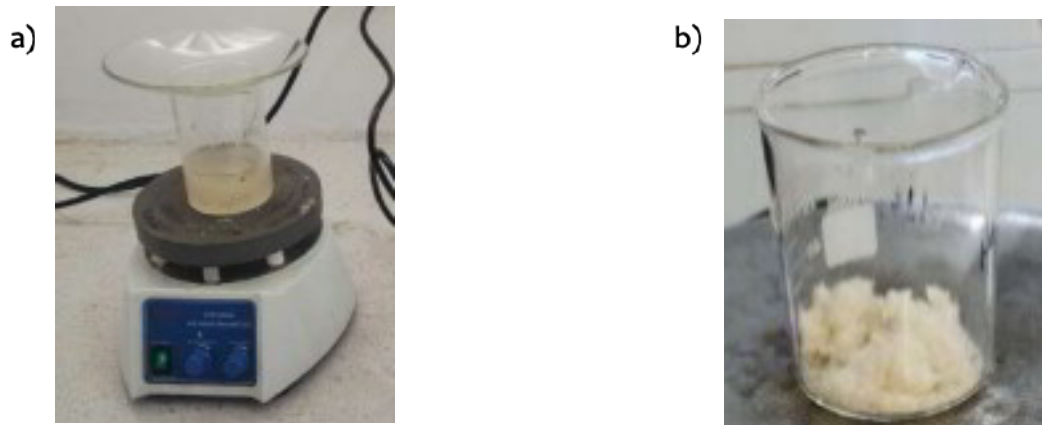
Para obtener quitosán a partir de residuos de camarón, se llevó a cabo un proceso donde, en primer lugar, se realizó el tratamiento del material crudo eliminando la parte carnosa del camarón, se lavó con detergente y se puso a secar en una estufa a 60°C durante 48 horas (ver figura 10a). Luego, se procedió a la desproteínización, donde se colocó la muestra en un matraz y se agitó con NaOH al 30% durante 24 horas a temperatura ambiente (ver figura 10b). Después se filtró y lavó la muestra con agua destilada 3 veces y se dejó secar a 60°C en estufa durante 48 horas, posteriormente, se realizó la desmineralización utilizando HCl al 5% a temperatura ambiente durante 1 hora. Se llevó a filtrar y a lavar nuevamente con agua destilada 3 veces, se secó nuevamente a 60°C en estufa durante 24 horas. A continuación, se llevó a cabo la despigmentación mediante el tratamiento de la muestra con etanol puro a 50°C durante 1 hora y posteriormente fue filtrado, lavado 3 veces y secado a 60°C durante 24 horas, obteniendo quitina (ver figura 10c).



**Figura 10.** Extracción de quitina: a) Tratamiento de material crudo; b) Desproteínización; c) Despigmentación.

### 3.3 Síntesis de quitosán

Para el proceso de desacetilación, donde la quitina obtenida se trató con NaOH al 30% a 100°C durante 3 horas (ver figura 11a). La muestra resultante se lavó con agua destilada 3 veces y se dejó secar nuevamente a 60°C en estufa por 24 horas para obtener el quitosán (ver figura 11b).



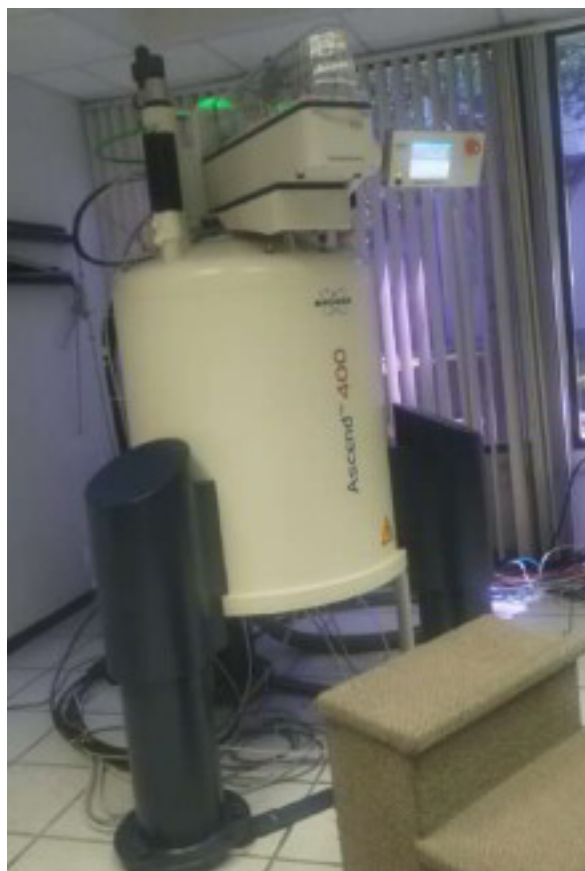
**Figura 11.** Transformación química de quitosán: a) Desacetilación; b) Obtención de quitosán.

### 3.4 Caracterización de la quitina y quitosán

Para la caracterización de ambos compuestos, quitina y quitosán, se llevaron a cabo análisis por espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) y por espectroscopía de resonancia magnética nuclear de protón ( $^1\text{H-RMN}$ ). Los análisis de FTIR se realizaron en un equipo Nicole Is10 modelo Thermo Fisher Scientific (ver figura 12). La toma de los datos se realizó con una escala de absorbancia desde 4000 hasta 600  $\text{cm}^{-1}$  del espectro electromagnético. Usando un detector DTGS KBr. Para procesar los espectros se utilizó el programa OMNIC. Los análisis se realizaron por duplicado. Para los análisis de  $^1\text{H-RMN}$  se utilizó un espectrómetro de resonancia magnética nuclear marca Bruker de 400 MHz (ver figura 13). La adquisición y el manejo de los datos se realizaron mediante el software TopSpin 3.6.2 y MestReNova 6.0.2 respectivamente. La muestra fue disuelta en agua deuterada ( $\text{D}_2\text{O}$ ) con ácido acético deuterado y colocada en tubos de cuarzo de 5 mm de diámetro, para posteriormente ser analizada a temperatura ambiente.



**Figura 12.** Equipo Nicole Is10 modelo Thermo Fisher Scientific usado para espectroscopía infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR).



**Figura 13.** Espectrómetro de resonancia magnética nuclear marca Bruker de 400 MHz usado para Resonancia Magnética Nuclear ( $^1\text{H}$ -RMN).

### 3.5 Cultivo de plantas de lechuga y estrés por salinidad

Para la obtención de las plántulas de lechuga, se preparó el sustrato en proporción 1:1 de perlita y peat moss, el cual se hidrató con agua de la llave y se colocó en charolas de germinación de poliestireno. Se añadieron dos semillas de lechuga Great lakes 118 en cada pocillo de la charola y se dejó en una cámara bioclimática a 20°C en oscuridad hasta su germinación, aproximadamente una semana (ver figura 14a). Una vez que las semillas han germinado, se trasladaron a una cámara fotosintética a 20°C. Cuando las plántulas presentaron tallos anchos y verdes, dos semanas después, se trasladaron a macetas de 1000 mL de poliestireno con perlita (ver figura 14b). De manera inmediata durante las siguientes dos semanas, se regaron y nutrieron diariamente con 100 mL de una solución Steiner al 25% ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ,  $4\text{H}_2\text{O}$  9mEq,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  1mEq,  $\text{MgSO}_4$ ,  $7\text{H}_2\text{O}$  4mEq,  $\text{KNO}_3$  3mEq,  $\text{K}_2\text{SO}_4$  3 mEq, Fe chelated 3 mgL<sup>-1</sup>,  $\text{H}_3\text{BO}_3$  0.5 mgL<sup>-1</sup>,  $\text{MnSO}_4$  0.7 mgL<sup>-1</sup>,  $\text{ZnSO}_4$  0.09 mgL<sup>-1</sup>,  $\text{CuSO}_4$  0.02 mgL<sup>-1</sup>), automatizada con pH 6.3 y una conductividad eléctrica de 2 dS/m. Transcurridas las dos semanas se sometieron las plantas a estrés salino con 100 mM de cloruro de sodio ( $\text{NaOH}$ ) en una sola aplicación y se dejó una semana, cuya conductividad eléctrica fue de 4 dS/m (ver figura 14c).



**Figura 14.** Cultivo de plantas de lechuga: a) Germinación de semilla; b) Plántulas con dos semanas de crecimiento; c) Sometimiento a estrés salino.

### 3.6 Tratamientos de los bioestimulantes

Se aplicaron los bioestimulantes de manera foliar de quitina y quitosán en cuatro concentraciones diferentes de cada uno (10, 50, 100 ppm), con su respectivo control sin bioestimulante, a un grupo de 10 plántulas por concentración, dando un total de 70 plántulas, una vez a la semana durante cuatro semanas (ver figura 15).



**Figura 15.** Aplicación foliar de tratamientos de los bioestimulantes de quitina y quitosán.

### 3.7 Variables del crecimiento

Se realizó un muestreo completamente al azar de 5 plantas por tratamiento de quitina y 5 plantas por tratamiento de quitosán, obteniendo 15 plantas de cada bioestimulante y 5 plantas del grupo control, es decir, 35 plantas, a las 9 semanas posterior del transplante para los análisis agrónomicos en los cuáles se consideraron: las mediciones del número de hojas que se realizó contando hoja por hoja de los extremos al centro; ancho de la hoja que se midió con una regla volumétrica en centímetros de una hoja al azar de extremo a extremo, así mismo, el largo medido desde el tallo; el área foliar calculada siendo el producto del ancho y largo de cada hoja medida. La biomasa fresca de hoja y raíz se obtuvieron con una báscula analítica Ohaus cuyo peso fue reportado en gramos; y la biomasa seca de las hojas y la raíz se obtuvo utilizando una estufa Lindberg/Blue M a 60° C durante 2 semanas, posteriormente se pesó en gramos utilizando la báscula analítica anteriormente mencionada. Así mismo, las hojas de las 5 plantas restantes de cada tratamiento, incluido el control, se colocaron en nitrógeno líquido para su posterior liofilización en el equipo Labconco Freezone 2.5 L. Una vez liofilizadas las hojas se maceraron hasta la obtención de polvo, y se realizaron 5 repeticiones por planta de 100 mg en tubos Eppendorf de cada tratamiento para los análisis bioquímicos, obteniendo 75 muestras de los tratamientos de quitina, 75 muestras de los tratamientos de quitosán y 25 muestras del grupo control, de los cuales se consideró la cuantificación de clorofilas y de prolina.

### 3.8 Variables bioquímicas

#### 3.8.1 Cuantificación de clorofilas

El contenido de clorofila en hoja previamente liofilizada se cuantificó mediante el método propuesto por Arnon (Arnon, 1939) modificado por Munira (Munira, 2015). Se pesaron 100 mg del material vegetal, se agregó 1.5 mL de acetona al 90% y homogenizó en vórtex, adicionalmente se le colocó 10 mg de carbonato de magnesio con el fin de proteger y estabilizar las clorofilas. Posteriormente se sonificó por 5 minutos y se centrifugó por 5 minutos a 10,000 rpm a 2°C y se extrajo el sobrenadante (ver figura 16).

Las clorofilas se cuantificaron leyendo las absorbancias de 663 y 645 nm en un espectrofotómetro, respectivamente. Se utilizó 90% de acetona como blanco. El contenido total de clorofila se expresó como  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ , y se determinó usando las siguientes fórmulas:

$$\text{Clorofila a } (\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}) = 25.38 \cdot A_{663} + 3.64 \cdot A_{645}$$

$$\text{Clorofila b } (\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}) = 30.38 \cdot A_{645} - 6.58 \cdot A_{663}$$

$$\text{Clorofila total } (\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}) = 18.8 \cdot A_{663} + 34.02 \cdot A_{645}$$



**Figura 16.** Extracción de clorofilas.

#### 3.8.2 Cuatificación de prolina

Se pesaron 100 mg de la muestra previamente liofilizada y se añadieron 2 mL de solución extractora de ácido sulfosalicílico 3% (p/v), posteriormente, se sometieron a vórtex durante 20 segundos y se sonicaron durante 60 segundos. Se colocó en centrifuga a 6,000 rpm durante 30 minutos a 10 °C.

Del sobrenadante se tomó 1 mL que se diluyó nuevamente a escala 1:10 con ácido sulfosalicílico 3% y se homogeneizó en vórtex por 20 seg. Se llevó a cabo la preparación de ninhidrina ácida, para la cual se calentó y mantuvo en agitación 2 g de ninhidrina en 3 mL de ácido acético glacial con 20 mL de acetona, 0.5 g de cloruro de cadmio y 75 mL de agua destilada, hasta que se homogeneizó. De la extracción de la muestra previamente diluida se añadió 1 mL de ninhidrina previamente preparada y se colocó en baño maría durante 3 minutos seguido de un baño de hielo por otros 3 minutos (ver figura 17). Las concentraciones se obtuvieron interpolando directamente en la curva de calibración y en unidades de mg prolina/ kg material vegetal seco (Bates, 1973). Los resultados y la construcción de los gráficos fueron realizados mediante el software Sigma plot 12.0, realizando un análisis de varianza ( $\alpha \leq 0.05$ ) así como una prueba de comparación medias LSD ( $\alpha \leq 0.05$ ).



**Figura 17.** Extracción de prolina.

### **3.9 Muestreo y análisis estadístico**

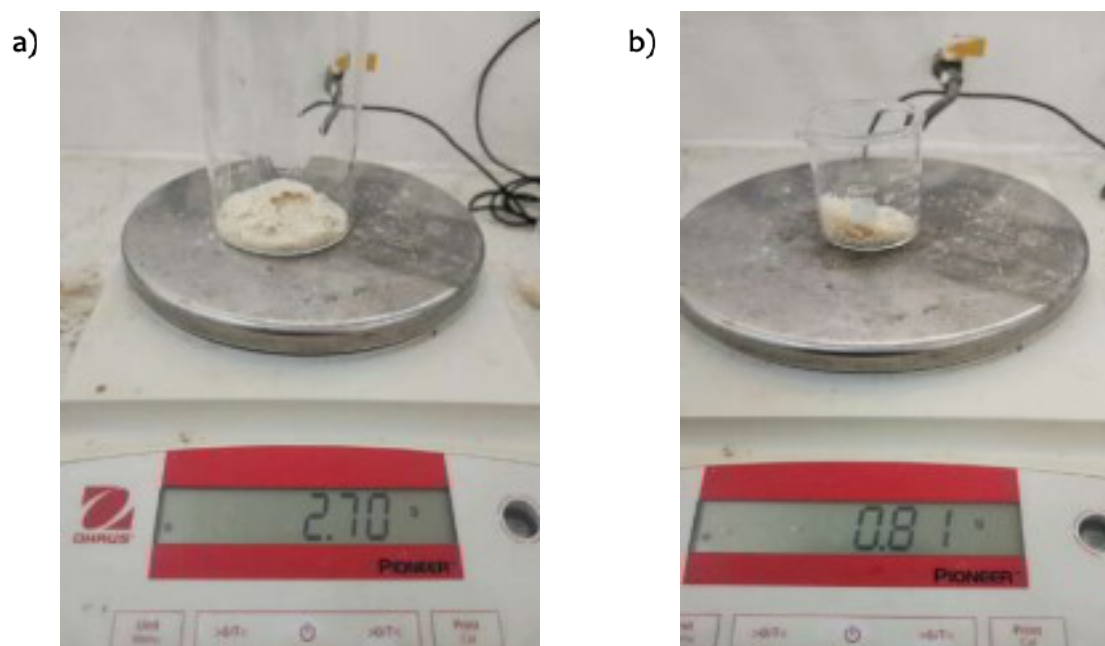
Se realizó un muestreo completamente al azar de las variables de crecimiento y de las variables bioquímicas y se llevó a cabo un análisis estadístico mediante el paquete estadístico Infosat Versión 2.10 (2017) realizando un análisis de varianza (ANOVA) y una prueba de medias (Análisis LSD Fisher alfa = 0.05).

## **4. RESULTADOS**

### **4.1 Rendimiento de los residuos agronómicos**

Se calculó el rendimiento porcentual de la quitina considerando los 10 g iniciales de la muestra de la cáscarilla de camarón (figura 18 a), en el cual se obtuvieron de 2.7 g de quitina, es decir, un 27% aproximadamente de rendimiento, del cual, se obtuvieron 0.8 g de quitosán sobre el gramaje de la

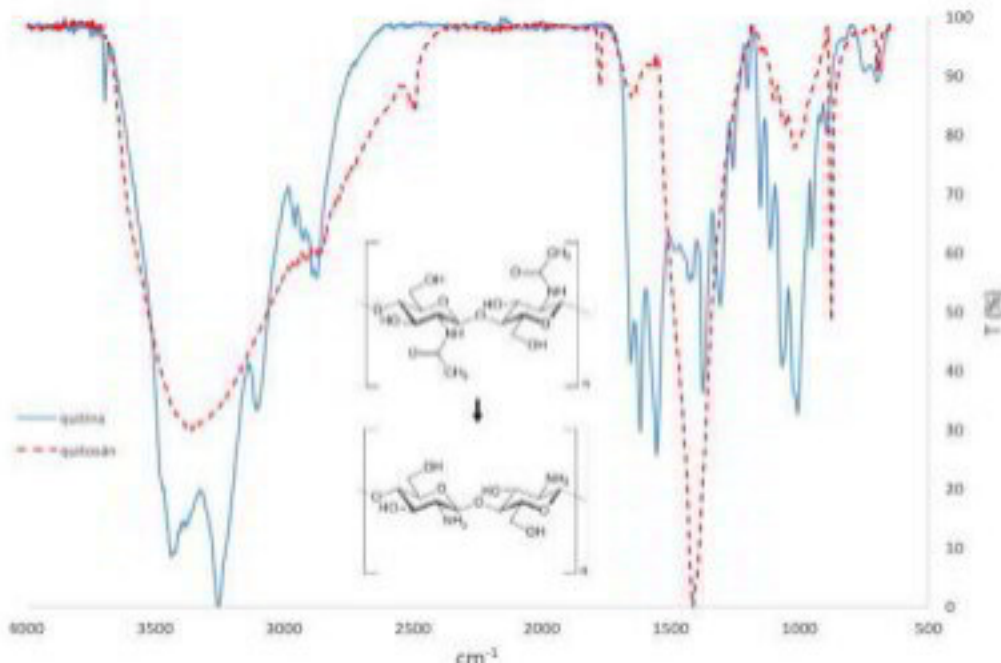
quitina, lo que indica un 29.6% de rendimiento sobre la quitina y un 8% de rendimiento sobre la muestra inicial de cascarilla (figura 18 b).



**Figura 18.** Rendimiento porcentual: a) Obtención del 27% de quitina sobre los residuos de cascarilla; b) Obtención del 29.6% de quitosán sobre la quitina.

#### 4.2 Espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier

El análisis por FTIR tanto de la quitina como del quitosán revela la presencia de varios grupos funcionales característicos de cada compuesto, que son fundamentales para su estructura química y propiedades. En la figura 19 se muestran ambos espectros traslapados para una mejor visualización de diferencia en señales antes y después del tratamiento de desacetilación.



**Figura 19.** Espectros traslapados de FTIR de quitina (azul) y quitosán (rojo).

A continuación, se describen los principales hallazgos de la figura comparando ambos espectros: en el espectro color azul correspondiente a la quitina se observó un pico intenso en aproximadamente  $1655\text{ cm}^{-1}$ , correspondiente a la vibración de estiramiento de la carbonilo ( $\text{C}=\text{O}$ ) de los grupos acetilamina presentes en la quitina. Además, se identificaron bandas en la región de  $3100\text{-}3500\text{ cm}^{-1}$ , que corresponden a las vibraciones de estiramiento de los enlaces  $\text{N-H}$ , indicando la presencia de los grupos acetilamina (grupos funcionales amida) en la estructura. Así mismo, se detectaron bandas anchas en la región de  $3200\text{-}3600\text{ cm}^{-1}$ , que son características de los grupos hidroxilo ( $-\text{OH}$ ). Estas bandas sugieren la existencia de interacciones de hidrógeno en la estructura de la quitina, lo que puede influir en sus propiedades físicas y mecánicas. De igual forma, los picos en torno a  $1000\text{-}1150\text{ cm}^{-1}$  fueron atribuidos a las vibraciones de estiramiento de los enlaces  $\text{C-O}$ , indicando la presencia de éteres y/o alcoholes en la composición de la quitina (ver estructura química de la quitina en la figura 19).

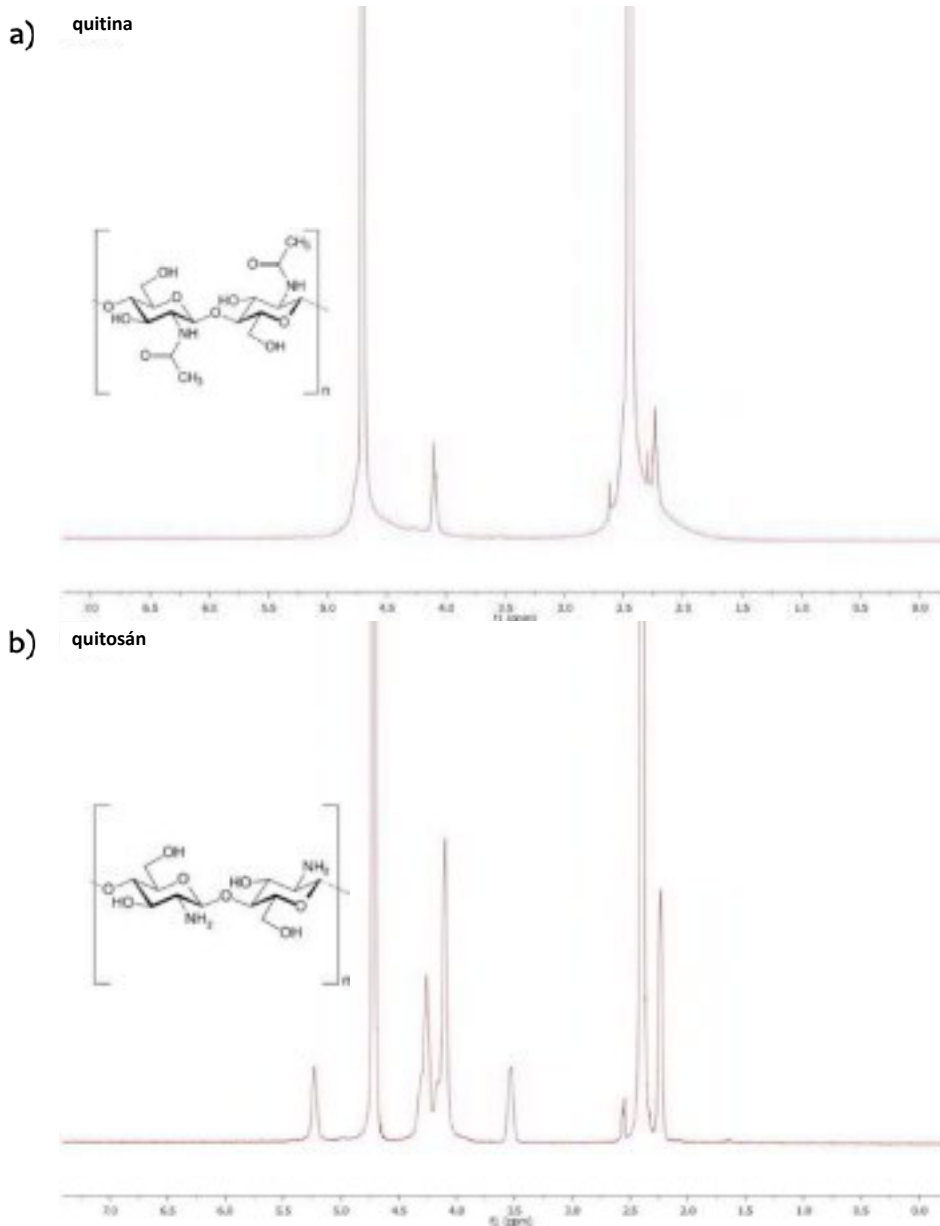
En comparación a la quitina, el quitosán muestra una disminución drástica en la intensidad de las bandas aproximadamente en  $1655\text{ cm}^{-1}$ , las cuales están asociadas a los grupos acetilamina, lo que indica una desacetilación importante, más no total, un proceso clave en la transformación de quitina a quitosán. Así mismo se observó un ensanchamiento en las bandas  $3100\text{ a }3600\text{ cm}^{-1}$  en la cual se ubican los enlaces  $\text{N-H}$  de los nuevos grupos amino primarios ( $\text{NH}_2$ ) presentes en la estructura del quitosán (ver estructura química del quitosán en la figura 19). Los resultados de este análisis están

en buen acuerdo con investigaciones previas reportadas en la literatura (O,Faix et al., 1991; Negrão et al., 2015; Kline et al., 2010).

Es decir, la principal diferencia observable en los espectros de FTIR de la quitina y el quitosán radica en las bandas de absorción asociadas a los grupos funcionales amina y amina. Estos cambios son un reflejo directo de la conversión del grupo N-acetilo de la quitina a un grupo amino primario en el quitosán.

#### **4.3 Espectroscopía por resonancia magnética nuclear de protón**

Los espectros obtenidos mediante resonancia magnética nuclear de protón ( $^1\text{H-NMR}$ ) a  $70\text{ }^\circ\text{C}$  en disolvente  $\text{D}_2\text{O}$ , correspondientes a las muestras identificadas de quitina (ver figura 20a) y quitosán (ver figura 20b), permitieron realizar una caracterización estructural comparativa entre ambos compuestos. El espectro correspondiente de quitosán presenta un mayor número de señales en la región de 3.0 a 45.5 ppm, la presencia de señales en la región del espectro comprendida entre 1.8 y 2.6 ppm sugiere la existencia de grupos metilo pertenecientes a residuos acetilados, lo cual indica que la quitina sufrió un grado de desacetilación parcial (no al 100%). Además, la mayor complejidad del espectro puede del quitosán (mayor número de señales) ser atribuida a una estructura más heterogénea, probablemente derivada de una mezcla de quitina y quitosán o a la presencia de impurezas estructurales residuales. La aparición de dos nuevas señales en el espectro correspondiente al quitosán son claves para la diferenciación de ambos compuestos, la señal que aparece en 3.5 ppm puede ser atribuida al protón ubicado en el carbono que contiene los grupos  $\text{NH}_2$ , y la señal que aparece en aproximadamente 5.2 ppm pudiera estar relacionada precisamente con los protones del grupo funcional amino primario del quitosán. Estas diferencias espectroscópicas son clave para evaluar la calidad del quitosán producido, ya que un mayor grado de desacetilación conlleva una mayor solubilidad en medios acuosos, mayor reactividad química y mejor desempeño en aplicaciones como bioestimulantes agrícolas, debido a su mayor disponibilidad de grupos funcionales amino primarios.



**Figura 20.** Espectros de  $^1\text{H-NMR}$ : a) Quitina; b) Quitosán.

#### 4.4 Respuesta de las plantas de lechuga al estrés salino

En la tabla 2 se puede apreciar que, en los tratamientos con quitina con 10 partes por millón (ppm) muestra un aumento de aproximadamente un 150% en el peso seco de la raíz (PSR) y un 18% en el peso fresco de la hoja de la lechuga (PFH) en comparación con el tratamiento control, sin embargo, el tratamiento con 50 ppm redujo el PFH, tentativamente, un 23%, mientras que el tratamiento con 100 ppm aumentó un 35% el PFH.

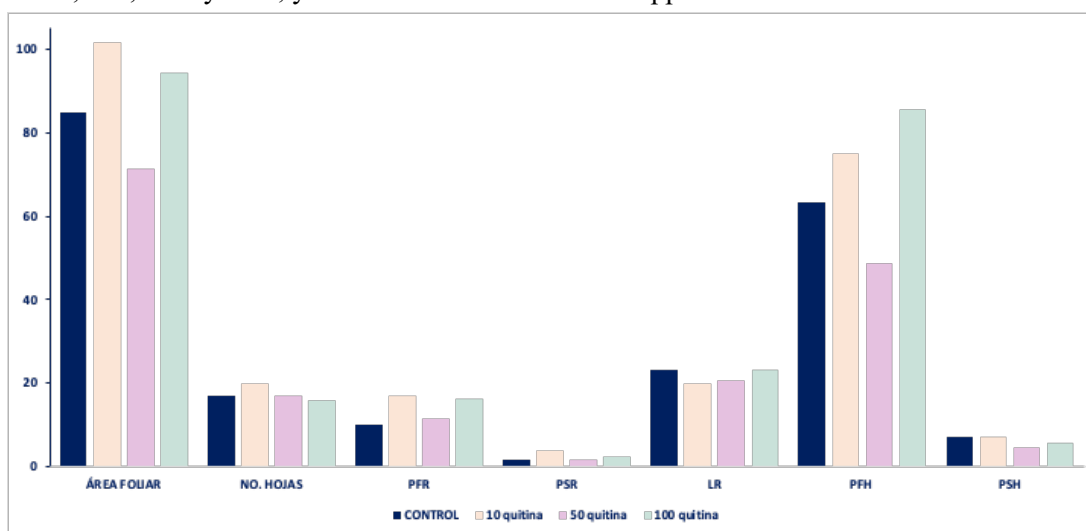
En cuanto a los tratamientos con quitosán, el primer tratamiento con 10 ppm mostró una comparación significativa del 145% de incremento del peso fresco de la raíz (PFR) a diferencia del control. El tratamiento con 50 ppm de quitosán no presentó cambios significativos en ningún factor agronómico de la planta. Sin embargo, el tratamiento con 100 ppm de quitosán exhibió un aumento aproximado del 15% en el PFH.

El análisis estadístico no arrojó diferencias significativas entre los tratamientos en comparación al control en el área foliar (AF), el número de hojas (NH), largo de raíz (LR) y peso seco de hoja (PSH).

**Tabla 2.** Factores agronómicos. Los datos en aumento se representan en color verde, mientras que los datos en rosa indican las disminuciones a comparación del control.

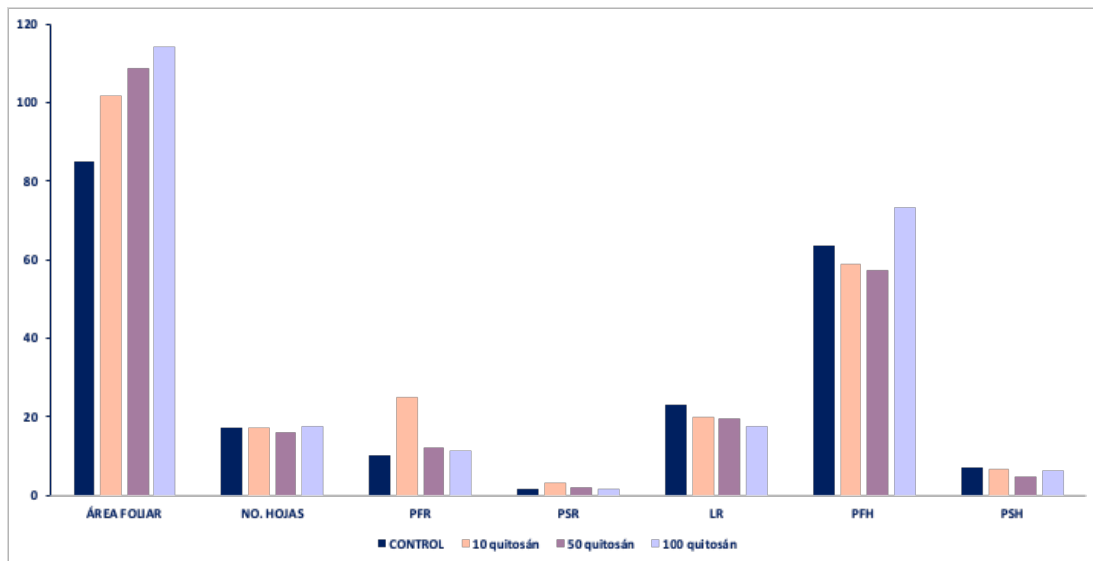
TRATAMIENTO	ÁREA FOLIAR	NO. HOJAS	PFR	PSR	LR	PFH	PSH
CONTROL	84.82 ab	17 ab	10.2 b	1.57 b	23 a	63.4 c	7.08 a
10 quitina	101.63 ab	20 a	17.1 ab	3.94 a	19.8 a	75.13 b	7.01 a
50 quitina	71.16 a	16.8 ab	11.51 b	1.53 b	20.6 a	48.8 d	4.69 a
100 quitina	94.25 ab	15.8 b	16.2 ab	2.52 ab	23 a	85.4 a	5.7 a
10 quitosán	101.63 ab	17 ab	25 a	3 ab	20 a	58.8 c	6.7 a
50 quitosán	108.7 ab	16.2 b	12.02 b	1.97 b	19.6 a	57.2 cd	4.6 a
100 quitosán	114.04 b	17.6 ab	11.31 b	1.75 b	17.4 a	73.2 b	6.08 a

En la gráfica 1 se aprecia la comparación de los tratamientos de quitina en sus diferentes concentraciones aplicados a los siete factores agronómicos estudiados, en la cual se puede observar una mejora considerable a comparación del control con la utilización de la concentración 10 ppm en el AF, NH, PFR y PSR, y con la concentración de 100 ppm en el PFH.



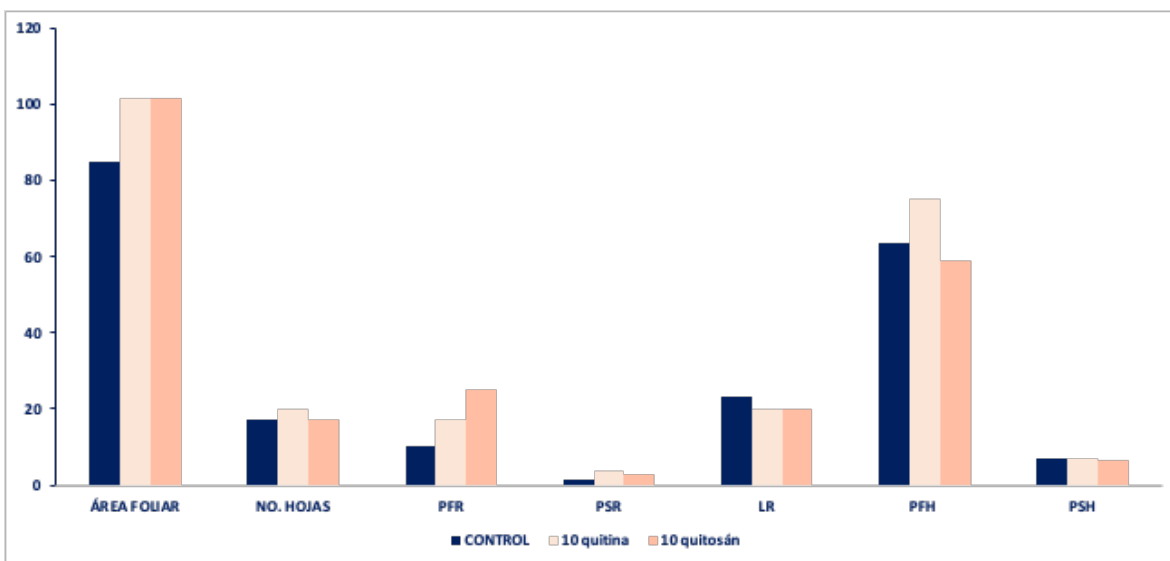
**Gráfica 1.** Comparativa de las distintas concentraciones de quitina en los factores agronómicos.

Así mismo, en la gráfica 2 se aprecia la comparación de los tratamientos de quitosán en sus diferentes concentraciones aplicados a los siete factores agronómicos estudiados, en la cual se puede observar una mejora considerable a comparación del control con la utilización de la concentración 10 ppm únicamente en el PFR y PSR, y con la concentración de 100 ppm en el AF, NH y PFH.



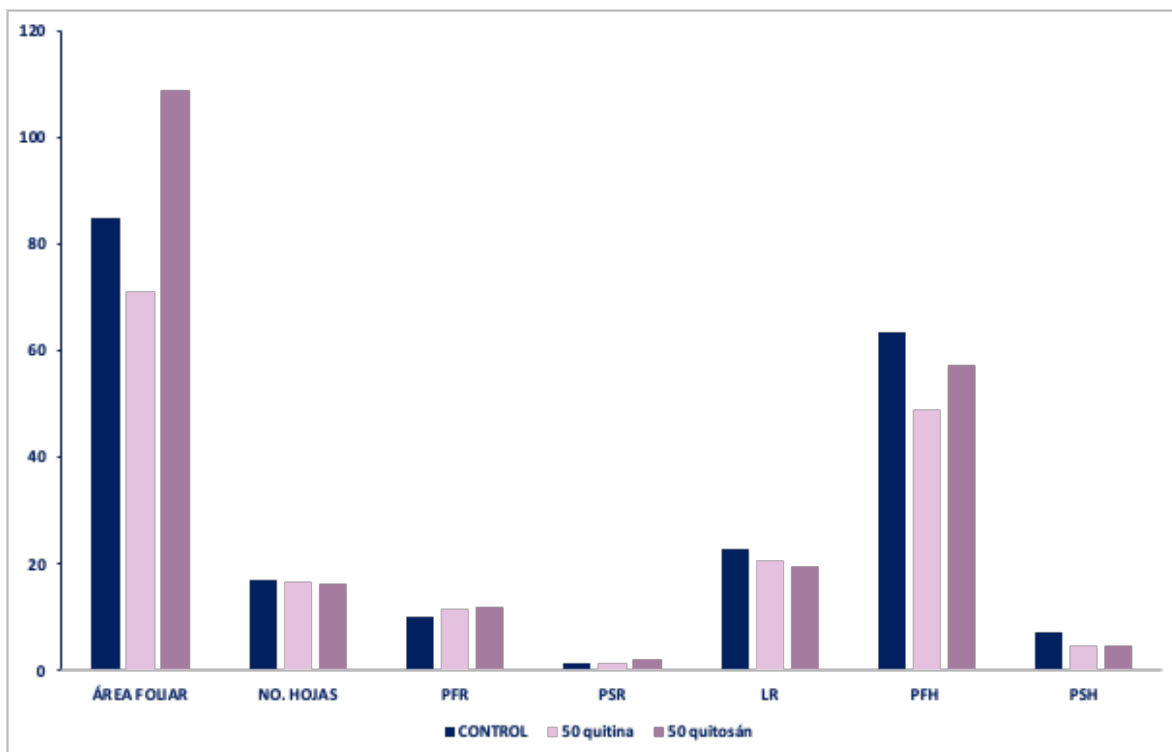
**Gráfica 2.** Comparativa de las distintas concentraciones de quitosán en los factores agronómicos.

Por otra parte, en la gráfica 3 se observa la comparativa del control y de ambos compuestos, quitina y quitosán, a una concentración de 10 ppm, en la cual se puede observar que en el AF el resultado de la mejora fue muy semejante, mientras que en el NH, PFH y PSR la aplicación de quitina aumentó sus valores, en cuanto al quitosán, únicamente aumentó el PFR.



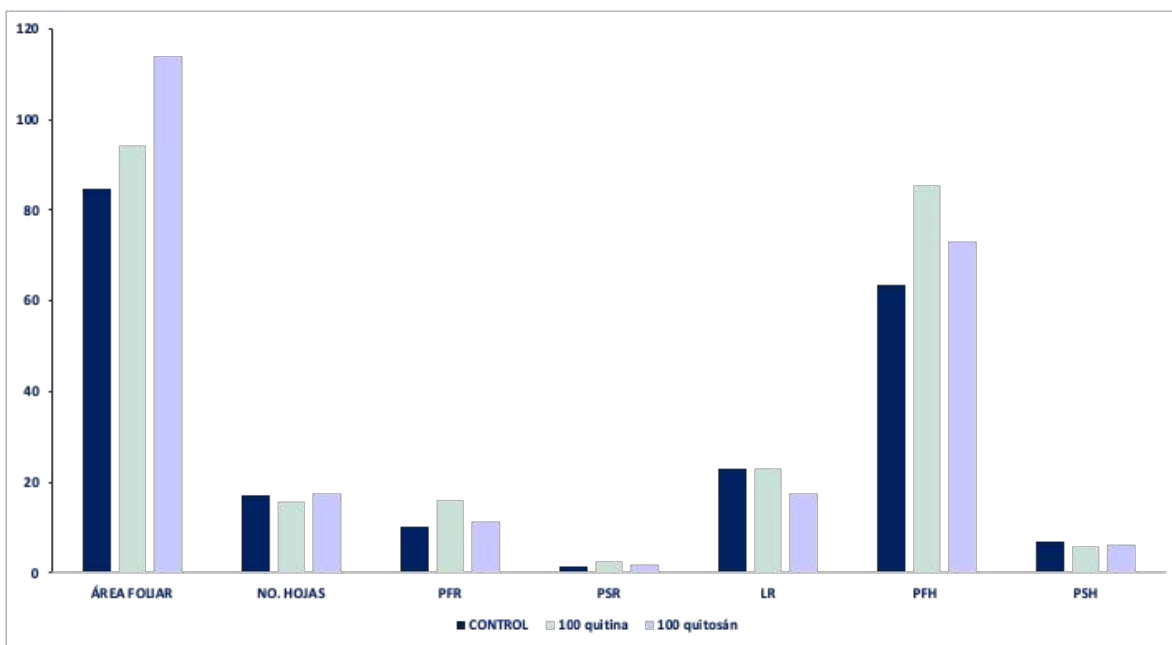
**Gráfica 3.** Comparativa del control con quitina y quitosán a 10 ppm, respectivamente.

La comparativa del control con quitina y quitosán a 50 ppm, como se puede observar en la gráfica 4, demuestra que, la quitina no favoreció significativamente ningún factor agronómico, no obstante, el quitosán permitió un aumento en el AF, el PFR y el PSR.



**Gráfica 4.** Comparativa del control con quitina y quitosán a 50 ppm, respectivamente.

En cuanto a la comparativa del control con quitina y quitosán a 100 ppm, como se puede observar en la gráfica 5, se demuestra que, la quitina favoreció el PFR, PSR y PFH, mientras que el quitosán permitió un aumento en el AF y el NH. Por lo que, los factores de LR y PSH no aumentaron sus valores con ningún bioestimulante.



**Gráfica 5.** Comparativa del control con quitina y quitosán a 100 ppm, respectivamente.

El análisis estadístico de la cuantificación de clorofila indica que no se encontraron diferencias significativas entre las medias de los tratamientos con quitosán, quitina y el grupo de control en clorofila alfa, beta y total, como se observa en la tabla 3.

**Tabla 3.** Cuantificación de clorofila.

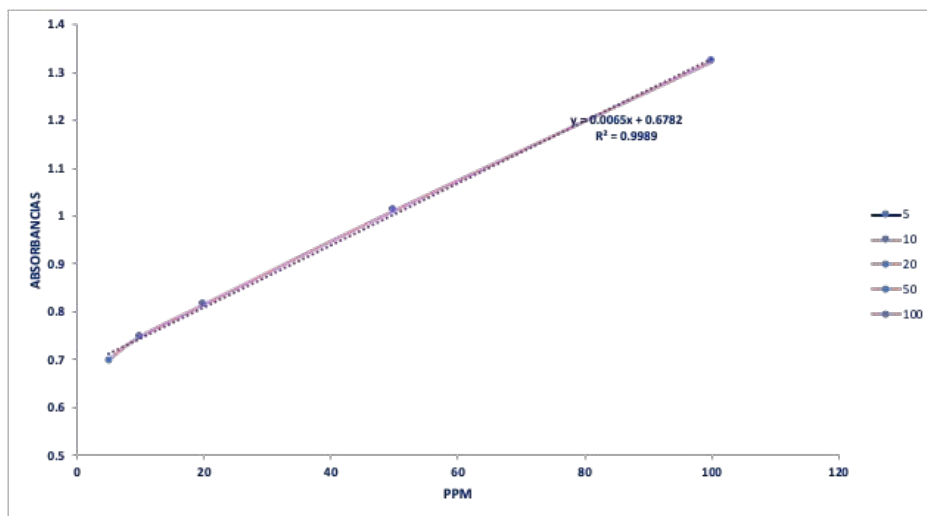
TRATAMIENTO	CLO A	CLO B	CLO T
<b>CONTROL</b>	93.53 a	82.59 a	176.12 a
<b>10 quitina</b>	91.75 a	78.11 a	169.86 a
<b>50 quitina</b>	93.48 a	82.15 a	175.62 a
<b>100 quitina</b>	93.38 a	82.75 a	176.13 a
<b>10 quitosán</b>	92.12 a	78.41 a	170.54 a
<b>50 quitosán</b>	92.75 a	81.05 a	173.8 a
<b>100 quitosán</b>	91.58 a	78.57 a	170.15 a

Por otro lado, en el análisis de la cuantificación de prolina se encontraron diferencias en distintos tratamientos de quitina y quitosán, principalmente, el tratamiento con 10 ppm de quitina presentó un descenso aproximado del 28.8% de prolina a comparación del grupo control, de igual forma el tratamiento con 100 ppm aumentó aproximadamente un 35.75% de prolina. Por otra parte, en el tratamiento con 10 ppm de quitosán se obtuvo una disminución del 52%, mientras que en los demás tratamientos no hubo diferencias significativas, como se aprecia en la tabla 4.

**Tabla 4.** Cuantificación de prolina. Los datos en verde representan los aumentos, mientras que los datos en rosa indican las disminuciones a comparación del control..

TRATAMIENTO	PRO
CONTROL	6.46 b
10 quitina	4.06 cd
50 quitina	7.01 ab
100 quitina	8.77 a
10 quitosán	3.07 d
50 quitosán	7.98 ab
100 quitosán	5.74 bc

En la gráfica 6 se puede observar la curva de calibración obtenida en la determinación de prolina, la cual mostró un comportamiento lineal con una excelente correlación entre la concentración de prolina (PPM) y la absorbancia medida por espectrofotometría, obteniendo un valor R2 de 0.9989, lo que indica que un 99.98% de la variación en las absorbancias puede explicarse por la concentración de prolina, evidenciando la precisión y confiabilidad del método utilizado. La pendiente positiva de la recta demuestra que a mayor concentración de prolina, mayor es la absorbancia registrada, permitiendo así cuantificar con exactitud el contenido de prolina en las muestras vegetales a partir de sus valores de absorbancia. Esta curva fue empleada como referencia para estimar la acumulación de prolina en los tratamientos evaluados bajo condiciones de estrés salino.



**Gráfica 6.** Curva de calibración de la determinación de prolina.

## 5. DISCUSIÓN

La utilización de residuos agroalimentarios en la producción de bioestimulantes representa una estrategia innovadora y sostenible que aborda dos problemáticas fundamentales: el manejo de residuos industriales y la mejora del rendimiento de cultivos bajo condiciones estresantes, en este caso particular, el estrés salino en plantas de lechuga. En esta tesis, se evaluó principalmente el rendimiento de los subproductos de la industria camaronera, particularmente las cáscaras de camarón, para obtener quitina y su derivado, el quitosán, que han mostrado propiedades bioestimulantes a factores de estrés en plantas.

El uso de estos compuestos no solo contribuye a la economía circular al valorizar residuos, sino que también presenta una alternativa viable para mitigar los efectos negativos del estrés abiótico en cultivos agrícolas. La salinidad es un factor limitante crucial para la agricultura, y estrategias que mejoren la tolerancia de las plantas a este estrés son de gran interés en la investigación agropecuaria.

### 5.1 Interpretación de los resultados obtenidos y su comparación con estudios previos

#### 5.1.1 Rendimiento de quitina y quitosán

La obtención de quitina de las cáscaras de camarón y su posterior conversión en quitosán mediante desacetilación se realizó de manera efectiva, en donde el rendimiento de quitina ronda el 27% sobre la materia prima, y el quitosán tuvo un rendimiento de 29% aproximado sobre la quitina y un 8% sobre la materia prima, por su parte, Hernández (Hernández et al., 2021) reportaron la obtención de quitina a partir de residuos de cáscara de camarón en México, mostrando la viabilidad de este proceso en términos de sostenibilidad, permitiendo destacar el potencial de los residuos agroalimentarios para obtener compuestos bioactivos como el quitosán; Xu et al. (Xu et al., 2017) obtuvieron un rendimiento en quitina del 22% mientras que para quitosán fue del 13%, utilizando métodos químicos similares en cáscara de camarón, de igual manera, Martínez et al. (Martínez, et al., 2018) realizaron un estudio en residuos de cangrejo en el cual obtuvieron un rendimiento del 16% quitina, lo que indica un buen porcentaje de rendimiento, validando la eficacia del método de extracción aplicado para la obtención de quitina y su conversión en quitosán, lo que se considera importante, pues, Rinaudo (Rinaudo, 2006) estudió la producción de quitosán a partir de quitina obtenida de diferentes fuentes animales, como cáscaras de camarón, y encontró que la química de la quitina obtenida puede variar significativamente dependiendo del proceso de extracción. Esto es consistente con los procedimientos de desacetilación aplicados en la presente tesis para convertir la quitina en quitosán.

La caracterización de estos productos mediante técnicas como FTIR y NMR permitió confirmar la estructura química esperada de la quitina y el quitosán, lo cual es esencial para garantizar la

funcionalidad de estos compuestos como bioestimulantes. Los espectros de FTIR indican la existencia de las bandas características de la quitina, las cuales son amida primaria (carbonilo) ( $\approx 1655 \text{ cm}^{-1}$ ) y amida secundaria ( $\approx 1550 \text{ cm}^{-1}$ ), mientras que en el quitosán se observó una disminución de estas bandas y un aumento en las señales de -OH y -NH<sub>2</sub> en las bandas ( $\approx 3100$  a  $3600 \text{ cm}^{-1}$ ) evidenciando la desacetilación y formación de quitosán posiblemente hidratado. Brugnerotto et al. (Brugnerotto et al., 2001) realizaron un estudio con análisis FTIR de quitosán con diferentes grados de desacetilación en el cual confirmaron que la banda en  $1650 \text{ cm}^{-1}$  de la quitina está asociada a las amidas, y que disminuye conforme al aumento del grado de desacetilación, además en dicho estudio se señaló la aparición de una banda alrededor de los  $3420 \text{ cm}^{-1}$  que asociaron a los grupos -OH y -NH<sub>2</sub>. También Vázquez et al (Vázquez et al., 2020) analizaron el proceso de desacetilación y confirmaron sus resultados con la técnica de FTIR, de igual manera usando residuos de mariscos, y obtuvieron una baja intensidad de la banda  $1650 \text{ cm}^{-1}$  para el quitosán y un incremento en la absorción en la región  $3400 \text{ cm}^{-1}$  donde mencionan que corresponde a los grupos -OH y -NH<sub>2</sub> introducidos durante la desacetilación.

Por otra parte, Lavertu et al. (Lavertu et al., 2003) validaron un método de <sup>1</sup>H-NMR, en el cual utilizaron quitosán con un grado de desacetilación que oscilaban entre 48% y 100%, y destacaron la capacidad de esta técnica para proporcionar información detallada sobre la estructura molecular del quitosano.

Además, la muestra etiquetada como quitosán presenta un mayor número de señales tanto en la región de 3.0 a 45.5 ppm como en la zona entre 1.8 y 2.6 ppm. La presencia de señales en esta última región sugiere la existencia todavía de grupos metilo pertenecientes a residuos acetilados, lo cual indica un menor grado de desacetilación parcial (no completa). Este perfil espectral más complejo puede atribuirse a una estructura más heterogénea, probablemente derivada de una mezcla de quitina y quitosán o a la presencia de impurezas estructurales residuales.

Estos resultados también se alinean con los reportados por de Oliveira et al. (Oliveira et al., 2014), quienes estudiaron la caracterización fisicoquímica de quitosán tratado térmicamente y obtenido por desacetilación alcalina. Utilizando <sup>1</sup>H-RMN, observaron que un aumento en el tratamiento térmico y alcalino conduce a un mayor grado de desacetilación, reflejado en la disminución de las señales correspondientes a los grupos acetilo en la región de 2.0 ppm aproximadamente.

### 5.1.2 Efecto bioestimulante en factores agronómicos

Jiménez et al. (Jiménez et al., 2012) evaluaron los efectos de quitosán en el crecimiento de lechuga bajo condiciones de estrés salino, y los resultados arrojaron que el quitosán en concentraciones de 50 y 100 ppm aumentó significativamente el área foliar y el peso fresco de la planta. No obstante, en dicho estudio también se reportó un incremento del crecimiento radicular, caso que no se observó en los resultados de la presente investigación, donde no se registraron diferencias significativas en el área foliar ni en el crecimiento de raíces. Sin embargo, el peso fresco de las plantas mostró cambios relevantes, mayormente en aumento, dado que las plantas tratadas con quitosán presentaron una mayor acumulación de biomasa en comparación con el control. Este incremento en el peso fresco podría atribuirse a una mejora en la retención de agua y en la integridad de las membranas celulares, promovida por el quitosán bajo condiciones de estrés salino. Además, el quitosán puede haber estimulado la producción de solutos compatibles como prolina y azúcares solubles, los cuales contribuyen a mantener el potencial hídrico celular y a reducir el daño por estrés osmótico. De igual forma, es posible que el quitosán haya activado mecanismos antioxidantes en las plantas, disminuyendo el daño oxidativo asociado al exceso de salinidad y favoreciendo la acumulación de biomasa en tejidos jóvenes. Estos resultados sugieren que, aunque no se observaron mejoras evidentes en el área foliar o en el sistema radicular, el tratamiento con quitosán fue efectivo para mitigar parcialmente los efectos negativos del estrés salino, fortaleciendo principalmente la masa vegetal aérea.

Otro estudio realizado en lechuga bajo estrés salino fue el de Jiang et al. (Jiang et al., 2015), donde los resultados mostraron que la aplicación de quitosán mejoró significativamente el crecimiento de la planta y la biomasa en comparación con el control. Por otra parte, Sánchez et al. (Sánchez et al., 2020) realizaron un estudio sobre el efecto de la quitina y el quitosán en pepino bajo estrés salino, informando que ambos compuestos aumentaron el crecimiento de la raíz, el área foliar y la biomasa. La capacidad de estos compuestos para estimular el crecimiento puede estar relacionada con la mejora en la absorción de agua y nutrientes, como se ha documentado en estudios de bioestimulantes basados en quitina y quitosán (Zhao et al., 2021). Así mismo, Miao et al. (Miao et al., 2019) también reportaron efectos bioestimulantes de la quitina y el quitosán en tomates bajo estrés salino. En su estudio, tanto la quitina como el quitosán promovieron un aumento del crecimiento y la producción de biomasa, aunque los efectos fueron más marcados en plantas tratadas con quitosán. Esto sugiere que los efectos de los bioestimulantes pueden depender del cultivo utilizado y de la concentración aplicada.

### 5.1.3 Contenido de clorofila en estrés salino

La clorofila es un indicador del estado fisiológico de las plantas dada su capacidad para realizar la fotosíntesis de manera eficiente. El estrés salino afecta el proceso fotosintético en las plantas, pues daña a las células fotosintéticas en su estructura, lo que disminuye su funcionalidad y rendimiento en la producción de clorofila, esto sucede pues las plantas sufren deshidratación debido a la incapacidad de las raíces para absorber agua de manera eficiente, lo que lleva a la reducción del contenido de clorofila, y por ende, aumenta la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS), que causan daño a las membranas celulares y los cloroplastos, mismas que se consideran estructuras indispensables en la fotosíntesis (Parida y Das, 2005). Este daño compromete la capacidad fotosintética de las plantas, lo que a su vez afecta su crecimiento y rendimiento. En los resultados obtenidos se observó un incremento en diversas variables agronómicas, tales como la biomasa, el peso fresco de raíz y el área foliar. No obstante, no se registraron diferencias significativas en los niveles de clorofila A, B ni total en comparación con el grupo control. Esto sugiere que, si bien la aplicación de quitina y quitosán puede ejercer efectos positivos sobre el crecimiento y la fisiología general de las plantas, su influencia directa sobre la biosíntesis de clorofila podría no ser tan marcada como en otros parámetros fisiológicos. De manera complementaria, Miao et al. (Miao et al., 2019) evaluaron el efecto de la aplicación de quitina y quitosán en plantas de tomate sometidas a estrés salino, observando un incremento en el contenido de clorofila, especialmente en aquellas tratadas con quitosán. Los autores atribuyen este efecto a la capacidad del quitosán para mitigar el estrés osmótico y mejorar la actividad antioxidante, lo cual favorece una mayor eficiencia fotosintética y, en consecuencia, una mayor síntesis de clorofila.

De igual forma, el estudio de Maruyama et al. (Maruyama et al., 2020) sobre espinacas bajo estrés salino mostró que la aplicación de quitina resultó en un incremento en los niveles de clorofila, aunque el efecto fue menos pronunciado que en otros parámetros fisiológicos, como el crecimiento radicular y la biomasa. Los autores sugirieron que, aunque la quitina mejoró la resiliencia general de las plantas, su efecto sobre la síntesis de clorofila no fue tan significativo como el de otros compuestos. Por lo que, la diferencia en los resultados podría deberse a factores experimentales, como el diseño experimental, la concentración de quitosán utilizada o las condiciones ambientales, además de que existen pocos estudios de la correlación entre la quitina y quitosán extraídos directamente de la cáscara de camarón y su efecto en las clorofilas de plantas de lechuga con estrés salino.

#### **5.1.4 Reducción de prolina y manejo de estrés salino**

La prolina es un metabolito clave en la respuesta de las plantas al estrés, y su acumulación es un indicador de adaptación a condiciones adversas. Los tratamientos con quitina y quitosán mostraron una disminución significativa en los niveles de prolina en las plantas, en comparación con el control, en el cual, los tratamientos con 10 ppm de quitina y quitosán disminuyeron un 28.8% y 52%, respectivamente, el nivel de prolina a comparación del control, en cambio, el tratamiento con 100 ppm de quitina aumentó un 35.75% el nivel de prolina. La reducción de prolina sugiere que estos compuestos pueden ayudar a las plantas a manejar el estrés por salinidad de manera más eficiente, posiblemente al promover la activación de mecanismos antioxidantes y la regulación osmótica, sin embargo, altas concentraciones de bioestimulante podrían afectar un correcto estímulo de la planta en su metabolismo, o bien, podrían limitar la eficiencia de absorción de agua y nutrientes, lo que no disminuiría la necesidad de las plantas de acumular prolina para mantener su homeostasis, otro caso factible para la reducción de prolina podría ser la actividad antioxidante de los bioestimulantes, puesto que éstos ayudan a mitigar el daño causado por las especies reactivas de oxígeno (ROS), permitiendo que las plantas mantengan una mayor salud celular (Alvarado et al., 2019). En el estudio realizado por Zhang et al. (Zhang et al., 2017) reportaron que la aplicación de quitosán en plantas bajo estrés salino redujo significativamente la acumulación de prolina, lo que sugiere que el quitosán puede regular la respuesta osmótica de las plantas, mejorando su capacidad para manejar el estrés salino. De igual manera, Sharma et al. (Sharma et al., 2018) también observó una reducción en los niveles de prolina en plantas tratadas con quitina y quitosán, lo que sugiere que estos bioestimulantes pueden ayudar a mitigar los efectos del estrés salino al promover una respuesta más equilibrada en la planta. Esta observación refuerza la idea de que la reducción de prolina podría ser un mecanismo insoslayable mediante el cual los bioestimulantes actúan sobre la resiliencia de las plantas bajo estrés.

### **5.2 Implicaciones y relevancia de los hallazgos**

#### **5.2.1 Implicaciones para la agricultura sostenible**

Uno de los aspectos más destacados de esta investigación de tesis es la utilización de residuos agroalimentarios para la obtención de quitina y quitosán, lo que representa un camino hacia una agricultura más sostenible. El uso de residuos alimentarios industriales como materia prima para producir bioestimulantes reduce la dependencia de productos químicos sintéticos, que pueden tener efectos adversos en el medio ambiente y la salud humana. Este hallazgo tiene varias implicaciones.

### **5.2.1.1 Reducción de residuos industriales**

La industria camaronera en México genera grandes cantidades de residuos, especialmente de cáscaras de camarón, que tradicionalmente son desechados o mal gestionados. La transformación de estos desechos en productos valiosos, como la quitina y el quitosán, contribuye a la economía y reduce la contaminación ambiental asociada con la acumulación de los mismos.

### **5.2.1.2 Alternativa natural a productos químicos**

Los resultados muestran que la aplicación de quitina y quitosán tiene efectos bioestimulantes significativos, lo que implica que estos compuestos pueden ser una alternativa natural y ecológica para promover el crecimiento vegetal, y poder reemplazar otras sustancias como fertilizantes sintéticos y agroquímicos que pueden dañar la biodiversidad y la salud del suelo.

## **5.2.2 Manejo del estrés salino en la agricultura**

El estrés por salinidad es uno de los principales problemas que afecta la producción agrícola en todo el mundo. El incremento de las concentraciones de sal en los suelos agrícolas, exacerbado por el cambio climático y las prácticas agrícolas intensivas, limita la disponibilidad de agua y nutrientes para las plantas, reduciendo su rendimiento. En este contexto, la capacidad de la quitina y el quitosán para mitigar los efectos negativos de la salinidad tiene importantes implicaciones.

### **5.2.2.1 Mejora de la tolerancia al estrés salino**

Los resultados de la tesis indican que la aplicación de quitina y quitosán mejora significativamente el crecimiento y la biomasa de las plantas de lechuga bajo estrés por salinidad. Esto sugiere que estos compuestos pueden actuar como bioestimulantes que aumentan la tolerancia de las plantas a condiciones adversas, mejorando su capacidad de absorción de agua y nutrientes, promoviendo así un crecimiento más saludable incluso en suelos salinos.

### **5.2.2.2 Reducción de los efectos del estrés osmótico**

El hallazgo de una reducción de prolina en las plantas tratadas con quitina y quitosán sugiere que estos compuestos pueden regular la respuesta osmótica en las plantas, reduciendo la acumulación excesiva de compuestos protectores como la prolina, lo que minimiza el daño celular. Esto tiene implicaciones específicas para optimizar el uso del agua en la agricultura, especialmente en regiones afectadas por la salinización de los suelos.

### **5.2.3 Relevancia económica y productividad agrícola**

La capacidad de la quitina y el quitosán para mejorar el rendimiento agrícola bajo condiciones de estrés salino tiene una gran relevancia económica, especialmente en cultivos de alto valor como la lechuga.

#### **5.2.3.1 Incremento en el rendimiento de cultivos**

El aumento en la biomasa y el peso fresco de las raíces observado en las plantas tratadas con quitina y quitosán podría traducirse en mejores rendimientos y una mayor producción de cultivos agrícolas. Esto es especialmente importante en un contexto de cambio climático y salinización de suelos, donde los agricultores enfrentan menores rendimientos debido a las condiciones adversas.

#### **5.2.3.2 Reducir el uso de insumos costosos**

Al reducir la necesidad de fertilizantes sintéticos y otros tratamientos químicos, los agricultores podrían reducir sus costos de producción, lo que aumentaría la rentabilidad de sus cultivos. Esto es particularmente beneficioso para los pequeños y medianos productores que luchan contra los altos costos asociados con los insumos agrícolas convencionales.

### **5.2.4 Implicaciones para la salud del suelo y la biodiversidad**

El uso de quitina y quitosán como bioestimulantes también tiene implicaciones importantes para la salud del suelo y la biodiversidad agrícola.

#### **5.2.4.1 Mejora de la salud del suelo**

El uso de bioestimulantes a partir de agroresiduos pueden favorecer la microbiota del suelo al promover el crecimiento de microorganismos benéficos, lo que mejora la fertilidad del suelo y la salud del ecosistema en general.

#### **5.2.4.2 Reducción de la dependencia de pesticidas**

Los compuestos de quitina y quitosán también han mostrado propiedades antimicrobianas y repelentes de plagas, lo que implica que su uso podría reducir la dependencia de pesticidas y otros productos químicos para el control de plagas, favoreciendo un método de cultivo más sostenible.

### **5.2.5 Implicaciones para el desarrollo de nuevas formulaciones y tecnologías agrícolas**

Los resultados presentados permiten el desarrollo de nuevas formulaciones y productos agrícolas que utilicen agroresiduos como ingredientes activos.

### **5.2.5.1 Bioestimulantes de liberación controlada**

El estudio de la concentración óptima y el modo de aplicación de quitina y quitosán podría llevar al desarrollo de productos más efectivos, como fertilizantes líquidos o sistemas de liberación controlada para aplicaciones foliares o en el suelo.

### **5.2.5.2 Productos innovadores para cultivos específicos**

Las propiedades bioestimulantes de la quitina y el quitosán pueden ser adaptadas para su uso en otros cultivos agrícolas, incluyendo hortalizas, frutales y plantas ornamentales, mejorando su tolerancia a condiciones de estrés y promoviendo su crecimiento saludable.

## **6. CONCLUSIONES**

### **6.1 Cumplimiento de los objetivos planteados**

En cuanto al cumplimiento de los objetivos específicos planteados:

- Se logró la extracción exitosa de quitina de las cáscaras de camarón y la síntesis de quitosán mediante desacetilación, confirmándose la viabilidad del proceso a través de los análisis estructurales (FTIR y NMR).
- Los efectos bioestimulantes de la quitina y el quitosán sobre el crecimiento de la lechuga sometida a estrés salino fueron evaluados con resultados positivos, evidenciando incrementos en la biomasa y el crecimiento de las raíces. Estos hallazgos demuestran que tanto la quitina como el quitosán pueden mejorar la resistencia de las plantas al estrés por salinidad.
- El análisis de prolina en las plantas mostró una reducción en su concentración en los tratamientos con quitina y quitosán, lo que indica que estos compuestos están ayudando a las plantas a manejar el estrés salino de manera más eficiente.

### **6.2 Aportes y limitaciones del estudio**

#### **6.2.1 Aportaciones del estudio**

La investigación sobre la producción de quitina y quitosán a partir de residuos agroalimentarios y su uso como bioestimulantes en la agricultura tiene varios aportes importantes:

- a. Aprovechamiento de residuos agroindustriales

Uno de los principales aportes de este estudio es el aprovechamiento de residuos agroindustriales, en particular de cáscaras de camarón, para la producción de quitina y quitosán. Esto no solo permite

reducir la cantidad de residuos generados por la industria camaronera, sino que también abre la puerta a la creación de productos de valor agregado que pueden ser utilizados en la agricultura.

b. Innovación en el uso de quitina y quitosán en agricultura

El estudio expande el conocimiento sobre el uso de la quitina y el quitosán como bioestimulantes en la agricultura, particularmente en la reducción del estrés salino en plantas. Los hallazgos evidencian que estos compuestos pueden ser utilizados para mejorar el crecimiento de plantas en suelos afectados por salinidad, lo que tiene importantes implicaciones para la agricultura en regiones áridas y semiáridas.

c. Contribución a la agricultura sostenible

Este estudio contribuye al concepto de agricultura sostenible al ofrecer una alternativa ecológica y económica a los fertilizantes sintéticos y productos químicos. Los resultados muestran que tanto la quitina como el quitosán pueden mejorar el rendimiento de los cultivos sin recurrir a métodos agresivos con el medio ambiente, lo que beneficia tanto a los agricultores como al entorno en general.

d. Impacto potencial en la productividad de cultivos

Los resultados muestran que la aplicación de quitina y quitosán en lechugas sometidas a estrés salino aumenta parámetros como el peso fresco de las raíces, la biomasa y el área foliar. Este tipo de investigación es crucial para mejorar la productividad de cultivos en condiciones adversas, lo cual puede tener implicaciones directas en mejorar la seguridad alimentaria en áreas afectadas por problemas de salinidad en los suelos.

e. Reducción de la prolina en condiciones de estrés

El hecho de que los tratamientos con quitina y quitosán reduzcan la concentración de prolina en las plantas sugiere que estos compuestos inciden en la modulación de la respuesta osmótica frente al estrés salino. Esta reducción de prolina es indicativa de una mejor adaptación celular y una respuesta más eficiente ante condiciones de estrés, lo que es clave para la mejora de la resistencia de las plantas.

## **6.2.2 Limitaciones**

Aunque la investigación presenta importantes contribuciones, también tiene algunas limitaciones que deben ser tomadas en cuenta para futuras investigaciones:

a. Alcance limitado a una especie de planta

Una de las principales limitaciones de este estudio es que se centró exclusivamente en la planta de lechuga Great Lakes 118 (*Lactuca sativa*) como modelo para evaluar los efectos de la quitina y el quitosán. Si bien los resultados son prometedores, el estudio no puede generalizarse a otros cultivos agrícolas, que podrían responder de manera diferente a estos bioestimulantes.

b. Restricción en la evaluación de parámetros fisiológicos

Aunque se evaluaron varios parámetros fisiológicos como la biomasa, el área foliar y la concentración de prolina, el estudio no profundizó en otros indicadores clave de la salud y el rendimiento de las plantas, como el contenido de nutrientes en las hojas, la actividad fotosintética o la salud microbiológica del suelo. La inclusión de estos parámetros adicionales permitiría una evaluación más exhaustiva de los efectos de la quitina y el quitosán en el crecimiento de las plantas.

c. Tiempo de evaluación

El tiempo de evaluación de los efectos de la quitina y el quitosán en las plantas de lechuga fue limitado, lo que podría haber influido en la observación de los efectos a largo plazo de estos compuestos. Los efectos bioestimulantes pueden ser más evidentes en condiciones prolongadas.

d. Evaluación limitada a condiciones controladas

El estudio se realizó bajo condiciones de laboratorio e invernadero, lo que no refleja completamente las condiciones reales de campo. Aunque los resultados obtenidos en condiciones controladas son valiosos, se recomienda realizar pruebas en condiciones de campo, donde las plantas estén expuestas a una mayor variabilidad climática y de suelo, para validar si los efectos de la quitina y el quitosán son igualmente efectivos en entornos agrícolas más complejos.

e. Falta de evaluación económica

El estudio no evaluó de manera directa el costo-beneficio de la aplicación de quitina y quitosán en los cultivos de lechuga. Aunque los efectos bioestimulantes son claros, se necesita una evaluación más detallada sobre el costo de producción de estos compuestos y los beneficios económicos asociados con su uso. Esto es especialmente relevante para determinar si estos productos son viables económicamente para los agricultores en comparación con otras alternativas convencionales.

f. Limitación en la diversidad de análisis moleculares

Aunque el estudio evaluó la concentración de prolina, un indicador insoslayable de estrés, se limitaron las mediciones a un solo marcador molecular. No se llevaron a cabo más análisis para generar un panel más amplio de marcadores moleculares asociados con el estrés salino, como antioxidantes, genes de estrés o enzimas relacionadas con el metabolismo.

## **7. RECOMENDACIONES**

### **7.1 Recomendaciones para futuras investigaciones**

A pesar de los resultados positivos obtenidos, existen varias áreas de mejora y oportunidades para futuras investigaciones:

- a. Explorar diferentes concentraciones y métodos de aplicación

Aunque en este estudio se evaluaron tres concentraciones de quitina y quitosán (10, 50 y 100 ppm), se recomienda investigar una gama más amplia de concentraciones y modos de aplicación (por ejemplo, aplicaciones en el suelo y en semillas) para determinar las dosis óptimas que maximicen el efecto bioestimulante sin causar efectos adversos.

- b. Evaluar la eficacia en otros cultivos

Se recomienda realizar estudios similares en otros cultivos de interés agrícola, como tomate, pepino o pimientos, para determinar si los efectos positivos observados en la lechuga también se aplican a otros cultivos susceptibles al estrés salino.

- c. Investigar la interacción con otros bioestimulantes

Sería útil explorar la sinergia entre quitina y quitosán con otros bioestimulantes naturales, como ácidos húmicos, lignina o extractos vegetales, para evaluar si existe un efecto potenciador en la mejora de la resistencia al estrés y el rendimiento de los cultivos.

- d. Estudios a largo plazo

Se recomienda realizar investigaciones más prolongadas en el tiempo para evaluar los efectos a largo plazo de la aplicación de quitina y quitosán, en particular en cuanto a su influencia sobre la salud del suelo y la biodiversidad microbiana.

## **7.2 Aplicaciones prácticas y potenciales usos de la quitina como bioestimulante**

La quitina, como biomaterial obtenido de residuos agroindustriales como las cáscaras de camarón, tiene una amplia gama de aplicaciones prácticas en diversos campos, sin embargo, en su uso como bioestimulante en la agricultura se puede aplicar para:

1. Bioestimulante para la mejora del crecimiento de plantas: Como se observó en este estudio, la aplicación de quitina mejora el crecimiento de las plantas bajo condiciones de estrés salino, se podría aplicar a cultivos sensibles a la salinidad o aquellos que experimentan estrés por sequías o temperaturas extremas.
2. Fortalecimiento de las defensas naturales de las plantas: La quitina puede inducir la síntesis de quimiofactores y fitohormonas, tales como el ácido salicílico o jasmonato, que ayudan a las plantas a resistir plagas y enfermedades. Su uso podría ser fundamental en la reducción de pesticidas y fertilizantes químicos, contribuyendo a una agricultura más sostenible.
3. Fomento del desarrollo radicular: Se ha demostrado que la quitina mejora la formación de raíces en diversas especies de plantas. Esto podría ser beneficioso en suelos de mala calidad o compactados, donde la capacidad de las plantas para absorber nutrientes y agua se ve afectada.
4. Mejora de la absorción de nutrientes: En plantas sometidas a condiciones adversas, como la salinidad, la quitina podría mejorar la absorción de nutrientes esenciales, lo que se traduciría en un aumento del rendimiento agrícola en condiciones de estrés.
5. Eliminación de metales pesados: La quitina puede adsorber metales como plomo, cadmio y mercurio, ayudando a purificar suelos y aguas contaminadas en áreas industriales o mineras.
6. Biorremediación de compuestos orgánicos: La quitina también ha mostrado potencial en la eliminación de contaminantes orgánicos en ambientes acuáticos o terrestres. Esto se debe a su estructura química que permite la captura de sustancias contaminantes, actuando como una especie de “esponja” natural.
7. Control de la contaminación microbiológica: Dado que la quitina tiene propiedades antimicrobianas, podría utilizarse para controlar la proliferación de patógenos en áreas contaminadas o en suelos agrícolas afectados por patógenos específicos.

## **7.3 Aplicaciones prácticas y potenciales usos del quitosán como bioestimulante**

Los resultados de esta tesis potencian algunas posibilidades de aplicación práctica para el uso del quitosán en la agricultura:

1. Uso en la agricultura de precisión: El quitosán puede ser integrado en productos agrícolas como fertilizantes líquidos o microcápsulas de liberación controlada, lo que permitiría a los agricultores aplicar cantidades precisas de bioestimulantes a sus cultivos. Este enfoque optimiza el uso de insumos y mejora la eficiencia del agua en condiciones de estrés.
2. Cultivos en condiciones de estrés salino: Dado que la salinización de los suelos es un problema creciente, el uso de quitosán como bioestimulante podría aplicarse a grandes áreas agrícolas afectadas por la salinidad, ayudando a incrementar la productividad de los cultivos en regiones áridas y semiáridas.
3. Reducción de pesticidas y fertilizantes químicos: El uso de quitosán podría contribuir a reducir la dependencia de pesticidas y fertilizantes químicos, mejorando la sostenibilidad de las prácticas agrícolas y promoviendo el uso de tecnologías más ecológicas.
4. Industria alimentaria: Además de su uso agrícola, el quitosán tiene aplicaciones potenciales en la industria alimentaria como conservante natural y biopolímero. Las propiedades antimicrobianas del quitosán podrían extender la vida útil de los productos agrícolas y alimenticios.
5. Bioremediación: Debido a sus propiedades adsorbentes, el quitosán también puede ser utilizado en procesos de bioremediación para eliminación de contaminantes en ambientes marinos o terrestres, lo que abre un área de aplicación en la limpieza ambiental.

## **8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Abdel-Mawgoud, A. M. R., Tantawy, A. S., El-Nemr, M. A., y Sassine, Y. N. (2010). Growth and yield responses of strawberry plants to chitosan application. *European Journal of Scientific Research*, 39(1), 170-177. <https://doi.org/10.29133/yyutbd.777105>
- Ahmed, M. A. I., Ebrahim, N. E. S., & Mohamed, G. Z. (2023). Effect of water stress and foliar application of chitosan and glycine betaine on lettuce (*Lactuca sativa*) growth, yield, quality, and water use efficiency. *Scientific Reports*, 13, 17274. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-43992-0>
- Alvarado, P., Rodríguez, J., & Martínez, J. (2019). Quitina como fuente de bioestimulantes para la agricultura: un estudio sobre la producción de quitosán. *Marine Biotechnology*, 21(1), 77-84. DOI: 10.1007/s10126-018-9862-9.
- Ambati, R., S.-M. Phang, S. Ravi y R. Aswathanarayana (2014), “Astaxanthin: Sources, Extraction, Stability, Biological Activities and Its Commercial Applications—A Review”, *Marine Drugs*, 12(1):128.

- Angulo, M. (2008). Lettuce production. Retrieved from [http:// www.monografias.com/trabajos58/produccion-lechuga/produccion-](http://www.monografias.com/trabajos58/produccion-lechuga/produccion-).
- Arnon, D. I. (1939). Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology*, 14, 1–15.
- Bautista-Baños, S., Ventura-Aguilar, R. I., Correa-Pacheco, Z., y Corona-Rangel, M. L. (2017). Quitosano: un polisacárido antimicrobiano versátil para frutas y hortalizas en poscosecha- una revisión. *Revista Chapingo. Serie horticultura*, 23(2), 103-122. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2016.11.030>
- Brimport, J. (2016). Recuperado el 15 de junio del 2016 disponible en línea en [http://brimportseed.com/variedadsemillas.htm?Lechuga\\_escarola & VARC=%2031](http://brimportseed.com/variedadsemillas.htm?Lechuga_escarola & VARC=%2031)
- Brito, D., Acosta, C., & Zamora, S. (2018). Sustainability in shrimp farming: A review of the environmental impact and potential solutions. *Aquaculture*, 493, 121-133.
- Brugnerotto, J., Lizardi, J., Goycoolea, F. M., Argüelles-Monal, W., Desbrières, J., & Rinaudo, M. (2001). An infrared investigation in relation with chitin and chitosan characterization. *Carbohydrate Polymers*, 46(2), 87–96.
- Campos-Rodríguez, T., De-La-Cruz-Ochoa, M. M., & del Ángel-Pérez, J. L. (2021). Obtención y caracterización de quitosana mineralizada a partir de residuos de camarón. *Ambiens Techné et Scientia México*, 9(1), 67-75.
- Carrasco, G., & Sandoval, C. (2015). *Manual práctico del cultivo de la lechuga* Ediciones Mundiprensa, España
- Comisión Nacional de Acuicultura y Pesca (CONAPESCA). (2021). Informe de producción acuícola en México. Recuperado de [sitio web de CONAPESCA].
- Davis, A. R., et al. (2018). Vegetable Production and Practices. *Horticultural Reviews*, 46, 1-38. <https://doi.org/10.1002/9781119480362.ch1>
- Davis, J., Smith, L., & Johnson, R. (2018). *Plant Physiology and Photosynthesis: Understanding the Process*. New York: Academic Press.
- El Ghachtouli, N., et al. (2016). Chitosan and its derivatives: A review of their applications in agriculture and food science. *Advances in Biology and Chemistry*, 6(4), 199-217. <https://doi.org/10.4236/abc.2016.64017>
- El-Beltagi, H. S., & Mohamed, H. I. (2013). Chitosan as a bio-stimulant in agriculture: A review. *International Journal of Advanced Research*, 1(6), 311–319.
- Faix, O. (1991). Classification of lignins from different botanical origins by FT-IR spectroscopy. *Holzforschung*, 45(suppl), 21–27.

- Falcón, M. A., et al. (2015). Aplicación de quitosano incrementa la emergencia, crecimiento y rendimiento de plántulas de tomate. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 38(3), 213-219.
- FAO (2021), *The State of World Fisheries and Aquaculture 2021*, Roma, FAO. Disponible en: <http://www.fao.org/documents/card/en/c/19540EN>.
- Flowers, T. J., & Colmer, T. D. (2008). Salinity tolerance in plants: The importance of an integrated approach to stress tolerance. *Environmental and Experimental Botany*, 59(1), 21-29. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2005.08.005>
- Gómez, J., M. M. Calvo, I. Álvarez-Acero, P. Montero y M. C. Gómez-Guillén (2017), “Characterization and storage stability of astaxanthin esters, fatty acid profile and  $\alpha$ -tocopherol of lipid extract from shrimp (*L. vannamei*) waste with potential applications as food ingredient”, *Food Chemistry*, 216:37-44.
- González, J. A., Ortega, C., & Lizarazo, M. (2019). Environmental impacts of shrimp farming in Latin America: A review. *Environmental Management*, 63(5), 777-789.
- Granval, N., & Gaviola, J. (1991). *Lechuga: Manual de semillas hortícolas*. Ediciones Mundiprensa. España, Barcelona.
- Hamed, I., Özogul, F., & Regenstein, J. M. (2016). Industrial applications of crustacean by-products (chitin, chitosan, and chitooligosaccharides): A review. *Trends in Food Science & Technology*, 48, 40–50. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.11.007>
- Hasegawa, P. M., Bressan, R. A., Zhu, J. K., & Bonetta, D. (2000). Plant cellular and molecular responses to high salinity. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 51, 463-499. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.51.1.463>
- Hernández-Núñez, C. M. (2008). Utilización de residuos de cáscara de camarón para la obtención de quitina y quitosano. *Avances en Investigación Agropecuaria*, 12(2), 659-666.
- Hernández, J. A., et al. (2000). Antioxidant systems and O<sub>2</sub>-/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> production in leaves of pea plants subjected to salinity. *Plant Science*, 151(1), 57-65. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(99\)00374-2](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(99)00374-2)
- Hernández, J. M., López, J. M., & Rodríguez, F. (2021). Valorization of shrimp shells for chitin and chitosan production in Mexico: Environmental and economic considerations. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(7), 750. <https://doi.org/10.3390/jmse9070750>.
- Horton, D., et al. (2019). Lettuce: Production and Cultivation. *The Vegetable Production Guide for Eastern North Carolina*. North Carolina Cooperative Extension. <https://content.ces.ncsu.edu/vegetable-production-guide>
- Hussain, A., Khan, M., & Ali, Z. (2021). "The Role of Leaf Color in Consumer Perception and Market Value of Lettuce". *HortScience*, 56(7), 860-865.

- Hussain, N., et al. (2021). Morphological and physiological responses of lettuce to drought stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, 160, 193-202. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.01.002>
- Hwang, H., & Kim, K. (2017). Flowering behavior and its impact on leaf quality in lettuce. *Scientia Horticulturae*, 225, 55-62. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.07.008>
- Jiang, Y., Zhang, J., & Zhang, X. (2015). Effect of chitosan on growth, physiological characteristics, and chlorophyll content of lettuce under salt stress. *Plant Growth Regulation*, 75(2), 341-349. <https://doi.org/10.1007/s10725-015-0083-9>.
- Jiménez, E. A., Rodríguez, H., & Sánchez, M. J. (2012). Efecto del quitosán como bioestimulante en el crecimiento de lechuga bajo condiciones de salinidad. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 12(4), 292-300.
- Khan, A., & Ali, M. (2019). Structural characteristics of lettuce stems: Implications for growth and development. *Horticulture Research*, 6(1), 1-10. <https://doi.org/10.1038/s41438-019-0123-4>
- Kline, P., Martin, D., & Zhao, Q. (2010). FTIR analysis of chitosan derivatives: evidence of amide I attenuation and NH<sub>2</sub> band formation. *Journal of Molecular Structure*, 976(1-3), 123-130.
- Lárez-Velásquez, J. (2008). Algunas potencialidades de la quitina y el quitosano para usos en la agricultura en Latinoamérica. *Revista UDO Agrícola*, 8(1), 1-22.
- Lavertu, M., et al. (2003). A validated <sup>1</sup>H NMR method for the determination of the degree of deacetylation of chitosan. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 32(6), 1149-1158. [https://doi.org/10.1016/S0731-7085\(03\)00155-9](https://doi.org/10.1016/S0731-7085(03)00155-9)
- Li, K., Xing, R., Liu, S., y Li, P. (2020). Chitin and chitosan fragments responsible for plant elicitor and growth stimulator. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(44), 12203-12211.
- Lopez-Moya, F., Suarez-Fernandez, M., y Lopez-Llorca, L. V. (2019). Molecular mechanisms of chitosan interactions with fungi and plants. *International journal of molecular sciences*, 20(2), 332.
- López, J. A., Mendoza, M. E., & Garza, E. (2018). Chemical composition and potential uses of shrimp shell waste. *Waste Management*, 72, 217-224.
- López, M. (1994) *Horticultura.*, México Trelles 1994.
- Lutz, J., & Albrecht, M. (2018). The influence of temperature and light on the bolting of lettuce. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, 93(2), 145-150. <https://doi.org/10.1080/14620316.2018.1432050>

- Malca, G. (2001). Seminario de agronegocios, lechugas hidropónicas Lima, Perú, Universidad del Pacífico. 96 p. Disponible en [www.upbusiness.net](http://www.upbusiness.net)
- Martínez, G., & Jara, R. (2019). Efecto del quitosán en el crecimiento y resistencia al estrés salino en plantas. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 19(2), 533-540.
- Martínez, L. A., et al. (2018). Extracción de quitina a partir de residuos de cangrejo y rendimiento del proceso. *Revista de Biotecnología Marina*, 34(1), 45–52.
- Maruyama, T., Saito, T., & Sakai, N. (2020). Effect of chitin on spinach growth and chlorophyll synthesis under salt stress conditions. *Scientia Horticulturae*, 265, 109182. doi: 10.1016/j.scienta.2019.109182.
- Miao, L., Wang, Y., & Liu, Z. (2019). Chitin and chitosan improve tomato growth and chlorophyll content under saline conditions. *Environmental and Experimental Botany*, 165, 52-61. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2019.05.004>.
- Miller, R., & Johnson, T. (2020). Water and nutrient transport in lettuce: The role of the stem. *Journal of Agricultural Science*, 158(2), 211-220. <https://doi.org/10.1017/S0021859620000453>
- Mohammed, M. M., Hassan, A. M., & El-Kady, M. F. (2019). Chitosan and its derivatives: Applications in agriculture. *Agronomy*, 9(11), 703.
- Munira, S. (2015). Modificación del método de Arnon para cuantificación de clorofila en hojas liofilizadas. *Revista de Botánica Aplicada*, 22(2), 112–118.
- Munns, R. (2002). Comparative physiology of salt and water stress. *Plant, Cell & Environment*, 25(2), 239-250. <https://doi.org/10.1046/j.0016-8025.2001.00808>
- Munns, R., & Tester, M. (2008). Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology*, 59, 651-681. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911>
- Negrão, R., Dias, J., & Silva, B. (2015). Characterization of cross-linked chitosan/bentonite composite by FT-IR, SEM and XRD. *International Journal of Biological Macromolecules*, 72, 1129–1135.
- Oliveira, J. E., et al. (2014). Physicochemical Characterization of Thermally Treated Chitosans and Chitosans Obtained by Alkaline Deacetylation. *International Journal of Polymer Science*, 2014, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2014/853572>
- Parida, A. K., & Das, A. B. (2005). Salt tolerance and salinity effects on plants: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 60(3), 324-349. doi: 10.1016/j.ecoenv.2004.06.010.
- Pino, J.A., & Manzano, R. (2020). Pollination and seed production in lettuce: Implications for cultivation. *Horticultural Reviews*, 48, 1-26. <https://doi.org/10.1002/9781119526000.ch1>

- Puglisi, O., & Cattaneo, V. (2018). Chitin-induced disease resistance in plants: A review. *Plant Physiology and Biochemistry*, 126, 45–58.
- Raja, A. A., et al. (2020). Chitosan enhances growth and disease resistance in lettuce. *Horticultural Science*, 47(2), 188-194. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI14636-19>
- Raja, K., Singh, S., & Kumar, V. (2020). "Transpiration and Nutrient Uptake in Lettuce: An Overview". *Journal of Plant Nutrition*, 43(8), 1183-1195.
- Rinaudo, M. (2006). Chitin and chitosan: Properties and applications. *Progress in Polymer Science*, 31(7), 603-632. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2006.06.001>
- Rodríguez-Santesteban, N., López González, L., & Jiménez Hernández, J. (2024). Efecto bioestimulante de digestato y microorganismos eficientes sobre *Lactuca sativa* en suelo con y sin salinidad. *Revista Centro Azúcar*, 51(3), e1075.
- Rojas, E., Morales, J. A., & Ochoa, J. (2020). Chitosan as a biostimulant: Effects on plant growth and resistance to salinity stress. *Journal of Plant Growth Regulation*, 39(4), 1212-1223.
- Rojas, M., et al. (2020). Bioestimulantes y su impacto en la agricultura sostenible. *Revista de Ciencias Agrícolas*.
- Sánchez, F., Pérez, R., & Ramos, J. T. (2020). Efecto de quitina y quitosán sobre el crecimiento de pepino bajo condiciones de salinidad. *Horticultura Internacional*, 28(1), 45-56. DOI: 10.1016/j.hortint.2019.11.004.
- Sang, Y., et al. (2021). Recent advances in the applications of chitin and chitosan. *Food Hydrocolloids*, 115, 106644. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106644>
- Sang, Y., Wang, C., & Hu, Y. (2021). Utilization of shrimp shell waste for carotenoid extraction and its potential health benefits. *Journal of Food Science and Technology*, 58(7), 2500-2511.
- Santos, F. A., et al. (2020). Root system architecture of lettuce: Implications for cultivation practices. *Agronomy Journal*, 112(3), 1220-1230. <https://doi.org/10.1002/agj2.20149>
- Santos, R., Ferreira, M., & Costa, P. (2020). "Growth Patterns in Lettuce: Implications for Yield and Quality". *International Journal of Vegetable Science*, 26(1), 43-55.
- Schachtman, D. P., & Munns, R. (2008). Salinity tolerance: Insights from plants and genes. *Trends in Plant Science*, 13(2), 66-71. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2007.11.006>
- Sharma, S. P., & Yadav, S. (2018).\* Chitosan and its role in improving the salt stress tolerance of crops: A review. *Agricultural Science Research Journal*, 8(3), 45-53.

- Smith, L., & Cramer, C. (2021). *Plant growth and development: An overview of stem functions*. New York, NY: Springer.
- Tae, S. H., et al. (2021). Effects of chitosan on growth and antioxidant activity of lettuce. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 69(20), 5770-5778. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c00567>
- Terry-Alfonso, E., Ruiz Padrón, J., & Tejeda Peraza, T. (2011). Respuesta del cultivo de la lechuga (*Lactuca sativa L.*) a la aplicación de diferentes productos bioactivos. *Cultivos Tropicales*, 32(1), 55-60
- Theodoracopoulos, M., Lardizabal, R. & Arias, A. (2009). *Manual de Producción de Lechuga*. Tegusigalpa Honduras. [SEP]
- Vargas, M., Albors, A., Chiralt, A., & González-Martínez, C. (2009). Characterization of chitosan–oleic acid composite films. *Food Hydrocolloids*, 23(3), 536–547. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2008.06.019>
- Vázquez, C., & Rojas, A. (2020). Utilización de residuos agroindustriales en la producción de bioestimulantes: una revisión. *Journal of Agroecology*, 6(1), 42–52.
- Xu, L., Yang, J., & Jiang, Z. (2017). Extraction of chitin and chitosan from shrimp shells and their application in agriculture. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 65(29), 6216–6224.
- Zhang, Z., Wang, L., & Sun, R. (2017). Effects of chitosan on physiological changes in plants under salt stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, 115, 58-65. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.03.003>.
- Zhao, H., et al. (2019). The role of root development in plant growth and nutrient acquisition. *Journal of Experimental Botany*, 70(4), 1069-1082. <https://doi.org/10.1093/jxb/ery490>
- Zhao, H., Wang, Y., & Liu, J. (2019). "Surface Texture and Its Effects on Pest Resistance in Lettuce". *Journal of Agricultural Science*, 157(3), 200-210.
- Zhao, X., He, Y., & Zhou, Y. (2021). Chitosan as a natural biostimulant for enhancing plant growth and resistance to abiotic stress: A review. *Frontiers in Plant Science*, 12, 742717.
- Zhao, X., Zhang, Y., & Wang, X. (2011). The nutritional value of shrimp shell and its potential as a food source. *Journal of Nutritional Science*, 36(2), 100-104.

