



# COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO EN EDAFOLOGÍA

## EFFECTO DEL CLORURO DE LANTANO EN EL CRECIMIENTO, DESARROLLO Y CALIDAD DE LECHUGA (*Lactuca sativa* L.) EN UN SISTEMA DE RAÍZ FLOTANTE

GUADALUPE CONTRERAS MARTÍNEZ

T E S I S  
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

2021

La presente tesis titulada: **EFFECTO DEL CLORURO DE LANTANO EN EL CRECIMIENTO, DESARROLLO Y CALIDAD DE LECHUGA (*Lactuca sativa* L.) EN UN SISTEMA DE RAÍZ FLOTANTE**, realizada por la alumna: **Guadalupe Contreras Martínez**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS  
EDAFOLOGÍA

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO

Dr. Ernesto Gabriel Alcántar González

ASESORA

Dra. Libia Iris Trejo Téllez

ASESOR

Dr. Fernando Carlos Gómez Merino

ASESORA

Dra. María Guadalupe Peralta Sánchez

Montecillo, Texcoco, Estado de México, noviembre de 2021.

# EFFECTO DEL CLORURO DE LANTANO EN EL CRECIMIENTO, DESARROLLO Y CALIDAD DE LECHUGA (*Lactuca sativa* L.) EN UN SISTEMA DE RAÍZ FLOTANTE

Guadalupe Contreras Martínez, M. C.  
Colegio de Postgraduados, 2021

## RESUMEN

El uso de bioestimulantes en la agricultura se ha incrementado en los últimos años, dados los resultados positivos que producen en el metabolismo vegetal mismos que se traducen en mayor productividad y calidad. Entre los bioestimulantes inorgánicos se encuentra el grupo de los elementos benéficos, entre ellos el lantano (La). El La se ha empleado con éxito en la agricultura, dado que incrementa la calidad de plántulas y flores de corte, entre otros resultados positivos. El objetivo de esta investigación fue evaluar los efectos que tiene el suministro de La en la fase final del ciclo productivo de la lechuga (*Lactuca sativa* L.) en parámetros de crecimiento, desarrollo, rendimiento y calidad. Se estableció un sistema de raíz flotante con plántulas de lechuga, abastecidas solución nutritiva y oxigenación. Diecisiete días antes del término del ciclo, se inició el tratamiento con 0, 7.5, 15, 22.5 y 30  $\mu\text{M}$  La, suministrado en la solución nutritiva a partir de  $\text{LaCl}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ . A partir del inicio de los tratamientos se midió la altura de planta y el diámetro de tallo, se tomaron lecturas SPAD y se contabilizó el número de hojas por planta. En la cosecha se evaluó área foliar, biomasa fresca de vástago y raíz, biomasa seca de vástago y raíz, y el contenido de nutrimentos y de La. También se determinaron concentraciones de clorofilas (*a*, *b* y total), carotenoides, azúcares (parte aérea y raíces) y ácido ascórbico. Con los resultados se realizó análisis de varianza y prueba de comparación de medias (Tukey, 0.05). La aplicación de La aumentó número de hojas, diámetro del tallo, área foliar, concentración de clorofila, biomasa fresca y seca en hojas y raíz, contenidos de N, Ca, Mg, K, Fe, Cu, Zn, Mn, B y La en la parte aérea de la planta; en plantas tratadas con 30  $\mu\text{M}$  La. La concentración de azúcares solubles totales en hojas incrementó con la adición de 22.5  $\mu\text{M}$  La, mientras que la concentración de ácido ascórbico se incrementó al aplicar 15, 22.5 y 30  $\mu\text{M}$  La. Se concluye que la mayoría de los parámetros de crecimiento, desarrollo y calidad fueron influenciados en forma positiva con la aplicación de La durante la fase final del cultivo establecido en un sistema de raíz flotante.

**Palabras clave:** elementos benéficos, elementos de las tierras raras, bioestimulación.

# EFFECT OF LANTANE CHLORIDE ON THE GROWTH, DEVELOPMENT AND QUALITY OF LETTUCE (*Lactuca sativa* L.) IN A FLOATING ROOT SYSTEM

Guadalupe Contreras Martínez, M.C.  
Colegio de Postgraduados, 2021

## ABSTRACT

The use of biostimulants in agriculture has increased in recent years, given the positive results they produce in plant metabolism, which translate into higher productivity and quality. Among the inorganic biostimulants is the group of beneficial elements, being lanthanum (La) one of them. La has been used successfully in agriculture, since it increases quality attributes of seedlings and cut flowers. The aim of this research was to evaluate the effects of La in the final phase of the productive cycle of lettuce (*Lactuca sativa* L.) on growth, development, yield and quality parameters. A floating root system was established with lettuce seedlings, where they were provided with nutrients and oxygenation. Seventeen days prior to the end of the crop cycle, La treatments were applied as follows: 0, 7.5, 15, 22.5 and 30  $\mu\text{M}$  La, supplied in the nutrient solution from  $\text{LaCl}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ . From the beginning of the treatments, the height of the plant and the diameter of the stem were measured; likewise, SPAD readings were taken and the number of leaves per plant was counted. At harvest, leaf area, fresh stem and root biomass, dry stem and root biomass, and nutrient and La content were evaluated. Chlorophyll concentrations (a, b and total), carotenoids, sugars (aerial part and roots) and ascorbic acid were also determined. With the results, an analysis of variance and a mean comparison test (Tukey, 0.05) were performed. Lanthanum significantly increased number of leaves, stem diameter, foliar area, chlorophyll concentration, fresh and dry biomass in leaves and roots, contents of N, Ca, Mg, K, Fe, Cu, Zn, Mn, B and La in the aerial part of the plant, especially in plants treated with 30  $\mu\text{M}$  La. The concentration of total soluble sugars in leaves increased with the addition of 22.5  $\mu\text{M}$  La, while that of ascorbic acid increased with the 15, 22.5 and 30  $\mu\text{M}$  La. It is concluded that most of the growth, development and quality parameters were positively influenced with the application of La during the final phase of the cultivation established in a floating root system.

**Keywords:** beneficial elements, rare earth elements, biostimulation.

## AGRADECIMIENTOS

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)** por brindarme el apoyo económico para poder realizar mis estudios de postgrado.

Al **Colegio de Postgraduados, especialmente al personal académico del Campus Montecillo, al Posgrado de Edafología y del laboratorio de Nutrición vegetal**, por brindarme el apoyo necesario y permitirme adquirir los conocimientos y experiencias transcurridos durante estos dos años.

Al Dr. **Ernesto Gabriel Alcántar González**, le agradezco por su docta colaboración y apoyo brindado durante mi estancia en el Colegio de Postgraduados.

A la **Dra. Libia Iris Trejo Téllez**, le agradezco de corazón por su amabilidad, disponibilidad, responsabilidad, dedicación, atención, tiempo, aportaciones y correcciones que me brindó durante mi estancia en el Colegio y durante la revisión del presente documento, ya que sin ella no podría haber finalizado en tiempo y forma. Así como también le agradezco por la calidad de conocimientos y experiencia brindada dentro y fuera del salón de clases.

Al **Dr. Fernando Carlos Gómez Merino**, por aceptar en formar parte del presente trabajo de investigación, así como también le agradezco por sus observaciones y comentarios transcurridos durante mi estancia en el Colegio.

A la **Dra. María Guadalupe Peralta Sánchez**, le agradezco por su amabilidad, consejos, dedicación y el tiempo que me brindo para poder atender mis dudas, así como su apoyo durante la cosecha del presente trabajo y mi estancia en el laboratorio de Nutrición Vegetal ya que sin ella no podría haber finalizado mis actividades dentro y fuera del laboratorio.

A la **Dra. Yolanda Leticia Fernández Pavía**, le agradezco por su docta colaboración y apoyo en el presente trabajo.

A la **Dra. Sara Monzarrat Ramírez Martínez**, le agradezco por toda amabilidad, tiempo y apoyo que me brindó durante mi estancia en el laboratorio de Nutrición

Vegetal, también por su ayuda para finalizar la cosecha del presente trabajo y por último le agradezco por brindarme sus conocimientos y experiencias adquiridas dentro y fuera de las instalaciones del Colegio.

A mis padres **José Agustín Contreras de Jesús** y **Ofelia Martínez Zamora**, les agradezco de corazón por todo su apoyo incondicional, educación, motivaciones, consejos, amor, cariño y por estar siempre cuando los necesito. Ya que sin ellos no sería la persona con valores y principios que soy ahora.

A mi hermana **Marisela Contreras Martínez** y hermano **José Mauricio Contreras Martínez**, por brindarme todo el apoyo emocional, cariño, comprensión, consejos y su dedicación de tiempo como familia ya que ellos son una parte fundamental en mi vida.

**Agradezco a todas las personas que conocí dentro y fuera del Colegio, a mis compañeros y amigos** que en un momento dado creyeron en mí, por su apoyo, amistad y confianza que me brindaron durante todo este tiempo que conviví con ellos y gracias por todos los momentos divertidos que pasamos juntos.

## CONTENIDO

<b>RESUMEN .....</b>	<b>iii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>iv</b>
<b>AGRADECIMIENTOS.....</b>	<b>v</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>x</b>
<b>LISTA DE CUADROS.....</b>	<b>xiv</b>
<b>INTRODUCCIÓN GENERAL.....</b>	<b>1</b>
<b>Planteamiento del problema .....</b>	<b>4</b>
<b>OBJETIVOS E HIPÓTESIS .....</b>	<b>5</b>
<b>Objetivo general.....</b>	<b>5</b>
<b>Hipótesis general .....</b>	<b>5</b>
<b>MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>5</b>
<b>Cultivo de lechuga .....</b>	<b>6</b>
<b>Origen de la lechuga.....</b>	<b>6</b>
<b>Posición taxonómica en el cultivo de lechuga.....</b>	<b>7</b>
<b>Características botánicas de la lechuga var. ‘Parris Island’ .....</b>	<b>8</b>
<b>Sistema radicular .....</b>	<b>8</b>
<b>Hojas .....</b>	<b>8</b>
<b>Tallo .....</b>	<b>9</b>
<b>Inflorescencia.....</b>	<b>9</b>
<b>Semillas .....</b>	<b>9</b>
<b>Importancia de la lechuga.....</b>	<b>9</b>
<b>Los elementos de tierras raras .....</b>	<b>9</b>
<b>Origen y disponibilidad de los elementos de tierras raras en la         naturaleza .....</b>	<b>11</b>
<b>Antecedentes de los elementos de tierras raras .....</b>	<b>12</b>
<b>Desventajas y ventajas de los elementos de tierras raras.....</b>	<b>14</b>
<b>Elementos de tierras raras en la agricultura .....</b>	<b>14</b>
<b>Lantánidos.....</b>	<b>15</b>
<b>Lantano.....</b>	<b>16</b>
<b>Reservas mundiales de lantano .....</b>	<b>17</b>

Lantano en las plantas .....	18
Efecto hormético .....	18
Efecto del lantano en plantas .....	18
<b>Cultivos hidropónicos .....</b>	<b>23</b>
Antecedentes de la hidroponía.....	24
Ventajas y desventajas de los sistemas hidropónicos .....	26
Sistemas de cultivos hidropónicos.....	27
Sistema de raíz flotante.....	28
<b>CAPÍTULO I. LANTANO EN CRECIMIENTO, DESARROLLO Y CALIDAD DE</b>	
<b>LECHUGA EN UN SISTEMA DE RAÍZ FLOTANTE .....</b>	<b>30</b>
<b>1.1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>30</b>
<b>1.2 OBJETIVO GENERAL .....</b>	<b>31</b>
<b>1.3 HIPÓTESIS GENERAL .....</b>	<b>31</b>
<b>1.4 MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>31</b>
1.4.1. Localización del sitio experimental.....	31
1.4.2. Área del experimento .....	31
1.4.3. Diseño experimental.....	32
1.4.4. Semillas de lechuga y sustrato utilizado para la germinación de semillas.....	34
1.4.5. Establecimiento del semillero y mantenimiento .....	34
1.4.6. Establecimiento del sistema de raíz flotante.....	35
1.4.7. Trasplante de plántulas al sistema de raíz flotante .....	36
1.4.8. Mantenimiento del sistema de raíz flotante.....	37
1.4.9. Incorporación de cloruro de lantano.....	38
1.4.10. Variables evaluadas .....	40
1.4.11. Análisis estadístico.....	43
<b>1.5. RESULTADOS .....</b>	<b>43</b>
1.5.1. Número de hojas y altura de la planta .....	43
1.5.2. Lecturas SPAD.....	44
1.5.3. Diámetro del tallo.....	45
1.5.4. Área foliar .....	46



1.5.5.	Longitud de raíz durante la fase terminal y en la cosecha.....	47
1.5.6.	Biomasa fresca de vástago, raíz y total .....	49
1.5.7.	Biomasa seca de vástago, raíz y total.....	50
1.5.8.	Contenido nutrimental de la parte aérea en lechuga.....	51
1.5.9.	Concentración de clorofila <i>a</i> , <i>b</i> , total y carotenoides.....	54
1.5.10.	Concentración de azúcares totales en hojas y raíces .....	56
1.5.11.	Concentración de ácido ascórbico.....	58
1.5.12.	Consumo de agua durante la fase terminal del cultivo .....	59
1.6.	DISCUSIÓN .....	60
1.7.	CONCLUSIÓN.....	67
	CONCLUSIÓN GENERAL.....	68
	LITERATURA CITADA.....	69

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Mural y tumba egipcia. a) Sacerdote Sem sosteniendo un ramo de flores y lechugas en la parte superior de color verde. b) Relieve de pared de la 'tumba de la capilla de los sacrificios de Choe en Abydos muestra la lechuga con hojas puntiagudas sobre una mesa de ofrenda. ....	6
<b>Figura 2.</b> Planta de lechuga var. "Parris Island Coss" .....	8
<b>Figura 3.</b> Tabla periódica de los elementos.....	10
<b>Figura 4.</b> Forma pura de lantano. ....	16
<b>Figura 5.</b> Cultivos hidropónicos en la antigüedad. a) Cultivos colgantes en Babilonia, b) Jardines egipcios en el Rio Nilo. c) Cultivos aztecas conocidos como "Chinampas".....	24
<b>Figura 1.1.</b> Invernadero donde se estableció el presente estudio. ....	32
<b>Figura 1.2.</b> Diseño experimental con sus respectivos tratamientos.....	33
<b>Figura 1.3.</b> Primer riego a los 9 DDS con solución nutritiva al 10%. ....	35
<b>Figura 1.4.</b> Instalación del sistema de raíz flotante. ....	36
<b>Figura 1.5.</b> Trasplante de lechugas "Parris Island Coss" en raíz flotante: a) retiro de plántulas con almacigo, b) enjuague de plántulas, c) enrollamiento de esponja como soporte, d) y e) llenado de cajas con solución nutritiva y f) trasplante final. ....	37
<b>Figura 1.6.</b> Preparación del cloruro de lantano: a) peso del reactivo, b) preparación de la mezcla homogénea y c) recipiente del cloruro de lantano.....	38
<b>Figura 1.7.</b> Incorporación de cloruro de lantano: a) e b) incorporación del cloruro de lantano en cada tratamiento y c) ajuste del pH a 5.50. ....	39
<b>Figura 1.8.</b> Altura de plantas de lechuga var. "Parris Island Coss", tratadas con diferentes concentraciones de La, 5, 10 y 15 días después de la incorporación de cada una de las dosis. Medias $\pm$ DE con letras distintas sobre las barras de cada medición, indican diferencia significativa (Tukey, $P \leq 0.05$ ) n=8. ....	44
<b>Figura 1.9.</b> Lecturas SPAD en plantas de lechuga var. "Parris Island Coss", tratadas con diferentes concentraciones de La, 5, 10 y 17 días después	

de la incorporación de cada una de las dosis. Medias $\pm$ DE con letras distintas sobre las barras de cada medición, indican diferencia significativa (Tukey, $P \leq 0.05$ ) n=8. ....	45
<b>Figura 1.10.</b> Diámetro de tallo en plantas de lechuga var. “Parris Island Coss”, tratadas con diferentes concentraciones de La, 17 días después de la incorporación en cada una de las dosis. Medias $\pm$ DE con letras distintas sobre las barras de cada medición, indican diferencia significativa (Tukey, $P \leq 0.05$ ) n=10. ....	46
<b>Figura 1.11.</b> Área foliar en plantas de lechuga var. “Parris Island Coss”, tratadas con diferentes concentraciones de La, 17 días después de la incorporación en cada una de las dosis. Medias $\pm$ DE con letras distintas sobre las barras de cada medición, indican diferencia significativa (Tukey, $P \leq 0.05$ ) n=5. ....	46
<b>Figura 1.12.</b> Foto comparativa de los tratamientos durante la cosecha a los 36 DDT en plantas de lechuga var. “Parris Island Coss”, tratadas con diferentes concentraciones de La y donde se puede apreciar la longitud de raíz en cada tratamiento. ....	48
<b>Figura 1.13.</b> Biomasa fresca total en plantas de lechuga var. “Parris Island Coss”, tratadas con diferentes concentraciones de La, después de 17 días del inicio de tratamientos. De la incorporación de cada una de las dosis. Medias $\pm$ DE con letras distintas sobre las barras de cada medición, indican diferencia significativa (Tukey, $P \leq 0.05$ ) n=5. ....	50
<b>Figura 1.14.</b> Biomasa seca total en plantas de lechuga var. “Parris Island Coss”, tratadas con diferentes concentraciones de La. Medias $\pm$ DE con letras distintas sobre las barras de cada medición, indican diferencia significativa (Tukey, $P \leq 0.05$ ) n=5. ....	51
<b>Figura 1.15.</b> Contenido de N, P, K, Ca, Mg y S en plantas de lechuga var. “Parris Island Coss”, tratadas con diferentes concentraciones de La bajo un sistema de raíz flotante. Medias $\pm$ DE con letras distintas sobre las barras de cada medición, indican diferencia significativa (Tukey, $P \leq 0.05$ ) n=5. ....	52

<b>Figura 1.16.</b> Contenido de Fe, Cu, Zn, Mn y B en plantas de lechuga var. “Parris Island Coss”, tratadas con diferentes concentraciones de La bajo un sistema de raíz flotante. Medias $\pm$ DE con letras distintas sobre las barras de cada medición, indican diferencia significativa (Tukey, $P \leq 0.05$ ). n=5. ....	53
<b>Figura 1.17.</b> Curvas de acumulación de calcio (Ca), magnesio (Mg), potasio (K) y lantano (La) en hojas de lechuga var. “Parris Island Coss”, tratadas con diferentes concentraciones de La bajo un sistema de raíz flotante (r=coeficiente de correlación). ....	54
<b>Figura 1.18.</b> Concentración de clorofilas a, b y total en plantas de lechuga var. “Parris Island Coss”, tratadas con diferentes concentraciones de La bajo un sistema de raíz flotante. Medias $\pm$ DE con letras distintas sobre las barras de cada medición, indican diferencia significativa (Tukey, $P \leq 0.05$ ). n=4. ....	55
<b>Figura 1.19.</b> Concentración de carotenoides en plantas de lechuga var. “Parris Island Coss”, tratadas con diferentes concentraciones de La bajo un sistema de raíz flotante. Medias $\pm$ DE con letras distintas sobre las barras de cada medición, indican diferencia significativa (Tukey, $P \leq 0.05$ ) n=4. ....	56
<b>Figura 1.20.</b> Concentración de azúcares solubles totales en hojas de lechuga var. “Parris Island Coss”, tratadas con diferentes concentraciones de La bajo un sistema de raíz flotante. Medias $\pm$ DE con letras distintas sobre las barras de cada medición, indican diferencia significativa (Tukey, $P \leq 0.05$ ) n=4. ....	57
<b>Figura 1.21.</b> Contenido de azúcares solubles totales en raíces de lechuga var. “Parris Island Coss”, tratadas con diferentes concentraciones de La bajo un sistema de raíz flotante. Medias $\pm$ DE con letras distintas sobre las barras de cada medición, indican diferencia significativa (Tukey, $P \leq 0.05$ ). n=4. ....	58
<b>Figura 1.22.</b> Contenido de ácido ascórbico en hojas de lechuga var. “Parris Island Coss”, tratadas con diferentes concentraciones de La bajo un sistema	

de raíz flotante. Medias  $\pm$  DE con letras distintas sobre las barras de cada medición, indican diferencia significativa (Tukey,  $P \leq 0.05$ )  $n=4$ ..... 59

**Figura 1.23.** Consumo de agua por contenedor durante los primeros 2, 3, 4, 5, 6, y 7 días de tratamiento con La en el cultivo lechuga var. “Parris Island Coss”, bajo un sistema de raíz flotante. Medias  $\pm$  DE con letras distintas sobre las barras de cada medición, indican diferencia significativa (Tukey,  $P \leq 0.05$ )  $n=4$ ..... 60

## LISTA DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> Posición taxonómica de la lechuga var. Parris Island.....	7
<b>Cuadro 2.</b> Minerales que contienen elementos de tierras raras. ....	12
<b>Cuadro 3.</b> Efectos de lantano en diversos cultivos.....	21
<b>Cuadro 1.1.</b> Composición de la solución nutritiva al 10%.....	34
<b>Cuadro 1.2.</b> Volumen correspondiente de $\text{LaCl}_3$ para cada tratamiento.....	39
<b>Cuadro 1.3.</b> Número de hojas en plantas de lechuga var. “Parris Island Coss”, tratadas con diferentes dosis de La durante la fase terminal del ciclo productivo.....	43
<b>Cuadro 1.4.</b> Longitud de raíz en plantas de lechuga var. “Parris Island Coss”, tratadas con diferentes dosis de La durante la fase terminal del ciclo productivo.....	47
<b>Cuadro 1.5.</b> Biomasa fresca de vástago y raíz en plantas de lechuga var. “Parris Island Coss”, tratadas con diferentes dosis de La durante la fase terminal del ciclo productivo. ....	49
<b>Cuadro 1.6.</b> Biomasa seca de vástago y raíz en plantas de lechuga var. “Parris Island Coss”, tratadas con diferentes dosis de La durante la fase terminal del ciclo productivo. ....	50

## INTRODUCCIÓN GENERAL

El origen de la lechuga (*Lactuca sativa* L.) no está definido, algunas investigaciones afirman que procede de la India; mientras que otras lo sitúan en regiones templadas de Eurasia y América del Norte a partir de la especie *Lactuca serriola*. Basada en sus antecedentes, se cree también que tuvo su origen en el Antiguo Egipto hace más de miles de años ([Parkell, 2015](#); [La Rosa, 2015](#)).

La lechuga pertenece a la familia Asteraceae, es una planta anual con autopolinización y tiene una raíz profunda con raíces laterales en gran parte horizontales para maximizar la absorción de agua y nutrimentos ([Gan y Azrina, 2016](#)). Es uno de los cultivos más importantes en el mundo, China es el país con más producción (15, 546,415 t), seguido de Estados Unidos de América (3, 677,323 t), India (1.222,571 t), España (934, 670 t) e Italia (768,055 t) ([FAO, 2019](#)).

Forma parte de la alimentación humana gracias a su sabor y características nutricionales. Es una hortaliza que posee bajas calorías y es de digestibilidad baja; es rica en vitaminas (A y C), hierro y calcio ([Santos et al., 2009](#)). Mientras que, sus efectos benéficos para la salud se atribuyen principalmente a la presencia de diversos compuestos antioxidantes como antocianinas y carotenoides totales ([Saha et al., 2016](#)).

México ocupa el noveno lugar a nivel mundial con una producción de 515, 647 t obteniendo un rendimiento promedio de 22.789 t ha<sup>-1</sup>. En el país la producción nacional de lechuga se efectúa en 20 entidades, teniendo en los primeros lugares a Guanajuato (181,015 t), Zacatecas (79,963 t), Puebla (66,234 t), Aguascalientes (46,488 t) y Baja California (31, 480 t) ([SIAP, 2020](#)).

Actualmente los problemas agronómicos, el crecimiento poblacional y los daños al medio ambiente influyen en la producción y calidad de hortalizas. Unas de las principales razones son las actividades humanas que han generado el principal motor del cambio climático y en los últimos años la producción de alimentos en muchos países ha sido menor que el crecimiento poblacional. Además la escasez del agua como la inadecuada utilización de las nueva tecnologías esta limitando el desarrollo y

producción de alimentos, a tal punto que los expertos en la materia alimentaria y gran parte de la población se preguntan sí en un futuro. ¿Habrá suficiente alimento para satisfacer las necesidades de todos? ([García-Casal, 2007](#)).

Es aquí donde entran los elementos de tierras raras (ETR), recurso natural no renovable, con aplicaciones cada vez más amplias en el desarrollo económico, ecológico y social. China se encuentra entre los países con mayores reservas de tierras raras, convirtiéndose en el mayor productor, consumidor y exportador mundial de productos de éstas ([Liu, 2012](#)).

México podría ser un actor importante en la producción de elementos de tierras raras mismas que podrían aplicarse en una amplia gama de sectores como energía renovable, telecomunicaciones, industria automotriz y en la agricultura ([Martínez, 2014](#)). En los últimos años, México desarrolló un programa minero a través del Servicio Geológico Mexicano (SGM), con el objetivo de desarrollar actividades de explotación para la identificación de tierras raras justificando que estos metales son productos estratégicos para el mercado mundial y el desarrollo industrial. Hasta el momento se han localizado posibles indicios de yacimientos de elementos de tierras raras en los estados de Tamaulipas, Oaxaca y algunas zonas de Sonora ([Morales, 2014](#); [NOTIMEX, 2014](#)).

La Unión Internacional de Química Pura y Aplicada aprobó el nombre colectivo de elementos tierras raras para el escandio (Sc), el itrio (Y) y los lantánidos que incluyen a 15 elementos: lantano (La), cerio (Ce), praseodimio (Pr), neodimio (Nd), promecio (Pm), samario (Sm), europio (Eu), gadolinio (Gd), terbio (Tb), disprosio (Dy), holmio (Ho), erbio (Er), tulio (Tm), iterbio (Yb) y lutecio (Lu). Por otra parte, la concentración de los ETR en el ambiente varía de acuerdo con sus usos en la industria, agricultura y medicina ([IUPAC 2005](#); [Olivares et al., 2011](#)).

Algunos científicos dedicados al estudio de plantas y suelos no analizan generalmente los ETR. Esto se debe a que los elementos tales como nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) son considerados elementos primarios o esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas. Por lo tanto, la información científica relacionada con la



acumulación de ETR en diversas partes de la planta y en el suelo es escasa (Hernández y Verma, 2009).

Sin embargo, en 1970 se reportó el uso de fertilizantes enriquecidos con ETR en China, con respuestas en diferentes especies de plantas en el contenido de clorofila, tasa fotosintética y biomasa vegetal (Liu *et al.*, 2013). Lo anterior demostró que estos elementos son benéficos para el crecimiento, la calidad y el rendimiento en diversos cultivos, proporcionándolos en pequeñas cantidades (Ramírez-Martínez *et al.*, 2012).

De esta forma, representan una alternativa para los problemas agronómicos que se enfrentan en la actualidad tales como: el deterioro de suelos fértiles debido a la erosión del suelo, el agotamiento de los nutrimentos, la pérdida de carbono orgánico, el sellado del suelo, la industrialización, el cambio climático y el crecimiento demográfico (FAO, 2015).

Por lo tanto, al crecimiento demográfico, traen como consecuencia, el incremento de la demanda de agua para la producción de alimentos y para usos domésticos, industriales y municipales. La agricultura es el sector de los más sensibles a la escasez de agua (FAO, 2013). Es por lo que, se han propuesto el uso de tecnologías apropiadas como los cultivos hidropónicos, los cuales pueden aumentar la producción de plantas en un espacio reducido (Campos-Júnior *et al.*, 2018).

Del mismo modo, los cultivos hidropónicos tienen algunas ventajas sobre los cultivos tradicionales, como mejorar el control de factores externos como clima, arvenses, plagas, enfermedades, deficiencia o exceso de nutrimentos, incrementar la calidad de los productos a cosechar, fomentar la precocidad en la obtención del producto y mejorar el aprovechamiento de áreas infértiles y mayor densidad de plantación que nos conduce a un incremento en la producción por unidad de área (Guerrero *et al.*, 2014).

Por tanto, el implemento de la combinación de los cultivos hidropónicos y la adición de ETR, ha mostrado incrementar el crecimiento, desarrollo y calidad en diversas especies, entre las que destacan la cebada (*Hordeum vulgare*) (Van Steveninck *et al.*, 1976; Han *et al.*, 2005), arroz (*Oryza sativa*) (Fashui *et al.*, 2000; Liu *et al.*, 2012), tabaco (*Nicotiana tabacum* L.) (Chen *et al.*, 2001), trigo (*Triticum durum*) (D'Aquino *et al.*,

2009), tulipán (*Tulipa gesneriana* L.) (Ramírez-Martínez *et al.*, 2012), pepino (*Cucumis sativus* L.) (Ma *et al.*, 2015) y pimiento (*Capsicum annuum* L.) (García-Jiménez *et al.*, 2017).

Adicionalmente, los sistemas hidropónicos permiten el aprovechamiento de áreas reducidas o suelos infértiles, que se encuentran en la actualidad debido a problemas agronómicos y el crecimiento demográfico.

### **Planteamiento del problema**

México ha enfrenado en los últimos años una gran variedad de problemas agroclimáticos, debido a la extensa contaminación que enfrentamos a nivel mundial, incluso a los cambios climáticos constantes en diferentes regiones del país y el constante crecimiento poblacional que por ende necesita producir más alimentos y optimizar el consumo del agua.

Por ello, para enfrenar la escasez y mantener un control adecuado del agua es preferible la implementación de sistemas hidropónicos para los cultivos hortícolas, dado que se mantiene un control adecuado de nutrimentos esenciales; además las plantas son mucho más precoces en comparación con un cultivo convencional. Igualmente, en los últimos años se ha descubierto que los elementos de tierras raras (ETR) han tenido efectos importantes en la calidad y el rendimiento de los cultivos.

Al mismo tiempo, la lechuga es importante dentro de la ingesta humana por su alto contenido de fibra que facilita su digestibilidad y es considerada como una hortaliza benéfica para la salud humana dado que contiene propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y antígenotóxicas, proporcionando protección contra enfermedades cardiovasculares y varios tipos de cáncer. Por ello se propone evaluar el efecto del cloruro de lantano en el crecimiento, desarrollo y calidad en el cultivo de lechuga en fase poscosecha.

## OBJETIVOS E HIPÓTESIS

### Objetivo general

Evaluar el suministro de cloruro de lantano en distintas concentraciones, en la fase final del ciclo productivo, en el crecimiento, contenido nutrimental, calidad y rendimiento del cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.), establecido en un sistema de raíz flotante bajo condiciones de invernadero.

### Hipótesis general

Al menos una dosis del cloruro de lantano suministrada en la fase final del ciclo productivo, en un sistema de raíz flotante bajo condiciones de invernadero, mejorará indicadores de crecimiento, de estatus nutrimental y de calidad, e incrementará el rendimiento en la lechuga (*Lactuca sativa* L.).

## MARCO TEÓRICO

México ocupa el noveno lugar a nivel mundial por el volumen de producción de lechuga (SIAP, 2020).

Los primeros registros de esta hortaliza provienen de Egipto, en pinturas que se encontraban en tumbas que datan de 4500 a. C., donde se muestran hojas largas tipo lanceoladas y puntiagudas, lechuga que basa su antecedente en *Lactuca sativa* var. Longifolia. Desde Egipto, el cultivo de lechuga tipo Cos se extendió posteriormente a Grecia y Roma, pero la lechuga tipo repollo no apareció hasta mucho más tarde (Lindqvist, 1960).

La calidad nutricional de la lechuga beneficia la salud humana por sus propiedades antioxidantes y lipófilas (clorofilas y carotenoides), minerales, carbohidratos y concentración de proteínas que al consumirlos previene enfermedades cardiovasculares y el cáncer (Pérez-López *et al.*, 2015; Acuña *et al.*, 2017). Por esa razón es importante considerar aumentar el rendimiento y la calidad de este cultivo. Por ello, en los últimos años se han implementado en la agricultura, el uso de los elementos de tierras raras (ETR), un grupo de 17 elementos químicos; adicionalmente, éstos son utilizados en la industria para generar vehículos, catalizadores de automóviles,

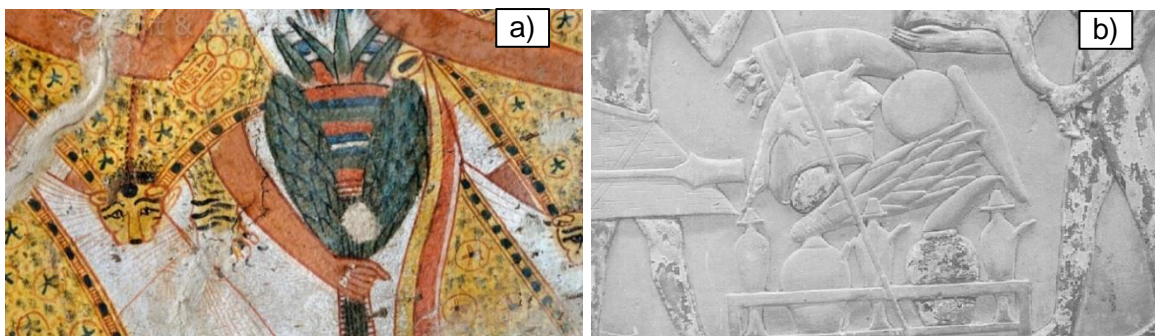
pantallas planas y cámaras digitales, entre otros aparatos, así como también en medicina para reducir los niveles de fosfato en la sangre (Navas-Serrano, 2008; Brioschi *et al.*, 2012).

Dentro de los ETR se encuentra el lantano (La), un elemento trivalente perteneciente al grupo de los lantánidos, adicionado en pequeñas cantidades en la producción de cultivos (Kobayashi *et al.*, 2007). Estudios previos han determinado que el La es capaz de reducir el estrés oxidativo debido que activa enzimas antioxidantes como también permite que aumente el contenido de clorofila mejorando el crecimiento, desarrollo, rendimiento y calidad en los cultivos (Turra *et al.*, 2015; Luo *et al.*, 2021).

## Cultivo de lechuga

### Origen de la lechuga

El cultivo de lechuga tiene una historia muy larga, Lindqvist (1960) menciona que se encontraron diseños de una planta con hojas lanceoladas y puntiagudas en murales de pintura localizadas en templos y tumbas egipcias de las cual autores asumen que es la *Lactuca serriola* uno de los antepasados directos de la *L. sativa*, que datan de 4500 a. C. (Figura 1) (Lindqvist, 1960; Vries, 1997). Por otra parte, Rulkens (1987) afirma que la lechuga se originó en la zona del kurdistán-Mesopotamia y no en Egipto (citado en Vries, 1997).



**Figura 1.** Mural y tumba egipcia. a) Sacerdote Sem sosteniendo un ramo de flores y lechugas en la parte superior de color verde. b) Relieve de pared de la 'tumba de la capilla de los sacrificios de Choe en Abydos muestra la lechuga con hojas puntiagudas sobre una mesa de ofrenda. (Fuente: <https://valentinachirico.com/2020/10/lettuce-ancient-egypt-usages/>).

Se describe que la domesticación de la lechuga fue mucho antes de la época romana, y probablemente tuvo lugar en el suroeste de Asia en la región entre Egipto e Irán. También se ha sugerido que la región entre los ríos Tigris y Eufrates es el centro de origen de la lechuga (Frietema *et al.*, 1995). Posteriormente, de Egipto se extendió a Grecia y Roma, de la cual ellos cultivaron la lechuga en forma de hojas alargadas posiblemente del tipo Cos (Helm, 1954).

El género *Lactuca* L., comprende alrededor de 100 especies aproximadamente, de las cuales 17 especies son europeas, 10 norteamericanas, 33 procedentes de África oriental y 40 especies asiáticas. Este género se divide en varias secciones y subsecciones. En este caso la especie de interés en este trabajo es *Lactuca sativa*, de la cual se ha clasificado en la sección *Lactuca* subsección *Lactuca* L. *serriola* L., descrita como antecedente directo de *Lactuca sativa* (Lindqvist, 1960; Vries, 1997).

### Posición taxonómica en el cultivo de lechuga

En el **Cuadro 1.**, se describe la posición taxonómica de la lechuga var. Parris Island Coss.

**Cuadro 1.** Posición taxonómica de la lechuga var. Parris Island.

Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Magnoliopsida
Orden	Asterales
Familia	Asteraceae
Subfamilia	Cichorioideae
Tribu	Lactuceae
Género	<i>Lactuca</i>
Especie	<i>Lactuca sativa</i> L.
Variedad	'Parris Island'

(Fuente: Saavedra, 2017).

### **Características botánicas de la lechuga var. ‘Parris Island’**

La lechuga es una planta herbácea de la familia Asteraceae y nombre científico *Lactuca sativa* L. Es una planta anual autógama, conformadas por hojas, tallos y raíz (**Figura 2**). Se caracteriza por ser una hortaliza propia de las regiones templadas ([Valdivia y Almanza, 2016](#)) y es la verdura de hoja más utilizada como ensalada fresca.



**Figura 2.** Planta de lechuga var. “Parris Island Coss”  
(Fotografía: Guadalupe Contreras Martínez, 2021<sup>®</sup>).

#### **Sistema radicular**

Esta especie tiene una raíz pivotante, gruesa en la corona que se adelgaza gradualmente en sentido al ápice, puede alcanzar más de 60 cm de profundidad ([Saavedra, 2017](#)).

#### **Hojas**

Las hojas de lechuga son de color verde y las interiores son amarillas grandes, erectas, abiertas y alargadas de 20 a 30 cm de largo y 6 a 10 cm de ancho, con nervadura prominente, estas hojas se disponen alrededor del tallo ([Saavedra, 2017](#)).

## **Tallo**

El tallo es corto y cilíndrico que se va alargando conforme se desarrolla la planta, se ramifica y presenta numerosas hojas disminuyendo su tamaño conforme aumenta su altura, terminando en una inflorescencia (Cruz, 2009; Saavedra, 2017).

## **Inflorescencia**

Su inflorescencia son capítulos florales amarillos dispuestos en racimos o carimbos, y en su interior se encuentran las semillas que están provistas de vilano plumoso (Cruz, 2009).

## **Semillas**

Las semillas de lechuga es botánicamente un aquenio, son pequeñas y alargadas de aproximadamente 3 mm de largo y son de color blanco para esta variedad (Nijse *et al.*, 1998; Saavedra, 2017).

## **Importancia de la lechuga**

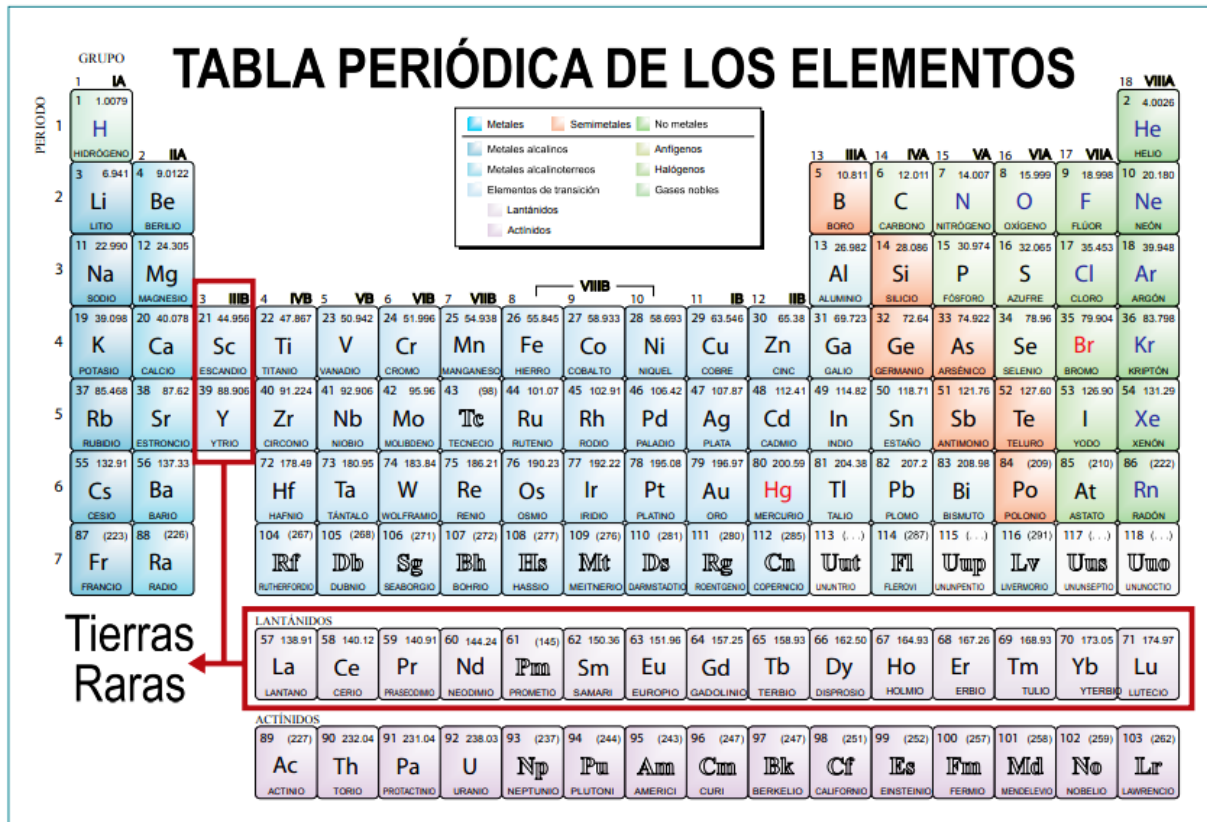
La lechuga se ha descrito como una hortaliza anual con un alto valor energético en sus hojas, contiene vitaminas B y C, sus semillas contienen vitamina E de las cuales pueden utilizarse para producir aceite (Vries, 1997).

La mayoría de las variedades de lechuga se consumen fresas y se sirven comúnmente como base de ensaladas verdes durante el clima caluroso debido a su alto contenido de agua, es baja en calorías, azúcar y grasa, proporciona vitaminas y minerales tales como calcio, potasio, magnesio y hierro, además de tener propiedades antioxidantes (Kusi, 2020).

## **Los elementos de tierras raras**

La Unión Internacional de Química Pura y Aplicada aprobó el nombre colectivo de “elementos de tierras raras” (ETR) considerados como un grupo de 17 elementos químicos de la tabla periódica es decir para el escandio (Sc), el itrio (Y) y los lantánidos que incluyen a 15 elementos: lantano (La), cerio (Ce), praseodimio (Pr), neodimio (Nd),

promecio (Pm), samario (Sm), europio (Eu), gadolinio (Gd), terbio (Tb), disprosio (Dy), holmio (Ho), erbio (Er), tulio (Tm), iterbio (Yb) y lutecio (Lu). En la **Figura 3**, se muestra la ubicación de los ETR en la tabla periódica (Liang *et al.*, 2008; Olivares *et al.*, 2011). Según sus pesos atómicos y propiedades fisicoquímicas, se dividen en elementos ligeros, medios y pesados. Los primeros cinco elementos mencionados anteriormente son ligeros, y el resto son medios o pesados (Hu *et al.*, 2004; Liu, 2012).



**Figura 3.** Tabla periódica de los elementos

(Fuente: Tomada de Martínez, 2014).

La denominación de tierras raras es algo confusa. El término “tierra”, que parece un poco arcaico, proveniente de la antigua denominación que se daba a lo que hoy se conoce como óxidos y que correspondía a materiales con apariencia amorfa, insoluble en agua y que no cambiaba su estado físico con el calentamiento. Por otra parte, la palabra “rara” se adoptó por su baja concentración en los materiales a partir de los cuales se purificaban, pero varios de ellos son más abundantes incluso que los metales preciosos o que el mismo cobre y plomo. También cabe la acepción de que se trataba



de elementos que se utilizaban muy raramente, pues para la época de su descubrimiento tenían poca utilidad práctica; pero ante todo la palabra hace referencia a la dificultad para extraerlos y purificarlos (Echeverri y Parra, 2019).

En los últimos años se han convertido en un elemento útil para la industria de la tecnología. Creando tecnologías energéticas activas (vehículos, catalizadores de automóviles, iluminación de bajo consumo y para la alimentación) y equipos digitales (pantallas planas, unidades de discos y cámaras digitales). Asimismo, estos elementos también son usados en la medicina (por ejemplo, el lantano usado para el tratamiento de las enfermedades renales) y en la producción pecuaria y agricultura tanto para la alimentación de los cerdos y aves o como fertilizantes de fosfato dopados con elementos de tierras raras para varios cultivos como maíz, arroz, papa y repollo (Brioschi *et al.*, 2012).

### **Origen y disponibilidad de los elementos de tierras raras en la naturaleza**

Los elementos de tierras raras (ETR) no existen en forma libre en la naturaleza, sino que están presentes junto con otros minerales; generalmente coexisten con la naturaleza, principalmente en la biosfera a través de actividades antropogénicas (Liu *et al.*, 2013). En promedio, la corteza terrestre contiene cerca del 0.015% y se conocen más de 250 tipos de minerales que contienen ETR, entre los más comunes se encuentran la bastnaesita, monazita, xenotima, loparita, euxenita y parisita (Kastori *et al.*, 2010).

Sin embargo, solo tres de ellos son considerados factibles para la extracción de ETR: bastnaesita, xenotimea y monazita (Charalampides *et al.*, 2015). En el **Cuadro 2**, se muestran algunos de los minerales que contiene elementos de tierras raras y su fórmula química (Dostal, 2017).

**Cuadro 2.** Minerales que contienen elementos de tierras raras.

Mineral	Fórmula
Allanita	$(Y, Ln, Ca)_2(Al, Fe^{+3})_3(SiO_4)_3(OH)$
Apatita	$(Ca, Ln)_5(PO_4)_3(F, Cl, OH)$
Bastnasita	$(Ln, Y)(CO_3)F$
Eudialita	$Na_4(Ca, Ln)_2(Fe^{2+}, Mn^{2+}, Y)ZrSi_8O_{22}(OH, Cl)_2$
Fergusonita	$(Ln, Y)NbO_4$
Gittinsita	$CaZrSi_2O_7$
Limoriita	$Y_2(SiO_4)(CO_3)$
Kainosita	$Ca_2(Y, Ln)_2Si_4O_{12}(CO_3)_H_2O$
Loparita	$(Ln, Na, Ca)(Ti, Nb)O_3$
Monazita	$(Ln, Th)PO_4$
Mosandrita	$(Na, Ca)_3Ca_3Ln (Ti, Nb, Zr)(Si_2O_7)_2(O, OH, F)_4$
Parisita	$Ca(Ln)_2(CO_3)_3F_2$
Pirocloro	$(Ca, Na, Ln)_2Nb_2O_6(OH, F)$
Rinkita (rinkolita)	$(Ca, Ln)_4Na(Na, Ca)_2Ti(Si_2O_7)_2(O, F)_2$
Steenstrupina	$Na_{14}Ln_6Mn_2Fe_2(Zr, Th)(Si_6O_{18})_2(PO_4)_7 \cdot 3H_2O$
Synchysita	$Ca(Ln)(CO_3)_2F$
Xenotima	$YPO_4$
Zircon	$(Zr, Ln)SiO_4$

(Fuente: [Dostal, 2017.](#))

Un dato importante es que el contenido de los elementos de tierras raras en la capa superficial del suelo depende de los procesos pedogenéticos, el clima, contenido de materia orgánica y minerales arcillosos ([Kastori et al., 2010](#)).

### **Antecedentes de los elementos de tierras raras**

La historia de los elementos de tierras raras empieza a partir de 1917, cuando se reportó por primera vez efectos fisiológicos del Ce en el género *Spirogyra* de algas

verdes. En 1933, la entonces Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas, reportó el efecto estimulante del  $\text{La}^{+3}$  en el crecimiento del trigo. Más tarde, en 1960 científicos rumanos y búlgaros reportaron un incremento del 24% en la producción de trigo, soya y remolacha azucarera con la aplicación de  $\text{CeCl}_3$ . Posteriormente, entre 1963 y 1964 se continuó evaluando la influencia del  $\text{CeCl}_3$  en el crecimiento de varias plantas (trigo, maíz, frijoles, tomate, pepino y arroz) en Bulgaria (Hu *et al.*, 2004; Olivares *et al.*, 2011).

En 1970, se inició en China, el empleo de fertilizantes enriquecidos con ETR y en 1972 comenzaron los estudios sistemáticos de la aplicación de los ETR en la agricultura china. Más tarde, en 1979 se inició su uso en la agricultura en Estados Unidos de América; y en 1983 en el Reino Unido. Varios experimentos de campo con arroz, trigo, soya, maní, tabaco, caña de azúcar, sandía, remolacha y otras plantas se llevaron a cabo en China entre 1980 y 1985 (Hu *et al.*, 2004; Olivares *et al.*, 2011).

De esta manera, en el 2001 China produjo 75, 000 t de óxidos de ETR, equivalente al 90% de la producción mundial y utilizó 1100 t en su agricultura (Hu *et al.*, 2004; Olivares *et al.*, 2011). La creciente demanda de ETR ha llevado a un aumento exponencial de su producción mundial en aproximadamente  $50,000 \text{ Mg año}^{-1}$  en 1990,  $70,000 \text{ Mg año}^{-1}$  en 1995 y  $130,000 \text{ Mg año}^{-1}$  en 2010. Es por eso que los aspectos fisiológicos de los ETR fueron investigados principalmente por investigadores de China (Brioschi *et al.*, 2012).

En el 2010, China fue el principal productor mundial de reservas mineras con el 97%; estas minas principalmente de tierras raras ligeras, se encuentran principalmente en Baotou de la Región Autónoma de Mongolia Interior y otras áreas del norte, así como en Liangshan de la provincia de Sichuan. Mientras que, los depósitos de tierras raras medias y pesadas se encuentran principalmente en Ganzhou en la provincia de Jiangxi, Longyan en la provincia de Fujian, y algunas otras áreas del sur. En las posiciones 2 y 3 se ubican la India con el 2% y Brasil con el 1%, respectivamente. En términos de reservas mineras globales totales de ETR, China posee el 48%, la Comunidad de Estados Independientes posee el 17%, Estados Unidos 12%, India 3%, Australia 1% y otros países 19% (Liu, 2012; Arroyo y Marques, 2014; Charalampides *et al.*, 2015).

## Desventajas y ventajas de los elementos de tierras raras

Entre las ventajas que nos brindan los ETR, es que se han considerado previamente como no tóxicos y por ser excretados fácilmente por los animales y el hombre después de la ingestión. Son utilizados para la industria tecnológica en la creación de equipos digitales, en la medicina para el control de algunas enfermedades renales y en la agricultura para aumentar el crecimiento, desarrollo, calidad y producción en diversos cultivos ([Kastori et al., 2010](#); [Brioschi et al., 2012](#)).

Algunas desventajas sobre el uso creciente de los ETR es la contaminación ambiental que ocasiona su amplia extracción y por lo tanto son denominados contaminantes ambientales. El más frecuente de los ETR antropogénicos es el Gd, los medios de contraste basados en este metal empleados en resonancias magnéticas, son liberados en el medio ambiente a través de efluentes hospitalarios en ríos, lagos y ambientes costeros en Europa, Estados Unidos y Japón ([Brioschi et al., 2012](#)).

Recientemente se han publicado efectos tóxicos de ETR en bacterias, plantas y animales cuando las concentraciones utilizadas son sumamente altas. Estudios anteriores han demostrado que la complejación de la solución de los ETR con ligandos orgánicos e inorgánicos juegan un papel importante para la absorción de ETR por las raíces de la planta, sin embargo estos estudios se basaron en sistemas hidropónicos y existe una escasa información sobre las interfaces naturales de suelo y raíz ([Brioschi et al., 2012](#)).

## Elementos de tierras raras en la agricultura

Las plantas requieren **al menos** 17 elementos minerales para completar su ciclo de vida, los cuales en su mayoría se adquieren principalmente del suelo o de su incorporación a la solución nutritiva. Sin embargo, las plantas también acumulan elementos no esenciales en pequeñas cantidades, un ejemplo fue el estudio que llevó a cabo [Watanabe et al. \(2007\)](#) quienes analizaron 2228 muestras de hojas de 670 especies terrestres de 26 sitios en Japón y otros tres en Indonesia, Nueva Zelanda y Suecia; registrando la acumulación de 44 elementos los cuales fueron: Ag, Al, As, Au, Ba, Br, Ca, Cd, Ce, Cl, Co, Cr, Cs, Cu, Dy, Eu, Fe, Gd, Hf, Hg, I, K, La, Lu, Mg, Mn, Mo,

Na, Nd, Ni, Rb, Sb, Sc, Se, Sm, Sr, Ta, Tb, Th, Ti, U, V, Yb y Zn. Entre estos elementos, se encuentran los ETR que tienen efectos estimulantes en bajas concentraciones en los procesos fisiológicos y bioquímicos, crecimiento, desarrollo, rendimiento en las plantas, mejora la resistencia de la planta contra el estrés y la absorción de elementos y estimula los mecanismos de resistencia de los factores bióticos y abióticos ([Kastori et al., 2010](#); [Liu et al., 2013](#); [Gómez-Merino y Trejo-Téllez, 2018](#)).

Por otra parte, los ETR tienen determinado efecto en la actividad de algunas enzimas, el contenido de fitohormonas, productividad e intensidad de fotosíntesis, desarrollo de cloroplastos, contenido de clorofila, resistencia al estrés hídrico, fijación simbiótica de nitrógeno atmosférico, germinación de semillas, el crecimiento y productividad de muchos cultivos como el arroz, caña de azúcar, remolacha azucarera, soya y girasol. Además, algunos estudios mencionan que la movilidad de los ETR difiere por la banda de Caspary de la raíz limitando su transporte en la raíz. Por lo tanto, la absorción es mucho más rápida en las hojas que a través de la raíz ([Hu et al., 2004](#); [Kastori et al., 2010](#)). Pero estos elementos pueden entrar en células mesófilas vía apoplasto y simplasto, este último por medio de puentes citoplásmicos denominados plasmodesmos, para participar en la regulación de la función fisiológica y bioquímica de las plantas ([Liu et al., 2013](#)).

## **Lantánidos**

Los lantánidos proceden del elemento químico lantano, que suele incluirse dentro de este grupo, dando un total de 15 elementos, desde el número atómico 57 al 71. La distribución electrónica de los ETR corresponde a la fórmula  $4f^{n+1}, 5s^2, 5p^6, 6s^2$ . Y la disponibilidad de los tres electrones de los subniveles  $5d$  y  $6s$  hace que todos ellos sean trivalentes, incluidos el escandio ( $3d 4s$ )<sup>3</sup>, el itrio ( $4d 5s$ )<sup>3</sup> y el lantano ( $5d 6s$ )<sup>3</sup>, pero estos últimos no tienen electrones en el orbital  $f$ . Esto representa una diferencia fundamental entre los demás elementos, ya que el orbital  $4f$  se va llenando paulatinamente, desde 0 electrones en el lantano hasta 14 electrones en el lutecio. Ellos, a su vez, se han dividido en dos series según su masa molecular: los lantánidos pesados, que son de menor concentración e incluyen el europio, el gadolinio, el terbio, el disprosio, el holmio, el erbio, el tulio, el iterbio y el lutecio; y los ligeros, como el

lantano, el cerio, el praseodimio, el neodimio, el prometio y el samario (Echeverri y Parra, 2019).

### Lantano

El lantano fue aislado en forma de óxido, como una impureza de nitrato de cerio contenida en minerales de cerita, fue descubierto por el químico sueco Carl Gustaf Mosander en 1839 quien le dio el nombre de lantano. Su nombre proviene del griego “lanthanein”, que significa el escondido, nombre concedido por las dificultades encontradas para identificarlo ya que, como ocurre con la mayoría de los metales de las tierras raras, se encuentra en minerales como cerita, xenotima y bastnasita, acompañado de otros elementos (González, 2019).

Es representado en la tabla periódica por el símbolo La, ubicado en el grupo 3, período 6 y el bloque *f*, a pesar de no tener electrones en el orbital *f*. En su forma pura es un metal plateado (**Figura 4**) bastante suave, que se empaña rápidamente en el aire. Su peso atómico es 138.9055; número atómico, 57; y densidad a 20 °C de 6.17 g cm<sup>-3</sup>. El punto de fusión de La es de 920 °C y su punto de ebullición es de 3420 °C. El lantano tiene dos isótopos estables, <sup>138</sup>La y <sup>139</sup>La, con abundancias naturales de 0.09% y 99.91%, respectivamente (Wedeen *et al.*, 2015).



**Figura 4.** Forma pura de lantano.  
(Fuente: <https://www.caracteristicass.de/lantano/>).

La química de lantano se refiere principalmente a la formación del estado de oxidación predominante +3. El La siempre se encuentra junto con otros ETR; tomados juntos como un grupo, estos elementos a menudo se llaman lantánidos (Wedeen *et al.*, 2015).

El lantano es un metal trivalente de las tierras raras que se ha utilizado ampliamente en las industrias farmacológicas, agrícolas y electrónicas (Che *et al.*, 2011); debido a su relativa escasez en la corteza terrestre no se presenta en estado elemental sino que principalmente se encuentra en la monacita ( $\text{MPO}_4$ ), un silicato que contiene fósforo y una cantidad variable de otros lantánidos o en bastnasita ( $\text{MCO}_3\text{F}$ ), un mineral perteneciente a la clase de los carbonatos (Sainz, 2016; D'Alessandro *et al.*, 2018).

### **Reservas mundiales de lantano**

El lantano siempre se encuentra junto con otros elementos de tierras raras. Las reservas mundiales de los elementos de tierras raras se encuentran en los principales países como China, Brasil, Vietnam, Rusia e India, con alrededor de unos 130 millones de toneladas. Estos minerales provienen principalmente de cuatro entornos geológicos: carbonatitas, sistemas ígneos alcalinos, depósitos de arcilla de adsorción iónica y depósitos de placeres con rodamientos de monazita y xenotime. China posee un tercio de las reservas mundiales de ETR, siendo el líder mundial en exportación y producción (Balaram, 2019).

Además, el lantano se encuentra contenido principalmente en la bastnaesita e monazita; en la década de 1990, las minas del Monte Pass en California fueron el mayor yacimiento de los elementos de las tierras raras, de donde se extraía el lantano. Sin embargo, en los últimos años la mayor producción de estos elementos se ha desplazado a minas en China, siendo en la actualidad su producción mayor al 80% mundial; mientras que, los yacimientos de monazita en Australia, Brasil, China, India, Malasia, Sudáfrica, Sri Lanka, Tailandia y los Estados Unidos constituyen el segundo segmento más grande (Wedeen *et al.*, 2015; González, 2019).

## Lantano en las plantas

### Efecto hormético

El lantano (La), miembro de los lantánidos se han aplicado actualmente en pequeñas cantidades a plantas superiores ([Kobayashi et al., 2007](#); [Brioschi et al., 2012](#)) para estimular el crecimiento y desarrollo de las plantas dentro de un fenómeno caracterizado por la estimulación de dosis bajas y la inhibición de dosis altas llamado hormesis ([Calabrese y Blain, 2009](#); [Agathokleous et al., 2018](#)). El término hormesis proviene de la antigua palabra griega hormesis que significa “poner en movimiento” o “impulsar algo”. Es conocida como una respuesta adaptativa al estrés que lleva consigo a un proceso compensatorio adaptativo contra cualquier sustancia tóxica que afecte a cualquier organismo ([Poschenrieder et al., 2013](#)).

La hormesis puede definirse como una respuesta bifásica, donde dosis altas de un elemento pueden causar la inhibición; mientras que, dosis bajas puede causar una estimulación. Estas respuestas pueden representarse mediante curvas en forma de U o J, y donde existe una alteración inicial de la homeostasis seguida de una respuesta de sobrecompensación que finalmente conduce a un restablecimiento de la homeostasis ([Vargas-Hernández et al., 2017](#)). Se ha comprobado que el lantano puede estimular el crecimiento y desarrollo de las plantas, con resultados de respuestas horméticas bifásicas ([Wang et al., 2012](#); [Liu et al., 2013](#); [Liu et al., 2016](#)).

### Efecto del lantano en plantas

Los primeros estudios con lantano fueron en 1980 en China, tuvieron el objetivo de mejorar los rendimientos de los cultivos, aunque los mecanismos de sus efectos benéficos todavía no se han aclarado completamente. Más tarde se reportaron efectos de toxicidad de  $\text{La}^{+3}$ , en la formación de brotes de *Lilium* y en raíces de cebada y trigo. Algunos estudios que investigaron la rizotoxicidad causada por  $\text{La}^{+3}$  indican que los efectos negativos en el crecimiento de la raíz podrían estar relacionados con una fuerte acción inhibidora en los canales de  $\text{Ca}^{+2}$ . De la misma manera, [Kobayashi et al. \(2007\)](#) concluyeron que, la toxicidad del lantano ( $\text{La}^{+3}$ ) en raíces de *Arabidopsis thaliana* es debida a su acción antagonista en el canal  $\text{Ca}^{+2}$ .



Como ya se había mencionado, el lantano tiene cargas trivalentes por lo tanto a una mayor densidad de carga y propiedades químicas muy similares al calcio divalente (con densidad de carga más baja), puede desplazarlo, en los sitios de unión al calcio en las moléculas biológicas. Los efectos de los ETR en los diversos procesos biológicos mediados por calcio en las plantas han sido investigados por [Brown et al. \(1990\)](#), donde los autores señalaron el término "supercalcio", refiriéndose a que el lantano es análogo al calcio. Por tanto, al usar  $\text{La}^{+3}$  es posible mitigar síntomas de deficiencia de Ca y estimular el crecimiento de las plantas, así como la estabilidad, permeabilidad y funcionamiento de las membranas celulares ([Kastori et al., 2010](#)).

Por el contrario, muchas enzimas y otras proteínas funcionales son inhibidas por La, cuando este elemento desplaza el Ca en los sitios de uniones extracelulares, el flujo de salida de Ca extracelular e intracelular puede inhibirse, lo que a su vez tiene consecuencias negativas para la planta ([Thomas et al., 2014](#)). Otros estudios mencionan el suministro de elementos de tierras raras en pequeñas cantidades, particularmente de lantano (La) y cerio (Ce) incrementa el crecimiento, la calidad y el rendimiento de diversos cultivos. La influencia del lantano en la absorción de nutrimentos puede deberse ya que es el más electropositivo de los elementos de tierras raras y resulta muy similar en sus propiedades químicas a los elementos alcalino-térreos, entre los que se encuentran el Ca y Mg ([Ramírez-Martínez et al., 2012](#)).

Particularmente el La no tiene solo efectos en calcio sino también en otros nutrimentos esenciales como K y Mg. Que han sido estudiados en diversos tipos de cultivos como algodón (*Gossypium hirsutum* L.), trigo (*Triticum aestivum* L.) y arroz (*Oryza sativa* L.), donde el suministro de lantano favorece la absorción de K. Por otra parte, la aplicación de cloruro de lantano, incrementa la actividad  $\text{K}^+$  y  $\text{Mg}^{+2}$ -ATPasas de la membrana celular bajo condiciones de deficiencia de calcio. El La al ser un catión y presentar propiedades químicas similares a los elementos Ca y K, puede tener efectos en la absorción y acumulación de éstos, los cuales son nutrimentos de suma importancia para los cultivos ([Ramírez-Martínez et al., 2012](#)).

Como se ha descrito el lantano (La) es de suma importancia en la agricultura actual, principalmente para China quien lo ocupa para mejorar la producción de sus cultivos.

Se ha evidenciado que el  $\text{La}^{+3}$ , después de entrar en el apoplasto de la raíz de los tejidos meristemáticos, se transloca a través del xilema en los brotes de plantas superiores ahí, el lantano puede estimular el crecimiento y la fotosíntesis o induce un estrés oxidativo negativo con efectos en varios atributos de la planta. Así bajas concentraciones de  $\text{La}^{+3}$  promueven la absorción de K como se había mencionado y de fósforo, así como también estimula el metabolismo de nitrógeno en algunos cultivos como el trigo. Por otro lado, las altas concentraciones pueden negativamente afectar la absorción de Ca, Fe, Cu, Zn, Mg, Mn, P y K tal como sucedió en plántulas de *Vicia faba* (Liu *et al.*, 2012).

En el cultivo de arroz el La incrementa la germinación en semillas viejas, al promover la actividad respiratoria y las actividades de las enzimas superóxido dismutasa, catalasa y peroxidasa (Olivares *et al.*, 2011; Liu *et al.*, 2012). Liu *et al.* (2013) realizaron un estudio sobre la biocumulación de La y la absorción de minerales en plantas de *Oryza sativa* L, donde descubrieron que el  $\text{La}^{+3}$  mejora el crecimiento de la raíz en bajas concentraciones y la acumulación de K, Mg, Ca, Na, Fe, Mn, Zn, Cu y Mo. Ramírez-Martínez *et al.* (2012), reportaron que la aplicación de 5 y 20  $\mu\text{M}$  La aumenta la bioacumulación de potasio, calcio y lantano en tulipán (*Tulipa generiana* L.).

Efectos negativos del lantano en el crecimiento se reportaron en *Zea mays* L. y *Vigna radiata* L. (Diatloff *et al.*, 1999; Liu *et al.*, 2018). De la misma manera, en girasol (*Helianthus annuus* L.) y pak choi (*Brassica chinensis* L.), el tratamiento con La y Nd en dosis de 268  $\text{mg kg}^{-1}$  y 335  $\text{mg kg}^{-1}$  respectivamente, ocasionaron fitotoxicidad e inhibición del crecimiento; por el contrario, dosis bajas de éstos ( $< 100 \text{ mg kg}^{-1}$ ) ocasionaron efectos positivos en brotes y raíces de girasol. El Nd en dosis de 151  $\text{mg kg}^{-1}$  y 222  $\text{mg kg}^{-1}$ , incrementaron el número de hojas y el contenido de clorofila en pak choi (Rezaee *et al.*, 2018). Torres-Flores *et al.* (2018), evaluaron los efectos de diferentes concentraciones de La en solución nutritiva de Steiner al 50% (0, 10, 20 y 30  $\mu\text{M}$ ) a partir de dos fuentes químicas [ $\text{La}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{LaCl}_3$ ] en el ciclo fenológico de dos variedades de *lisianthus* (Mariachi Blue y Echo Lavanda), concluyeron que la dosis 10  $\mu\text{M}$  La de ambas fuentes incrementa la vida de la flor en maceta. En el **Cuadro 3**, se muestran algunos estudios realizados con lantano en diversos tipos de cultivos.

**Cuadro 3.** Efectos de lantano en diversos cultivos.

Cultivo	Fuente	Dosis		Efectos
		Mínima	Máxima	
Cebada ( <i>Hordeum vulgare</i> cv. Clipper)	La <sup>+3</sup>	10 <sup>-2</sup> M	10 <sup>-4</sup> M	Unión intercelular en puntas de raíz ( <a href="#">Van steveninck et al., 1976</a> ).
Arroz ( <i>Oryza sativa</i> )	La(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	100 µg g <sup>-1</sup>	700 µg g <sup>-1</sup>	Germinación en semillas de arroz envejecidas ( <a href="#">Fashui et al., 2000</a> ).
Arabidopsis ( <i>Arabidopsis thaliana</i> )	La(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> 6H <sub>2</sub> O	0.5 mM	50 mM	Efectos del crecimiento vegetativo, iniciación floral y crecimiento reproductivo ( <a href="#">He y Loh, 2000</a> ).
Tabaco ( <i>Nicotiana tabacum</i> L.)	LaCl <sub>3</sub>	5.0 mg L <sup>-1</sup>	100 mg L <sup>-1</sup>	Crecimiento de plántulas de tabaco ( <a href="#">Chen et al., 2001</a> ).
Trigo ( <i>Triticum durum</i> )	LaPO <sub>4</sub>	0.5 mg L <sup>-1</sup>	25 mg L <sup>-1</sup>	Bioacumulación de lantano y los efectos en el crecimiento de plántulas ( <a href="#">Hu et al., 2002</a> ).
Cebada ( <i>Hordeum vulgare</i> L, cv. YC 01301)	La(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> 6H <sub>2</sub> O	2 µM	100 µM	Evaluación de los ácidos orgánicos para promover la absorción de lantano en raíces ( <a href="#">Han et al., 2005</a> ).
Lechuga ( <i>Lactuca sativa</i> L.)	La(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	0.04 mg L <sup>-1</sup>		Acumulación de metales ( <a href="#">He et al., 2004</a> ).
Arabidopsis ( <i>Arabidopsis thaliana</i> )	LaCl <sub>3</sub>	1.0 µM	1.5 µM	Mecanismos de toxicidad en el crecimiento radicular de la planta ( <a href="#">Kobayashi et al., 2007</a> ).
Trigo ( <i>Triticum durum</i> )	La(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	0.01 mM	10 mM	Germinación de semillas, crecimiento de las plántulas y en el metabolismo antioxidante ( <a href="#">D'Áquino, 2009</a> ).
Tulipán ( <i>Tulipa gesneriana</i> L.)	LaCl <sub>3</sub> y La(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> 6H <sub>2</sub> O	0.5 µM	40 µM	Efecto de fuentes y concentraciones de lantano en solución nutritiva sobre la acumulación de K, Ca y La en hojas ( <a href="#">Ramírez-Martínez et al., 2012</a> ).

Cultivo	Fuente	Dosis		Efectos
		Mínima	Máxima	
<b>Cuadro 1.3.</b> Continuación.				
Arroz ( <i>Oryza sativa</i> )	La <sup>+3</sup>	0.05 mM	1.5 mM	Efectos de lantano en el crecimiento, absorción de elementos y estrés oxidativo en plántulas (Liu <i>et al.</i> , 2012)
Arroz ( <i>Oryza sativa</i> )	La(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	0.05 mM	1.5 mM	Crecimiento en raíces y bioacumulación de nutrientes (Liu <i>et al.</i> , 2013).
Pepino ( <i>Cucumis sativus</i> L.)	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.2 mg L <sup>-1</sup>	2000 mg L <sup>-1</sup>	Inhibición en el alargamiento, biomasa radicular, reacción con el oxígeno y muerte celular en raíces de las plántulas (Ma <i>et al.</i> , 2015).
Soya ( <i>Glycine max</i> L. Merrill).	La(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> 6H <sub>2</sub> O	5 μM	160 μM	Bioacumulación y efectos sobre el crecimiento, estructura y índice mitótico de la planta (De Oliveira <i>et al.</i> , 2015).
Pimiento ( <i>Capsicum annuum</i> L. Saber, Sven, Sympathy, Yolo Wonder y Zidenka)	LaCl <sub>3</sub>		10 μM	Efectos en la calidad de plántulas de diferentes variedades sobre la altura de la planta, el diámetro del tallo y concentraciones de clorofilas, en condiciones hidropónicas (García-Jiménez <i>et al.</i> , 2017).
Lisianthus (Mariachi Blue y Echo Lavanda).	La(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> 6H <sub>2</sub> O LaCl <sub>3</sub>	10 μM	30 μM	Fenología, apertura floral, plena floración, inicio de la senescencia y duración de los tallos florales en maceta (Torres-Flores <i>et al.</i> , 2018).
Repollo ( <i>Brassica chinensis</i> L.) y girasol ( <i>Helianthus annuus</i> L.)	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20 mg kg <sup>-1</sup>	300 mg kg <sup>-1</sup>	Biomasa de las partes de la planta y producción de clorofila (Rezaee <i>et al.</i> , 2018).

## Cultivos hidropónicos

La palabra hidroponía deriva del griego Hidro (agua) y Ponos (labor o trabajo) lo que significa trabajo en agua. En la actualidad se utiliza para referirse al cultivo sin suelo ([Beltrano y Giménez, 2015](#)).

La hidroponía es la ciencia del cultivo o la producción de plantas en soluciones ricas en nutrientes o material inerte húmedo, en lugar de suelo; es decir la hidroponía significa cultivar plantas sin suelo, con fuentes de elementos esenciales en la solución nutritiva o agua enriquecida con nutrientes con un soporte de raíz mecánica inerte (arena o grava) la cual puede o no puede utilizarse ([Benton, 2014](#)).

Una solución nutritiva consiste en agua de buena calidad agronómica en la cual están disueltos: oxígeno, bióxido de carbono y todos los nutrientes requeridos para la planta para su crecimiento y desarrollo óptimo. Los nutrientes en general, son suministrados a partir de fuentes inorgánicas y en ocasiones pueden ser de origen orgánico ([Baca et al., 2016](#)).

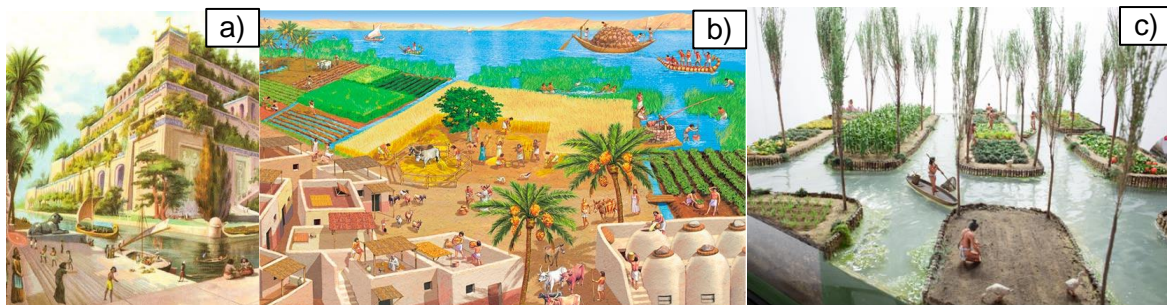
La hidroponía solía considerarse un sistema en el que no había medios de cultivo en absoluto, como la nutrient film technique (NFT), pero hoy en día se acepta un medio de cultivo sin suelo como los sustratos que se utiliza para apoyar el sistema de raíces de la planta físicamente y proporcionar un medio favorable de solución alrededor del sistema radical ([Benton, 2014](#)). Se han desarrollado técnicas con sustratos (medios que sostienen a la planta), o en sistemas con aportes de soluciones nutritivas estáticas o circulantes, sin perder de vistas las necesidades de la planta como la temperatura, humedad, agua y nutrientes, generando mayor productividad y mejor calidad en los productos ([Beltrano y Giménez, 2015](#); [Fontana et al., 2018](#)). Cabe destacar que es el sistema de cultivo más intensivo que utiliza todos los recursos de manera eficiente para maximizar el rendimiento de los cultivos y la forma más intensiva de empresas agrícolas para la producción comercial de hortalizas de invierno ([Sharma et al., 2018](#)).

Como se había mencionado anteriormente, un cultivo hidropónico está acompañado de soluciones ricas en nutrientes. Por nutriente se entiende como uno de los catorce elementos esenciales para plantas superiores, que están divididos en dos categorías:

los seis principales elementos minerales (N, P, K, Ca, Mg y S) y los siete micronutrientes (B, Cl, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni y Zn); sin embargo, también se incluye al carbono (C), hidrógeno (H) y oxígeno (O) (Benton, 2014).

### Antecedentes de la hidroponía

Los cultivos hidropónicos se han practicado durante siglos. Los más antiguos registros fueron los antiguos Jardines Colgantes de Babilonia del año 600 a. C., consideradas una de las siete maravillas de la antigüedad. Además, jeroglíficos fechados varios siglos antes de cristo, describen la siembra de plantas en agua sin suelo a lo largo del Nilo llamados “los jardines egipcios” (Bosques, 2010). En el siglo XVI, los aztecas se vieron forzados a ubicarse en las orillas pantanosas del Lago de Texcoco, localizado en el gran valle central de lo que es actualmente México. Estas poblaciones eran maltratadas por sus vecinos más poderosos que les negaron tierra cultivable, y del cual sobrevivieron construyendo balsas de caña y juncos unidas por sus tallos donde apilaban materia orgánica del fondo del lago, sobre el cual se cultivaban flores y verduras en la superficie de lagos y lagunas del Valle de México, gran parte de lo que era el lago de Xochimilco era ocupado por Chinampas. En la **Figura 5**, se muestran algunas imágenes de los cultivos hidropónicos en la antigüedad. Sobre este suelo sembraron sus plantas, cuyas raíces traspasaban el material hasta llegar al agua conocidas como Chinampas (Benton, 2014; Beltrano y Giménez, 2015).



**Figura 5.** Cultivos hidropónicos en la antigüedad. a) Cultivos colgantes en Babilonia, b) Jardines egipcios en el Rio Nilo. c) Cultivos aztecas conocidos como “Chinampas”.

(Fuente: <https://sites.google.com/site/7maravillasedn/home/los-jardines-colgantes-de-babilonia;>  
[https://www.cinconoticias.com/arquitectura-egipcia-caracteristicas-tecnicas-ejemplos/;](https://www.cinconoticias.com/arquitectura-egipcia-caracteristicas-tecnicas-ejemplos/)  
<https://ichi.pro/es/la-primera-agricultura-regenerativa-de-las-americas-85696972109033>).

En 1600, el belga Jan van Helmont realizó experimentos donde demostraba que las plantas obtenían sustancias de crecimiento del agua. En 1699, John Woodward de la Real Sociedad Inglesa experimentó creciendo plantas en agua con diferentes suelos, concluyendo que las plantas crecen como resultado de ciertas sustancias y minerales en el agua extraídas del suelo. Esta mezcla de agua y suelo fue el primer intento de producir una solución nutritiva. En 1860, los alemanes Sachs y Knop fueron los primeros en hacer crecer las plantas en una solución nutritiva, llamada el proceso “nutriculture” ([Bosques, 2010](#)).

El cultivo sin tierra de las plantas fue entonces popularizado en la década de 1929, donde William F. Gricke, profesor de la Universidad Berkeley de California, definió el término “hidroponía” para describir sus métodos de cultivo en soluciones nutritivas a escala comercial. Para mediados de 1940, Robert y Alice Withrow, de la Universidad de Purdue, desarrollaron un método más práctico. Su sistema alternaba inundación y drenaje de un envase donde la planta se sostenía con grava con solución nutritiva ([Bosques, 2010](#)).

Durante la Segunda Guerra Mundial, el ejército de los Estados Unidos estableció grandes jardines hidropónicos en varias islas del Pacífico occidental para suministrar verduras frescas a las tropas que operaban en esa zona. Al finalizar la guerra y confirmar el éxito de la hidroponía comenzaron a construirse grandes fincas hidropónicas en Estados Unidos, principalmente en Florida, lamentablemente en la mayoría, la pobre construcción y el mal manejo causó su fracaso. Sin embargo, la idea siguió expandiéndose a través del mundo, especialmente en Holanda, Francia, España, Inglaterra, Alemania, Suiza, la Unión Soviética e Israel ([Bosques, 2010](#)).

Para 1970, la entrada de los plásticos permitió una simplificación del diseño y una operación más fácil y económica de los sistemas, teniendo más disponibilidad de las cubiertas para invernadero, las tuberías PVC para los sistemas de alimentación, las bombas inyectoras de nutrientes y los tanques de reserva hechos de plástico. En la década de los 80's, la técnica de la hidroponía fue utilizada como un uso comercial para la producción de hortalizas y flores ([Bosques, 2010](#); [Benton, 2014](#)).

## **Ventajas y desventajas de los sistemas hidropónicos**

Son muchas las ventajas que ofrecen los sistemas hidropónicos sobre el cultivo tradicional. Entre éstas se incluyen las siguientes ([Bosques, 2010](#); [Benton, 2014](#)):

- Es una técnica apropiada en lugares donde no es posible la agricultura en suelo (zonas desérticas secas o regiones de clima frío).
- Un sistema hidropónico puede instalarse en cualquier lugar.
- Se puede colocar a una altura conveniente para trabajar.
- Se puede sembrar prácticamente cualquier vegetal o flor, siempre y cuando se cumplan las condiciones apropiadas para el cultivo.
- Permite cultivar la misma especie ciclo tras ciclo.
- Se reduce el impacto al medio ambiente causado por el desmonte que afecta a la vida silvestre, al hábitat de los bosques y la erosión.
- Requiere menos mano de obra.
- Mantiene la humedad uniforme y controlada.
- Facilita el control de pH.
- Mantiene el equilibrio entre aire, agua y nutrientes.
- Permite corregir deficiencias y excesos de fertilizantes.
- Elimina o reduce la aparición de insectos, hongos y bacterias.
- Rinde más por unidad de superficie.
- Logra productos de mayor calidad.
- Acorta el tiempo para la cosecha.

Entre las desventajas encontramos las siguientes:

- Es necesario tener habilidades y conocimientos acerca de las especies que se siembran, así como conocimientos de química inorgánica.
- Los costos iniciales y operativos son más altos que el cultivo en suelo.
- Requiere mantenimiento y cuidado de las instalaciones, solución nutritiva, materiales, etcétera.



- Algunas enfermedades como *Fusarium* y *Verticillium* pueden propagarse rápidamente a través del sistema. Sin embargo, se han creado variedades resistentes a estas enfermedades.

### **Sistemas de cultivos hidropónicos**

Los sistemas hidropónicos se personalizan y modifican según el reciclaje y la reutilización de la solución nutritiva. Algunas técnicas de hidroponía son las siguientes:

- **Sistema mecha o sistema wick**

Es el sistema hidropónico más simple ya que no requiere electricidad, bomba y aireadores. Las plantas se colocan en un medio absorbente como fibra de coco, vermiculita o perlita con una mecha de nylon que se encuentra desde las raíces de las plantas hasta un contenedor de solución nutritiva, para suministrar las plantas a través de la acción capilar. Este sistema funciona bien para plantas pequeñas, que no necesitan mucha agua ([Sharma et al., 2018](#)).

- **Sistema Ebb y Flow**

Un sistema de flujo y reflujó, también conocido como sistema de inundación y drenaje, depende de la distribución intermitente de agua (inundación) para una planta o serie de plantas almacenadas en un medio inerte. El medio es principalmente para estabilizar la planta y no es necesario tener solución nutritiva. En un verdadero sistema de flujo y reflujó hidropónico, toda la nutrición es suministrada por la solución nutritiva. Es posible cultivar diferentes tipos de cultivos, pero los problemas comunes son la podredumbre de la raíz, algas y moho ([Sharma et al., 2018](#)).

- **Sistema por goteo**

El sistema hidropónico por goteo es el método más utilizado entre los cultivos comerciales. La solución de agua o nutrientes del depósito se proporciona a las raíces individualmente a cada una de las plantas en proporciones adecuadas con la ayuda de la bomba ([Sharma et al., 2018](#)).

- **Sistema Deep Water Culture**

El sistema Deep Water Culture (DWC) o cultivación en agua profunda es sistema hidropónico donde las plantas crecen con las raíces sumergidas en una solución fertilizante aireada. Las plantas se colocan en macetas y las raíces se suspenden en solución nutritiva donde crecen rápidamente. Es este tipo de sistemas es necesario monitorear las concentraciones de oxígeno y nutrientes, salinidad y pH. Funciona bien para plantas más grandes que producen frutas, especialmente pepino y tomate crecen bien en este sistema ([Sharma et al., 2018](#)).

- **Sistema de la técnica de película nutritiva (NFT)**

Desarrollada en la década de 1960 en Inglaterra por el Dr. Alen Cooper. En este sistema, el agua o una solución nutritiva circulan por todo el sistema y entra en los canales de crecimiento a través de una bomba de agua. El sistema está ligeramente inclinado para que la solución nutritiva recircule a través de las raíces y regrese de nuevo a un depósito ([Benton, 2014](#); [Sharma et al., 2018](#)).

- **Sistema aeropónico**

Es una técnica hidropónica de alta tecnología donde consistía en la aplicación de agua y elementos esenciales de la planta mediante goteros nebulizadores que bañan las raíces ([Benton, 2014](#)).

- **Sistema de raíz de raíz flotante**

Es un sistema en el cual se prescinde de un sustrato y las plantas crecen directamente en la solución nutritiva ([Moreno-Pérez, 2015](#)).

### **Sistema de raíz flotante**

Existe dos tipos de sistemas hidropónicos, el sistema abierto cuando la solución drenada no se reutiliza y se permite la infiltración en el sitio o se conduce fuera del invernadero; y el sistema cerrado, si la solución nutritiva se recoge para ser utilizada nuevamente en el cultivo, previamente esterilizada y ajustada en el pH, conductividad eléctrica (CE) y concentración de nutrientes. Debido al incremento del uso de

fertilizantes y al impacto en el ambiente se han buscado sistemas más eficientes por ellos los sistemas hidropónicos abiertos empiezan a ser sustituidos por los sistemas hidropónicos cerrados, tales como el sistema de raíz flotante ([Sánchez del Castillo et al., 2014](#); [Moreno-Pérez, 2015](#)).

Los sistemas de raíz flotante pueden ser desarrollados sin sustrato como soporte; esta técnica consiste básicamente en trasplantar plantas sobre láminas de poliestireno expandido que se mantienen a flote sobre contenedores con solución nutritiva que es oxigenada de manera frecuente. Además, este tipo de sistema es ideal para el cultivo de plantas de bajo tamaño por ejemplo las lechugas y algunas plantas aromáticas; esta técnica permite mejorar la disponibilidad de nutrimentos, reduce la competencia entre plantas y reduce el ciclo de la planta obteniendo rendimientos antes de lo esperado ([Soria, 2012](#)).

Sin embargo, se han destacado ciertas desventajas en el sistema tales como: el incremento gradual de la CE en la solución nutritiva con el paso del tiempo, desbalance de la solución nutritiva generada por la acumulación de los iones menos consumidos por la planta ( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ ), lo que rompe el equilibrio de nutrimentos y en la mayoría de las veces incrementa la CE a niveles que afectan el crecimiento y rendimiento; por último tienen un mayor riesgo de dispersar enfermedades que atacan a la raíz. Es por ello que se recomienda desechar la solución nutritiva y monitorear constantemente este sistema ([Sánchez del Castillo et al., 2014](#)).

Esta técnica consiste básicamente en trasplantar plantas sobre largas superficies de unícel que se mantienen a flote sobre contenedores con solución nutritiva que es oxigenada de manera frecuente. Este sistema permite obtener producciones automatizadas, y si se cuenta con las herramientas adecuadas requiere de cuidados mínimos (como el control de plagas) ya que los problemas con plagas, asociados con el suelo no existen y el tiempo de cosecha de la mayoría de los cultivos se ve acelerado ([Soria, 2012](#)).

# CAPÍTULO I. LANTANO EN CRECIMIENTO, DESARROLLO Y CALIDAD DE LECHUGA EN UN SISTEMA DE RAÍZ FLOTANTE

## 1.1 INTRODUCCIÓN

Los elementos de tierras raras son un grupo de 17 elementos de la tabla periódica, y son utilizados para crear productos de alta calidad con fines industriales, tecnológicos, medicinales incluso dentro de los últimos años se han usado en la agricultura. Estos elementos de tierras raras tienen propiedades físicas y químicas similares y no son elementos esenciales para la vida de los organismos; asimismo, no se han caracterizado por ser especialmente tóxicos dado que no han sido reportados accidentes de envenenamiento en humanos o en las cadenas tróficas ([Mesa-Pérez et al., 2018](#)). La dosis recomendada por la Organización Mundial de la Salud es de 2.250 mg día<sup>-1</sup> que equivale a un comprimido de 750 mg en cada comida. Dado que dentro de la salud humana el lantano se presenta en comprimidos masticables de 500 mg, 750 mg y 1.000 mg con el propósito de controlar las fosfatemia ([Torregrosa, 2008](#)).

El suministro de lantano en plantas provoca un aumento en la biomasa de los cultivos favoreciendo su crecimiento, desarrollo, rendimiento y calidad ([Duarte et al., 2018](#); [Agathokleous et al., 2018](#)). En términos de poscosecha, el lantano puede influir en la preservación del cultivo de lechuga dado que puede alargar su vida bajo condiciones de invernadero promoviendo la actividad de antioxidantes enzimáticos como superóxido dismutasa (SOD), catalasa (CAT), ascorbato peroxidasa, glutatión-s-transferasa y glutatión reductasa, que favorece el contenido de clorofila, altura, área foliar, pesos fresco y seco ([Huang y Zhou, 2006](#); [Liu et al., 2012](#)).

Por lo tanto, tal y como menciona [Jia et al. \(2005\)](#), una concentración adecuada de La promueve la actividad de los sistemas antioxidantes los cuales ayudan a controlar la producción de las especies reactivas de oxígeno (ROS) ([Ippolito et al., 2011](#)). Sin embargo, actualmente México presenta escenarios alarmantes sobre la producción de alimentos, debido a los problemas con el medio ambiente, crecimiento poblacional, escasez de agua, tierras no fértiles, erosión del suelo natural o inducido por el hombre, exceso de insumos agrícolas, sequía, heladas, granizadas entre otros factores.

(Moreno *et al.*, 2011; Bollo *et al.*, 2014; FAO, 2020). Por ello se han implementado nuevas alternativas para producir alimentos en corto periodo y de excelente calidad. Lo que conlleva a combinaciones de cultivos hidropónicos con la incorporación de elementos de tierras raras.

## **1.2 OBJETIVO GENERAL**

Evaluar el efecto de diferentes dosis de cloruro de lantano suministradas en la última fase del ciclo productivo, en el crecimiento, calidad y rendimiento del cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.), en un sistema de raíz flotante bajo condiciones en invernadero.

## **1.3 HIPÓTESIS GENERAL**

Al menos una dosis de cloruro de lantano, suministrada en la fase final del ciclo productivo, mejorará indicadores de crecimiento, calidad y rendimiento en la lechuga (*Lactuca sativa* L.) en un sistema hidropónico de raíz flotante, bajo condiciones de invernadero.

## **1.4 MATERIALES Y MÉTODOS**

### **1.4.1. Localización del sitio experimental**

El presente estudio se realizó durante los meses de abril a julio de 2021 dentro de un invernadero ubicado en el Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, Texcoco, Estado de México, cuyas coordenadas geográficas son 19°27'42.98" N, 98°54'31.95" O y 2245 m de altitud.

### **1.4.2. Área del experimento**

El invernadero utilizado para este experimento es perteneciente del área de Nutrición Vegetal, caracterizado por ser de tipo túnel con estructura metálica cubierta de plástico blanco y con malla antiáfidos en los laterales (**Figura 1.1**), su superficie estaba cubierta de ground cover blanco para invernadero que evitaba la proliferación de arvenses. Durante la fase experimental se registraron los promedios de temperatura diurna de 22.46 °C, nocturna de 13.84 °C, con una humedad relativa de 30.7% durante el día y

en la noche de 56.3%, una intensidad luminosa de  $352.320 \text{ lum pie}^{-2}$ , durante un periodo de 14 h (6:00 a 20:00 horas).



**Figura 1.1.** Invernadero donde se estableció el presente estudio.  
(Fotografía: Guadalupe Contreras Martínez, 2021<sup>®</sup>).

### 1.4.3. Diseño experimental

El diseño experimental utilizado para el presente experimento fue completamente al azar con cinco tratamientos: T1: (Testigo  $0 \mu\text{M LaCl}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , A); T2: ( $7.5 \mu\text{M LaCl}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , B); T3: ( $15 \mu\text{M LaCl}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , C); T4: ( $22.5 \mu\text{M LaCl}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , D); y T5: ( $30 \mu\text{M LaCl}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , E). Cada tratamiento con cuatro repeticiones (**Figura 1.2**).

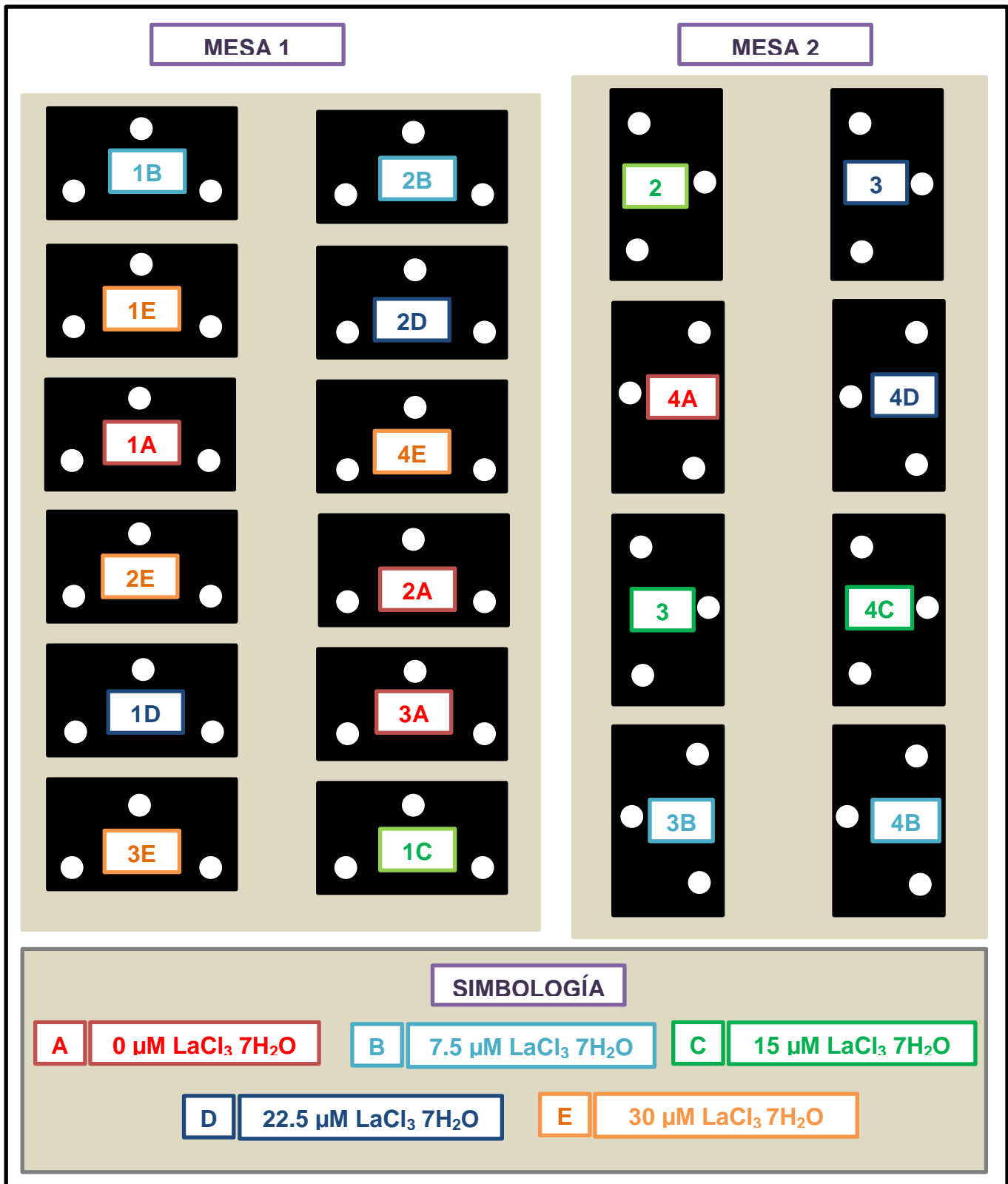


Figura 1.2. Diseño experimental con sus respectivos tratamientos.

#### 1.4.4. Semillas de lechuga y sustrato utilizado para la germinación de semillas

Se utilizaron semillas de lechuga (*Lactuca sativa* L.) comercializadas por Pacifica Seed Company de la variedad "Parris Island Coss". Para la instalación del semillero se usó como sustrato turba por sus propiedades físicas, químicas y biológicas que permiten una excelente germinación y crecimiento de las plántulas gracias a que retiene la humedad y posee una estructura adecuada (Ortega *et al.*, 2010; Hernández-Rodríguez *et al.*, 2017).

#### 1.4.5. Establecimiento del semillero y mantenimiento

Las semillas se pusieron a germinar bajo condiciones de invernadero usando malla sombra (monofilamento negro calibre 70%), con una temperatura diurna promedio de 26.68 °C y nocturna media de 16.88 °C, humedades relativas en promedio de diurna y nocturnas de 34.7% y 45.8% y una intensidad lumínica de 243.1 lum pie<sup>-2</sup>, durante un periodo de 14 h (6:00 a 20:00 horas). Las semillas se colocaron en charolas de 200 cavidades. Se regaron cada segundo día para evitar la proliferación de hongos o bacterias; una vez que las plantas emergieron a los 9 días después de la siembra (DDS) se inició el riego de una solución nutritiva de Steiner al 10%. En el **Cuadro 1.1**, se puede apreciar la composición de la solución nutritiva al 10%, a la cual se le ajustó el pH a un valor de 5.50 con la finalidad de garantizar la disponibilidad nutrimental.

**Cuadro 1.1.** Composición de la solución nutritiva al 10%.

Fuente	g L <sup>-1</sup>	g 20 L <sup>-1</sup>
Nitrato de calcio tetrahidratado	0.1062675	2.12535
Sulfato de magnesio heptahidratado	0.049294	0.98588
Fosfato de potasio	0.013609	0.27218
Nitrato de potasio	0.03033	0.6066
Sulfato de potasio	0.0261375	0.52275
Tradecorp AZ	0.0665	1.33



Este riego se llevó a cabo en alternación con un riego normal y cada vez que se regaba con solución nutritiva se hacía con mucho cuidado para evitar quemaduras en las hojas verdaderas de la lechuga (**Figura 1.3**).



**Figura 1.3.** Primer riego a los 9 DDS con solución nutritiva al 10%.  
(Fotografía: Guadalupe Contreras Martínez, 2021®).

A los 13 DDS se colocó el Hobo, un dispositivo capaz de medir la humedad, luz y temperatura del ambiente en el área experimental. Conforme las plántulas iban creciendo se decidió realizar un aclareo a los 19 DDS para solo dejar una plántula por cada cavidad y evitar la competencia entre por espacio, luz y nutrimentos.

#### **1.4.6. Establecimiento del sistema de raíz flotante**

##### **Preparación de las cajas de almacenamiento de 12 L**

Se ocuparon cajas plástico con dimensiones de 33 cm de ancho, 40 cm de largo, 14.5 cm de alto y con capacidad de 12 L las cuales se pintaron de color negro con el propósito de evitar el paso de luz adentro de las cajas y evitar la reproducción de algas y contaminación de la solución nutritiva.

Una vez pintadas, las tapas de las cajas se perforaron la tapadera a una distancia de 15 cm entre cada orificio con un diámetro de 5 cm con el propósito de tener tres plantas en cada caja y en medio de la tapadera se hicieron dos pequeños orificios de 0.5 cm para poder introducir la manguera de oxigenación (**Figura 1.4**).



**Figura 1.4.** Instalación del sistema de raíz flotante.  
(Fotografía: Guadalupe Contreras Martínez, 2021<sup>®</sup>).

### **Instalación del sistema de oxigenación**

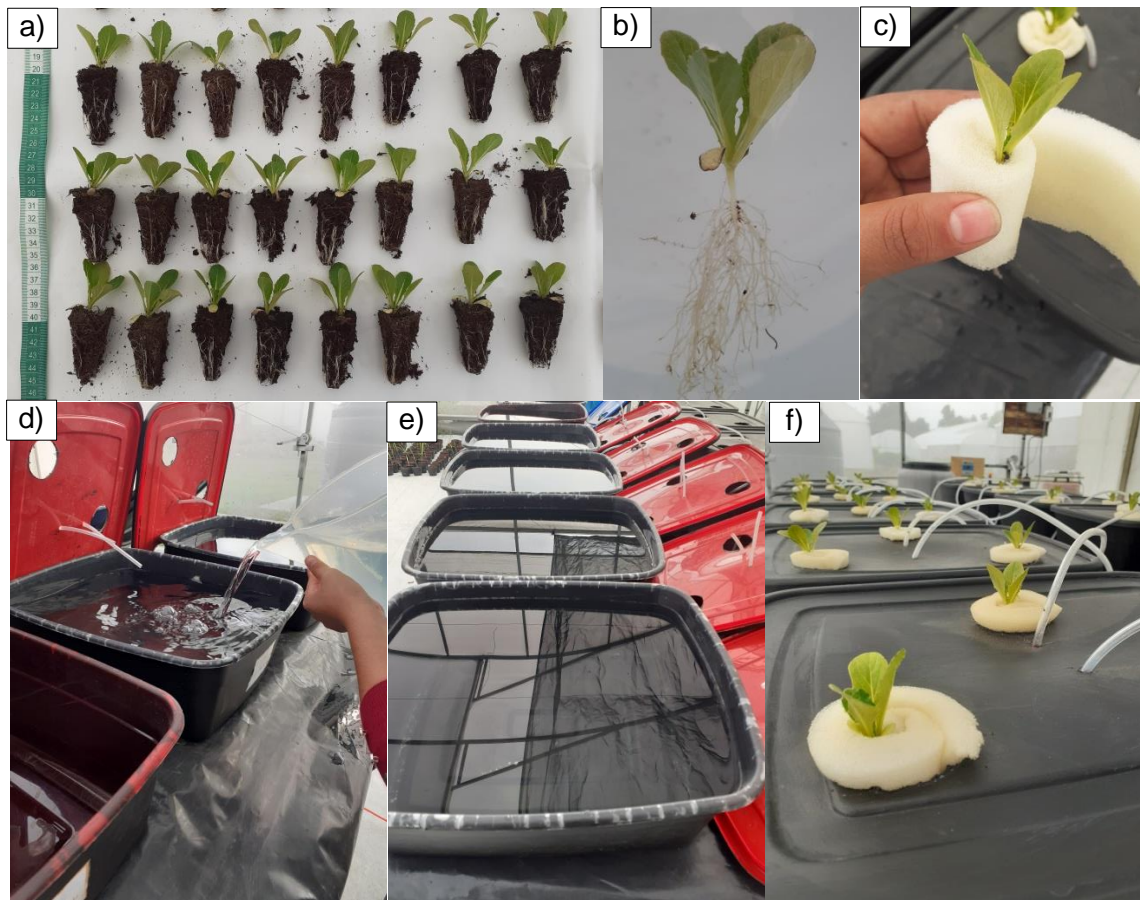
Debido que el sistema de raíz flotante no es recirculante, el agua se queda estancada y con el tiempo va perdiendo la oxigenación generando bacterias y hongos que dañan a la raíz de la planta y la absorción de nutrimentos. Para evitarlo, se colocó manguera de pecera adentro de los contenedores con el fin de proporcionar una oxigenación adecuada para el crecimiento y desarrollo de las plantas; por último, se conectó la manguera a una bomba de oxigenación, para posteriormente adaptar un temporizador de 8 tiempos, programados cada 3 hora con periodos de oxigenación de 15 minutos.

#### **1.4.7. Trasplante de plántulas al sistema de raíz flotante**

A los 34 DDS se realizó el trasplante de las plántulas a las cajas de almacenamiento en sus respectivos lugares ya establecidos con una solución nutritiva de Steiner al 10%, dado que presentaban entre 4 a 5 hojas lo que indicaba aptas para trasplantar.

Para el trasplante se procuró retirar la plántula de lechuga del semillero con mucho cuidado, para posteriormente enjuagarla con agua normal, retirar todos los residuos de la turba y evitar alguna contaminación en la solución nutritiva. Una vez que las plántulas estuvieron limpias, se enrolló la base del tallo con espuma como soporte para ser colocadas en las perforaciones de las cajas. Por otra parte, con mucho cuidado se

colocó la solución nutritiva al 10%, en las cajas de almacenamiento hasta aforarlas a 12 L (Figura 1.5).



**Figura 1.5.** Traslante de lechugas “Parris Island Coss” en raíz flotante: a) retiro de plántulas con almácigo, b) enjuague de plántulas, c) enrollamiento de esponja como soporte, d) y e) llenado de cajas con solución nutritiva y f) trasplante final.

(Fotografía: Guadalupe Contreras Martínez, 2021<sup>®</sup>).

#### **1.4.8. Mantenimiento del sistema de raíz flotante**

Conforme las plántulas de lechuga fueron creciendo, la demanda nutrimental incrementó; por lo que 7 días después del trasplante (DDT), se incrementó la concentración de la solución nutritiva de Steiner al 50%; asimismo, 15 DDT se usó la solución completa (100%).

Por otra parte, durante estos periodos se realizó el monitoreo y ajuste del pH en la solución nutritiva en cada una de las charolas a 5.50, empleando  $H_2SO_4$  y un

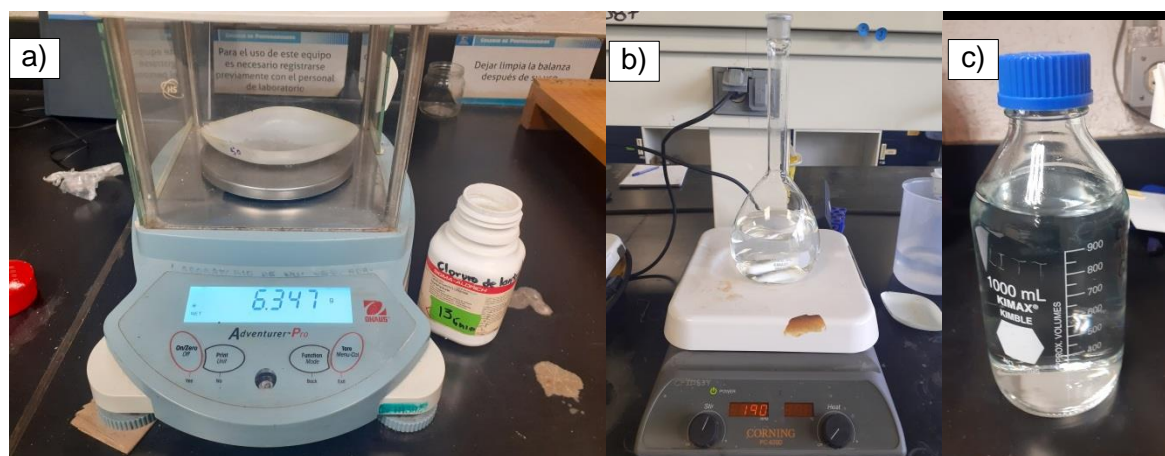
potenciómetro. También se realizó medición de la conductividad eléctrica (C. E.) dado que el rango adecuado para el crecimiento de los cultivos se encuentra entre 1.5 a 3.0 dS m<sup>-1</sup>; en lechuga es preferible el rango de C. E. de 1.5 a 2.5 dS m<sup>-1</sup>, valores superiores afectan la absorción de agua y por ende la absorción nutrimental (Carrasco *et al.*, 2007; Moreno-Pérez *et al.*, 2015).

#### 1.4.9. Incorporación de cloruro de lantano

##### Preparación de solución madre de cloruro de lantano

La preparación de una solución madre de LaCl<sub>3</sub> 7H<sub>2</sub>O (CAS 10025-84-0, SIGMA-ALDRICH) se realizó en el laboratorio de Nutrición Vegetal en el Colegio de Posgraduados Campus Montecillo, Texcoco, Estado de México.

Para la elaboración de esta disolución se pesaron 6.3474 g y se disolvieron en agua destilada en un matraz volumétrico de 1 L, lo que dio como resultado una concentración (**Figura 1.6**).



**Figura 1.6.** Preparación del cloruro de lantano: a) peso del reactivo, b) preparación de la mezcla homogénea y c) recipiente del cloruro de lantano.

(Fotografía: Guadalupe Contreras Martínez, 2021<sup>®</sup>).

##### Incorporación del cloruro de lantano

A los 19 DDT y de acuerdo con el diseño experimental, se incorporó el cloruro de lantano, para el cálculo de los volúmenes en cada dosis, se usó la siguiente fórmula:

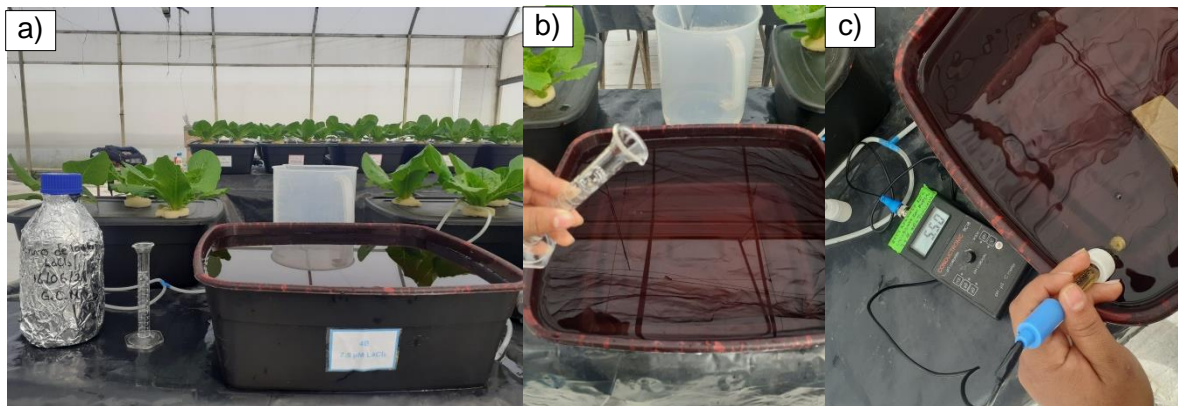
$$V1C1 = V2C2$$

Dónde: la concentración uno (C1) corresponde 20,000  $\mu\text{M}$  La, la concentración dos (C2) corresponde a cada uno de los tratamientos y el volumen dos (V2) 12 L (capacidad del contenedor). Los volúmenes de la solución nutritiva (V1) se presentan en el **Cuadro 1.2**.

**Cuadro 1.2.** Volumen correspondiente de  $\text{LaCl}_3$  para cada tratamiento.

V1 (L)	C1 ( $\mu\text{M}$ )	V2 (L)	C2 ( $\mu\text{M}$ )
0.0000	20, 000	12	0.0
0.0045	20, 000	12	7.5
0.0090	20, 000	12	15.0
0.0135	20, 000	12	22.5
0.0180	20, 000	12	30.0

Una vez teniendo los volúmenes requeridos a cada uno se incorporó el cloruro de lantano en cada uno de los tratamientos como se muestra en la **Figura 1.7**, para posteriormente ajustar el pH a 5.50.



**Figura 1.7.** Incorporación de cloruro de lantano: a) e b) incorporación del cloruro de lantano en cada tratamiento y c) ajuste del pH a 5.50.

(Fotografía: Guadalupe Contreras Martínez, 2021<sup>®</sup>).

#### **1.4.10. Variables evaluadas**

##### **Parámetros de crecimiento**

Las variables evaluadas en este estudio de investigación (métodos y época de medición), se describen a continuación.

La primera evaluación se realizó previo a la aplicación de los tratamientos a los 18 DDT; posteriormente, se realizaron las siguientes evaluaciones a los 5, 10, 15 y 17 días después del inicio de tratamientos (23, 28, 33 y 35 DDT):

- Número de hojas.
- Altura de la planta y longitud de raíz, se determinó con la ayuda de un flexómetro de 5 m (HUANAN, China).
- Lectura SPAD (Soil Plant Analysis Development), obtenida con el clorofilometro portátil SPAD-502 (KONICA MINOLTA, Inc.).
- Diámetro del tallo con un vernier digital (Truper, CALDI-6MP, México).

Al momento de la cosecha (17 días después del inicio de tratamientos, 35 DDT) se determinaron:

- Área foliar con ayuda de un integrador (LI-COR, LI-3100C, Lincoln, NE, EEUU).
- Biomasa fresca de follaje y raíz por planta con una balanza analítica (Adventurer Pro AV213C, Ohaus, EEUU).
- Longitud de raíz con ayuda de un flexómetro de 5 m (HUANAN, China).
- Biomasa seca de follaje y raíz, las cuales estas se colocaron en bolsas de papel por cada planta a una estufa de aire forzado (Riossa, HCF-125D, México) por 72 h a 70 °C. Una vez deshidratadas se pesaron en una balanza analítica (Adventurer Pro AV213C, Ohaus, EEUU).

##### **Parámetros de calidad**

Al momento de la cosecha (17 días después del inicio de tratamientos, 35 DDT) se determinaron las variables a continuación descritas.

### **Concentración y acumulación de nutrimentos y lantano**

Se realizaron dos digestiones en hojas y raíz previamente molidas en seco en una licuadora (Oster, EEUU). Para la determinación de N se empleó una digestión con la mezcla de ácido sulfúrico-salicílico usando el método semimicro-Kjeldahl. El extracto resultante se destiló y se ocuparon como reactivos de H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> y como indicador metilo-rojo. Una vez destiladas las muestras se titularon con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> al 0.05 N. Como última digestión se usó agua regia para la determinar las concentraciones de P, K, Ca, Mg, S, Fe, Cu, Zn, Mn, B y La, una mezcla de HCl al 37%, HNO<sub>3</sub> al 65.7% y agua desionizada, bajo plancha a una temperatura de 100 °C durante 2.5 h y se leyeron en el equipo de espectroscopia de emisión atómica de inducción por plasma acoplado (Agilent, ICP-Optical Emission Spectrometer, 725-ES, EEUU).

### **Concentración de clorofilas a, b, total y carotenoides**

Para la determinación de la concentración de clorofila *a*, clorofila *b*, clorofila total y carotenoides se utilizaron las muestras foliares previamente molidas con nitrógeno líquido. La extracción se realizó con acetona al 80% como se describe en el método de [Lichtenthaler \(1987\)](#). Se pesaron 100 mg de material fresco en tubos de 2.0 mL y se adicionaron 1.5 mL de acetona al 80% para posteriormente centrifugar las muestras durante 3 min a 10000 rpm y 4 °C. El sobrante se retiró usando una micropipeta y se colocó en un frasco ámbar de 25 mL este procedimiento se repitió tres veces y finalmente se aforó el frasco a 10 mL. Las lecturas de la absorbancia se realizaron en un espectrofotómetro (JENWAY, 6715 UV/Vis. Spectrophotometer, Multi-cell changer. UK) en las siguientes longitudes de onda 470, 647 y 663 nm tomando 1 mL de cada muestra y para el blanco se utilizó acetona al 80%. Las concentraciones se determinaron con las siguientes fórmulas:

$$\text{Clorofila } a = (12.25 \times A_{663nm}) - (2.79 \times A_{647nm})$$

$$\text{Clorofila } b = (21.5 \times A_{647nm}) - (5.1 \times A_{663nm})$$

$$\text{Clorofila total} = (7.15 \times A_{663nm}) - (18.7 \times A_{647nm})$$

$$\text{Carotenoides} = \frac{(1000 \times A_{647nm}) - (1.82 \times \text{Clorofila } a) - (85.02 \times \text{Clorofila } B)}{198}$$

### **Azúcares solubles totales**

La determinación de azúcares totales se realizó en hojas y raíces por el método descrito por Bailey (1958), para lo cual se ocupó alcohol al 80% y una solución de antrona con ácido sulfúrico. De igual manera, se realizó la preparación de una solución con glucosa para la curva estándar. Al finalizar la metodología se leyeron las muestras y la glucosa con una absorbancia de 620 nm en un espectrofotómetro (JENWAY, 6715 UV/Vis. Spectrophotometer, Multi-cell changer. UK), y las concentraciones se determinaron mediante la siguiente ecuación que se obtuvo de la curva estándar  $y = 0.0316x - 0.0059$ .

### **Ácido ascórbico**

La concentración de ácido ascórbico se realizó en hojas empleando la metodología descrita por Reiss (1993) por medio de titulación con solución de Tillman (2,6-diclorofenolindofenol de sodio al 0.02%). Usando una solución de ácido ascórbico con ácido oxálico al 0.5% para posteriormente titular con la solución Tillman hasta que la aparición de un color rosa pálido. Para las muestras se ocupó 1 mL de jugo de las hojas, obtenido con un extractor (Hamilton Beach, 67606-MX) al cual se le añadieron 30 mL de ácido oxálico para posteriormente tomar una alícuota de 5 mL y titular con solución Tillman. La concentración de ácido ascórbico se determinó utilizando las siguientes fórmulas:

$$F = \frac{\text{Masa del ácido ascórbico usada en la titulación (mg)}}{\text{Volumen de la solución Tillman usada en la titulación (mL)}}$$

$$\text{mg de ácido ascórbico por alícuota} = \text{Volumen titulado de la muestra (mL)} \times F$$

$$\text{Concentración de ácido ascórbico} \left( \frac{\text{mg}}{100\text{g}} \right) =$$

$$\text{mg de ácido ascórbico por alícuota} \times \frac{\text{Volumen total del extracto (mL)}}{\text{Volumen de la alícuota (mL)}} \times \frac{100 \text{ g}}{\text{peso de la muestra (g)}}$$



#### 1.4.11. Análisis estadístico

En primera instancia se utilizaron gráficos y pruebas de contraste de normalidad y tras comprobar su fiabilidad estadística los datos obtenidos del experimento se analizaron mediante un análisis de varianza y la prueba de comparación de medias de Tukey con un nivel de significancia del 5% ( $\alpha=0.05$ ) del software SAS (statistical analysis systems) (versión 9.0) para Windows.

### 1.5. RESULTADOS

#### 1.5.1. Número de hojas y altura de la planta

El ciclo productivo del cultivo de lechuga bajo un sistema de raíz flotante duró 36 días después del trasplante (DDT), durante los últimos 17 d del ciclo de cultivo, las plantas fueron tratadas con  $\text{LaCl}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  en la solución nutritiva.

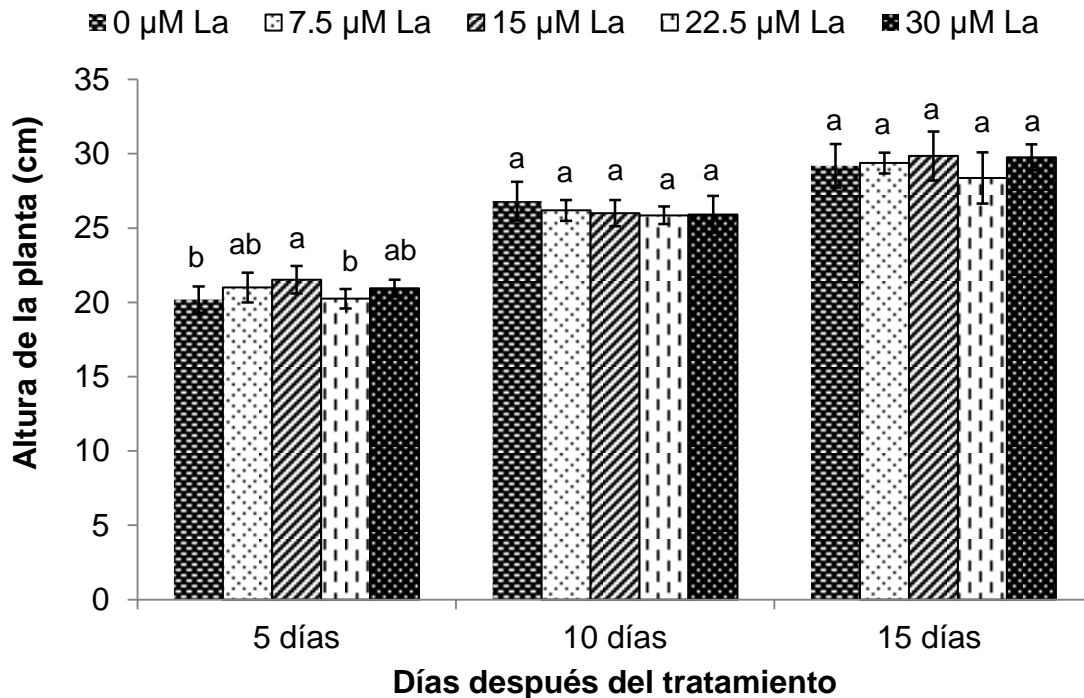
Después de 5 d de tratamiento, las dosis 7.5 y 30  $\mu\text{M}$  La superaron en 11.5 y 13.5%, respectivamente, el número de hojas del tratamiento testigo. Esta tendencia se mantuvo después de 10 d de tratamiento, con incrementos de 14.1 y 18.3% en los mismos tratamientos, con respecto al testigo. Después de 15 d de tratamiento, solo se observaron diferencias estadísticas en el número de hojas entre los tratamientos 7.5 y 15  $\mu\text{M}$  La, siendo el primero mayor en 31.7% al segundo (**Cuadro 1.3**).

**Cuadro 1.3.** Número de hojas en plantas de lechuga var. “Parris Island Coss”, tratadas con diferentes dosis de La durante la fase terminal del ciclo productivo.

Lantano ( $\mu\text{M}$ )	Número de hojas		
	5 días	10 días	15 días
0.0	13.00 $\pm$ 0.93 b	15.00 $\pm$ 0.93 c	21.87 $\pm$ 2.47 ab
7.5	14.50 $\pm$ 0.53 a	17.12 $\pm$ 1.25 ab	23.25 $\pm$ 1.98 a
15.0	13.37 $\pm$ 0.52 b	15.87 $\pm$ 1.13 bc	15.87 $\pm$ 9.82 b
22.5	13.37 $\pm$ 0.52 b	15.62 $\pm$ 0.92 bc	23.25 $\pm$ 1.67 a
30.0	14.75 $\pm$ 0.46 a	17.75 $\pm$ 1.16 a	26.75 $\pm$ 1.83 a

Medias  $\pm$  DE con letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ),  $n=8$ .

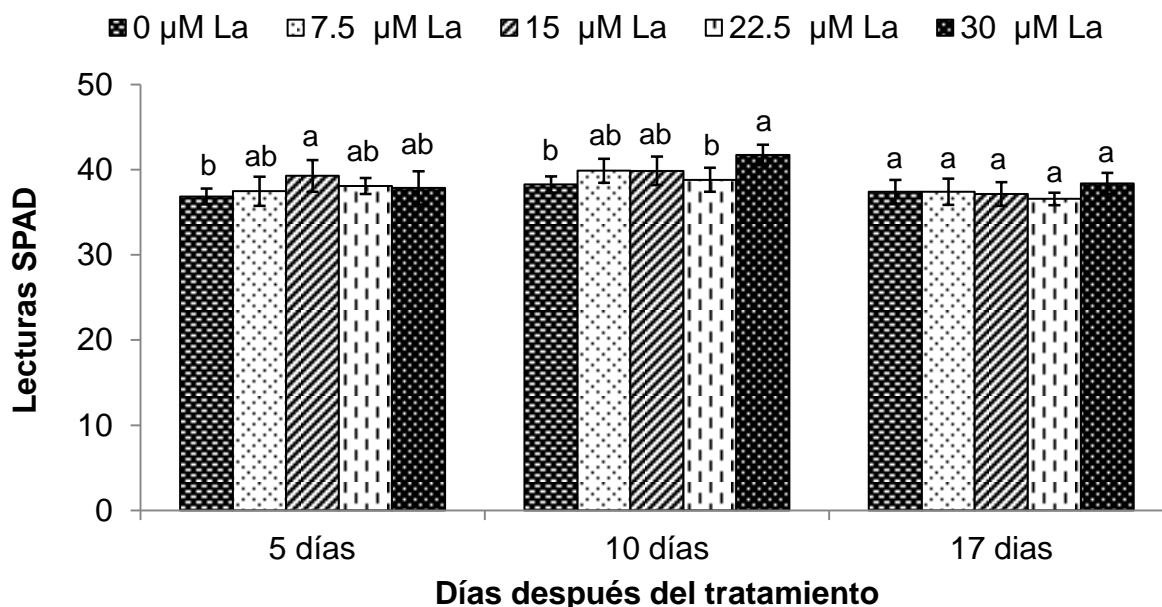
En lo que respecta a la altura de planta, solo se registraron diferencias después de 5 d del inicio de tratamientos; destaca que la dosis 15  $\mu\text{M}$  La superó en 6.6% al tratamiento testigo (**Figura 1.8**).



**Figura 1.8.** Altura de plantas de lechuga var. “Parris Island Coss”, tratadas con diferentes concentraciones de La, 5, 10 y 15 días después de la incorporación de cada una de las dosis. Medias  $\pm$  DE con letras distintas sobre las barras de cada medición, indican diferencia significativa (Tukey,  $P \leq 0.05$ )  $n=8$ .

### 1.5.2. Lecturas SPAD

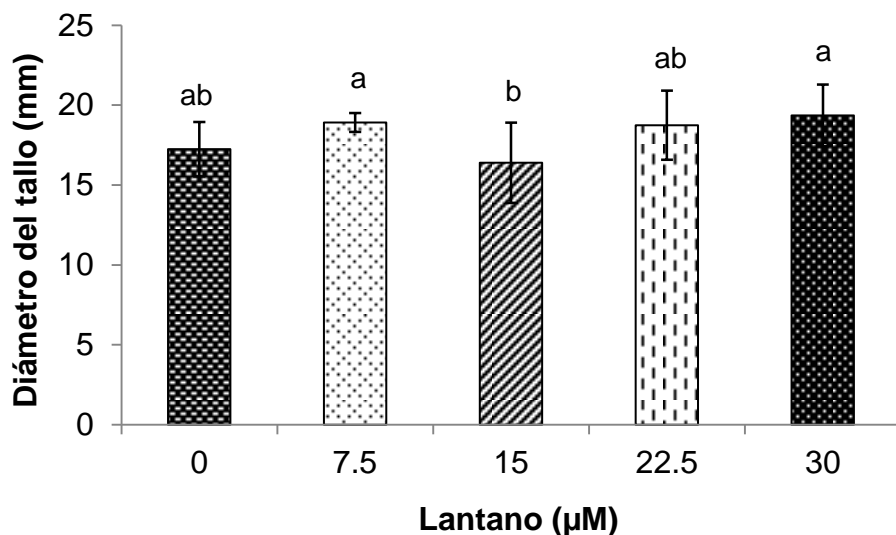
Las lecturas SPAD mostraron diferencias después de 5 d del inicio de tratamientos, observándose que, la dosis 15  $\mu\text{M}$  La incrementó esta variable en 6.6%, respecto al testigo. De la misma manera, después de 10 d del inicio de tratamientos, las lecturas SPAD del tratamiento 30  $\mu\text{M}$  La superaron a las del testigo en 9%. En la última evaluación realizada (17 d después del inicio de tratameintos), no hubo diferencias entre tratamientos (**Figura 1.9**).



**Figura 1.9.** Lecturas SPAD en plantas de lechuga var. “Parris Island Coss”, tratadas con diferentes concentraciones de La, 5, 10 y 17 días después de la incorporación de cada una de las dosis. Medias  $\pm$  DE con letras distintas sobre las barras de cada medición, indican diferencia significativa (Tukey,  $P \leq 0.05$ )  $n=8$ .

### 1.5.3. Diámetro del tallo

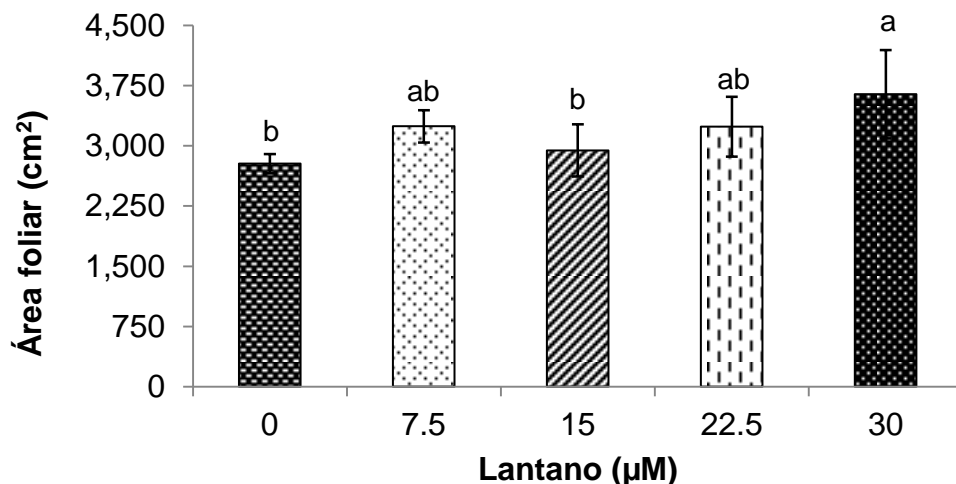
Al finalizar el cultivo de lechuga y después de 17 d de tratamiento con La, el diámetro de tallo presentó diferencias estadísticas solo entre plantas tratadas con La. Las dosis 7.5 y 30  $\mu\text{M}$  La superaron en 13.3 y 15.3% al tratamiento con 15  $\mu\text{M}$  La, respectivamente (**Figura 1.10**).



**Figura 1.10.** Diámetro de tallo en plantas de lechuga var. “Parris Island Coss”, tratadas con diferentes concentraciones de La, 17 días después de la incorporación en cada una de las dosis. Medias  $\pm$  DE con letras distintas sobre las barras de cada medición, indican diferencia significativa (Tukey,  $P \leq 0.05$ )  $n=10$ .

#### 1.5.4. Área foliar

Se observó un efecto positivo de la dosis 30  $\mu\text{M}$  La en el área foliar de la lechuga, con un aumento del 31.1% con respecto al testigo (**Figura 1.11**).



**Figura 1.11.** Área foliar en plantas de lechuga var. “Parris Island Coss”, tratadas con diferentes concentraciones de La, 17 días después de la incorporación en cada una de las dosis. Medias

± DE con letras distintas sobre las barras de cada medición, indican diferencia significativa (Tukey,  $P \leq 0.05$ ) n=5.

### 1.5.5. Longitud de raíz durante la fase terminal y en la cosecha

Se observó que plantas tratadas con 15  $\mu\text{M}$  La tuvieron incrementos en la longitud de raíz de 18.4 y 19.4% después de 10 y 15 d del inicio de tratamientos, respectivamente; en ambos casos con respecto al testigo. Por otra parte, el tratamiento 7.5  $\mu\text{M}$  La redujo esta variable después de 10 d, en 13.8% respecto al testigo. Después de 17 d de tratamiento, no existieron diferencias significativas (**Cuadro 1.4**).

**Cuadro 1.4.** Longitud de raíz en plantas de lechuga var. "Parris Island Coss", tratadas con diferentes dosis de La durante la fase terminal del ciclo productivo.

Lantano ( $\mu\text{M}$ )	Longitud de raíz (cm)		
	10 días	15 días	17 días
0.0	47.00 ± 2.51 b	50.88 ± 2.75 b	43.08 ± 5.34 a
7.5	40.50 ± 4.06 c	49.25 ± 3.11 b	38.08 ± 6.10 a
15.0	55.63 ± 3.42 a	60.75 ± 5.87 a	42.50 ± 3.45 a
22.5	48.00 ± 4.14 b	53.63 ± 4.17 b	44.50 ± 8.09 a
30.0	48.50 ± 4.14 b	53.13 ± 5.69 b	46.00 ± 4.43 a

Medias ± DE con letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ), n=8.

En la **Figura 1.12**, se presenta el aspecto de las plantas, después de 17 d de tratamiento con La, se aprecia que no existen diferencias sustantivas en la longitud de las raíces.



**Figura 1.12.** Foto comparativa de los tratamientos durante la cosecha a los 36 DDT en plantas de lechuga var. “Parris Island Coss”, tratadas con diferentes concentraciones de La y donde se puede apreciar la longitud de raíz en cada tratamiento.

### 1.5.6. Biomasa fresca de vástago, raíz y total

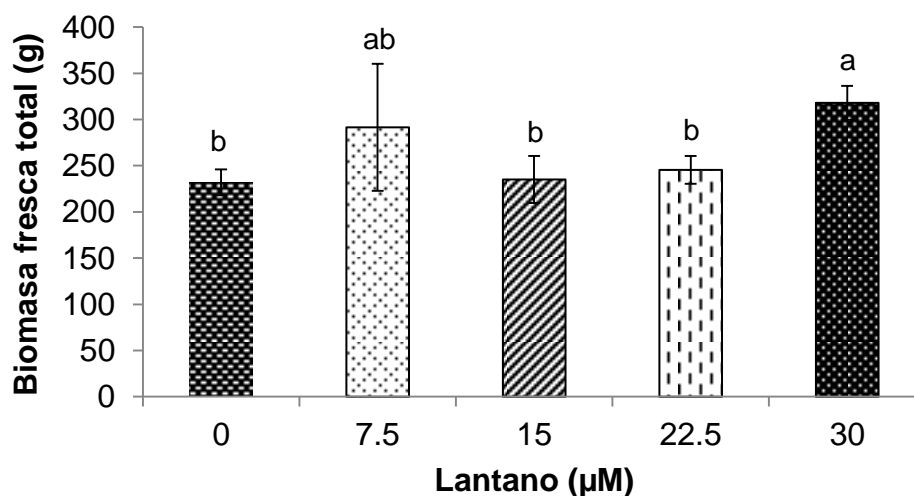
Las diferentes concentraciones de La tuvieron efecto significativo en el peso de biomasa fresca tanto de vástago como de raíz. En vástago, el tratamiento con 30  $\mu\text{M}$  La incrementó en 37.4% la biomasa fresca. En raíz, la media más alta también se registró en plantas tratadas con 30  $\mu\text{M}$  La, superando en 62.2% a la biomasa fresca de raíces del tratamiento 15  $\mu\text{M}$  La.

**Cuadro 1.5.** Biomasa fresca de vástago y raíz en plantas de lechuga var. "Parris Island Coss", tratadas con diferentes dosis de La durante la fase terminal del ciclo productivo.

Lantano( $\mu\text{M}$ )	BFV	BFR
0.0	190.00 $\pm$ 17.75 b	42.08 $\pm$ 11.45 ab
7.5	242.19 $\pm$ 67.38 ab	49.34 $\pm$ 8.15 ab
15.0	199.93 $\pm$ 29.01 ab	35.16 $\pm$ 10.40 b
22.5	198.64 $\pm$ 21.25 ab	46.82 $\pm$ 10.20 ab
30.0	260.99 $\pm$ 19.74 a	57.02 $\pm$ 3.36 a

Medias  $\pm$  DE con letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ),  $n=5$ . BFV: Biomasa fresca de vástago y BFR: Biomasa fresca de raíz.

Respecto a la biomasa fresca total, se puede apreciar que la dosis 30  $\mu\text{M}$  La ocasionó un incremento de ésta en 37, 35.3 y 29.6% respecto al testigo, 7.5 y 22.5  $\mu\text{M}$  La (Figura 1.13).



**Figura 1.13.** Biomasa fresca total en plantas de lechuga var. “Parris Island Coss”, tratadas con diferentes concentraciones de La, después de 17 días del inicio de tratamientos. De la incorporación de cada una de las dosis. Medias  $\pm$  DE con letras distintas sobre las barras de cada medición, indican diferencia significativa (Tukey,  $P \leq 0.05$ )  $n=5$ .

### 1.5.7. Biomasa seca de vástago, raíz y total

La biomasa seca de vástago fue mayor en plantas tratadas con 30  $\mu\text{M}$  La, que superó a plantas testigo en 45.8%. Por otra parte, en el peso de biomasa seca de raíz no se registraron diferencias significativas entre tratamientos (**Cuadro 1.6**).

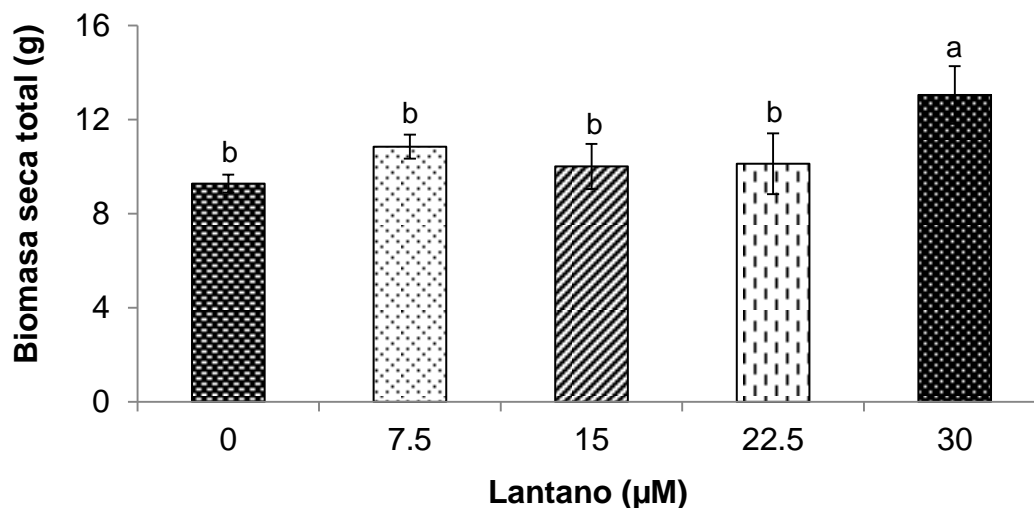
**Cuadro 1.6.** Biomasa seca de vástago y raíz en plantas de lechuga var. “Parris Island Coss”, tratadas con diferentes dosis de La durante la fase terminal del ciclo productivo.

Lantano ( $\mu\text{M}$ )	BSV	BSR
0.0	8.05 $\pm$ 0.52 b	1.22 $\pm$ 0.39 a
7.5	9.35 $\pm$ 0.56 b	1.49 $\pm$ 0.36 a
15.0	9.04 $\pm$ 1.08 b	0.96 $\pm$ 0.24 a
22.5	9.02 $\pm$ 1.14 b	1.10 $\pm$ 0.26 a
30.0	11.74 $\pm$ 1.23 a	1.30 $\pm$ 0.23 a

Medias  $\pm$  DE con letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas significativas (Tukey,  $P \leq 0.05$ ),  $n=5$ . BSV: Biomasa seca de vástago y BSR: Biomasa seca de raíz.

De igual manera, las diferentes concentraciones de La tuvieron un efecto significativo para el peso de biomasa seca total, del cual se puede observar en la **Figura 1.14**. La biomasa seca total de plantas tratadas con la dosis 30  $\mu\text{M}$  La superó en 40.51% a la biomasa de plantas testigo. Asimismo, superó en promedio en 26.5% al resto de tratamientos con La (7.5, 15 y 22.5  $\mu\text{M}$  La).





**Figura 1.14.** Biomasa seca total en plantas de lechuga var. “Parris Island Coss”, tratadas con diferentes concentraciones de La. Medias  $\pm$  DE con letras distintas sobre las barras de cada medición, indican diferencia significativa (Tukey,  $P \leq 0.05$ )  $n=5$ .

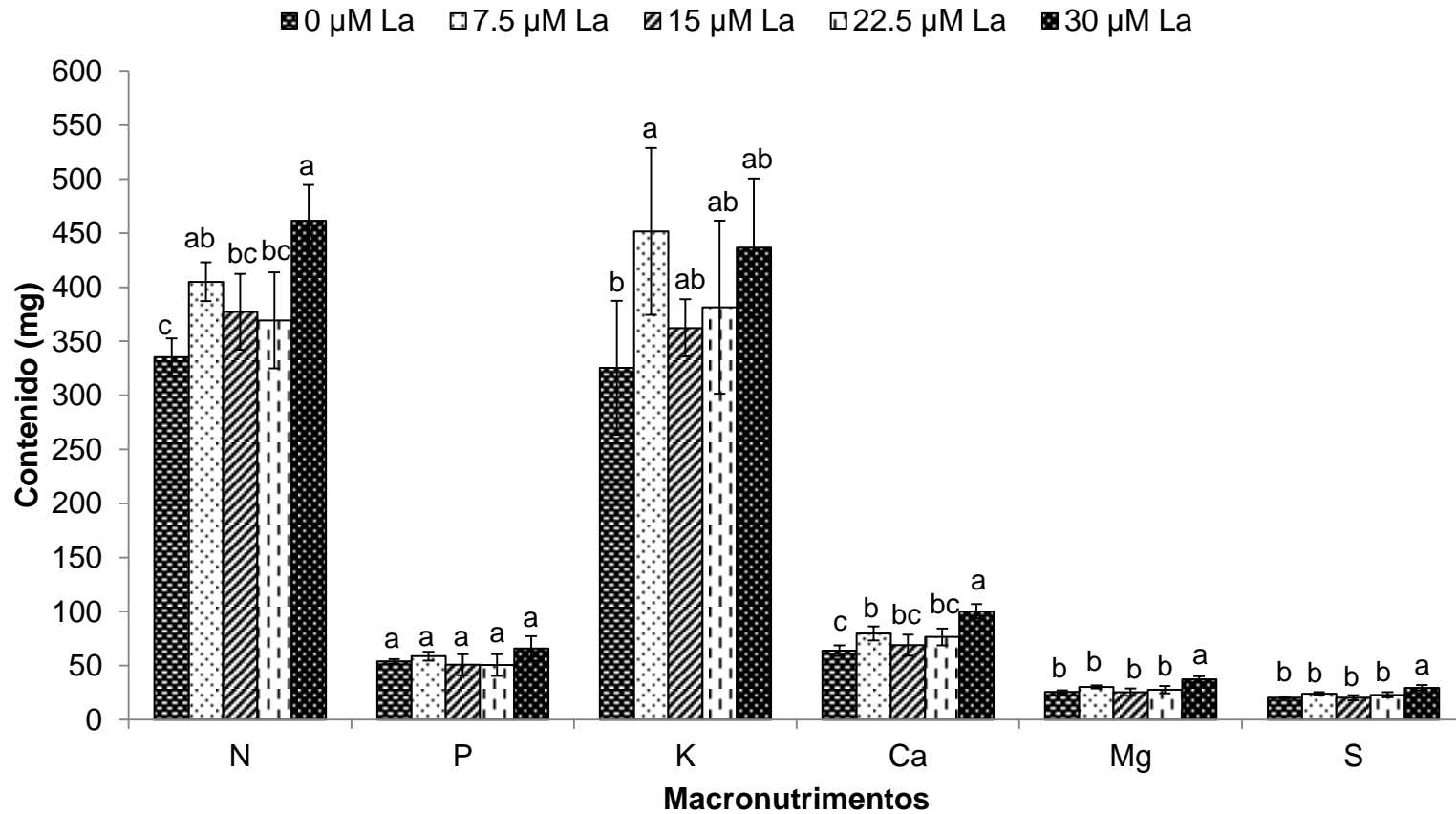
#### 1.5.8. Contenido nutrimental de la parte aérea en lechuga

Las concentraciones de lantano incorporadas en la solución nutritiva Steiner dentro de un sistema de raíz flotante tuvieron efectos significativos en el contenido de macronutrientes en la parte aérea de la planta. En la **Figura 1.15** se observa un aumento significativo en el contenido de N con la dosis 30  $\mu\text{M}$  La, respecto al testigo, dicho aumento fue de 27.31%. Este tratamiento también incrementó el contenido de N con respecto a los tratamientos 7.5 y 15  $\mu\text{M}$  La.

El contenido de P no fue diferente entre tratamientos. Por otro lado, el contenido de K fue mayor en 38.8% en plantas tratadas con 7.5  $\mu\text{M}$  La respecto al testigo (**Figura 1.15**).

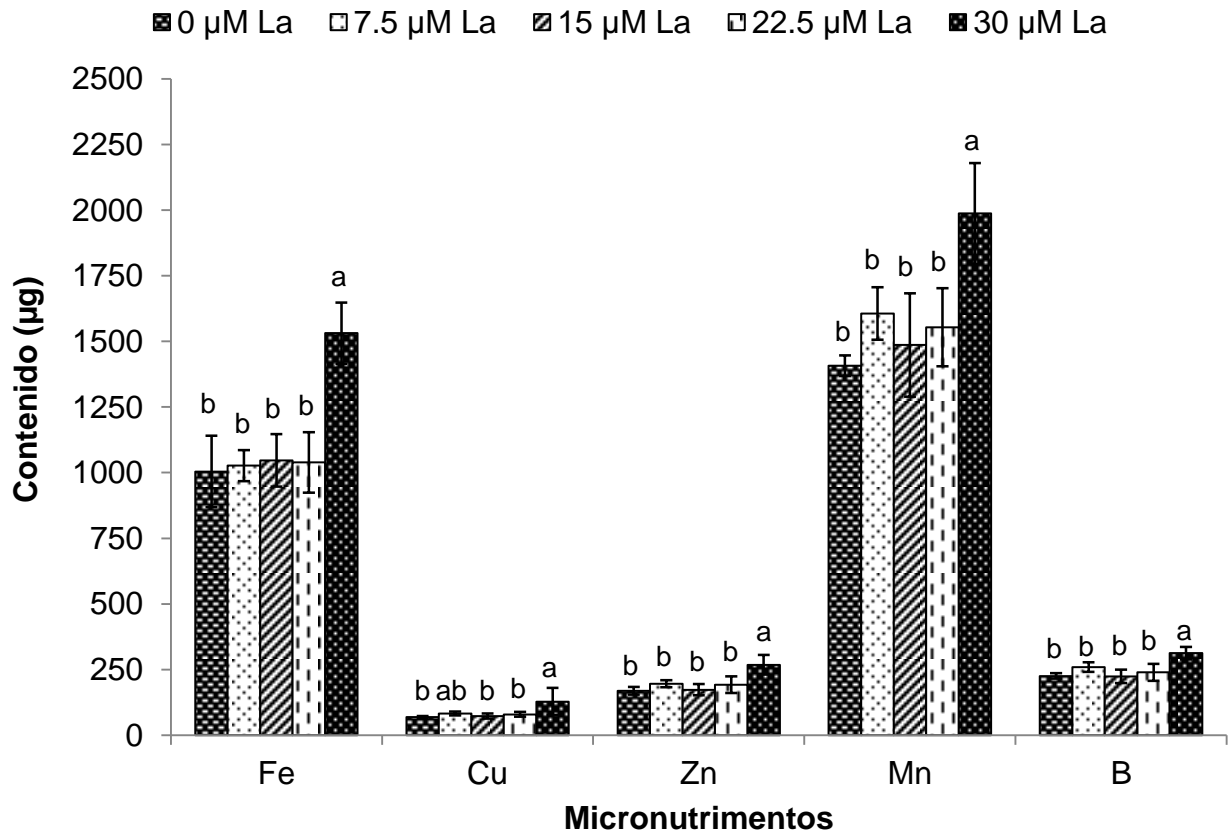
Por otra parte, la dosis 30  $\mu\text{M}$  La ocasionó el mayor contenido de Ca en parte aérea, superando en 57, 25.6, 45.5 y 31% al testigo y a las dosis 7.5, 15 y 22.5  $\mu\text{M}$  La, respectivamente (**Figura 1.15**).

La misma tendencia observada para Ca, se registró en Mg y S. La dosis 30  $\mu\text{M}$  La incrementó en 45.7% el contenido de Mg y en 44.6% el contenido de S, en ambos casos respecto al testigo (**Figura 1.15**).



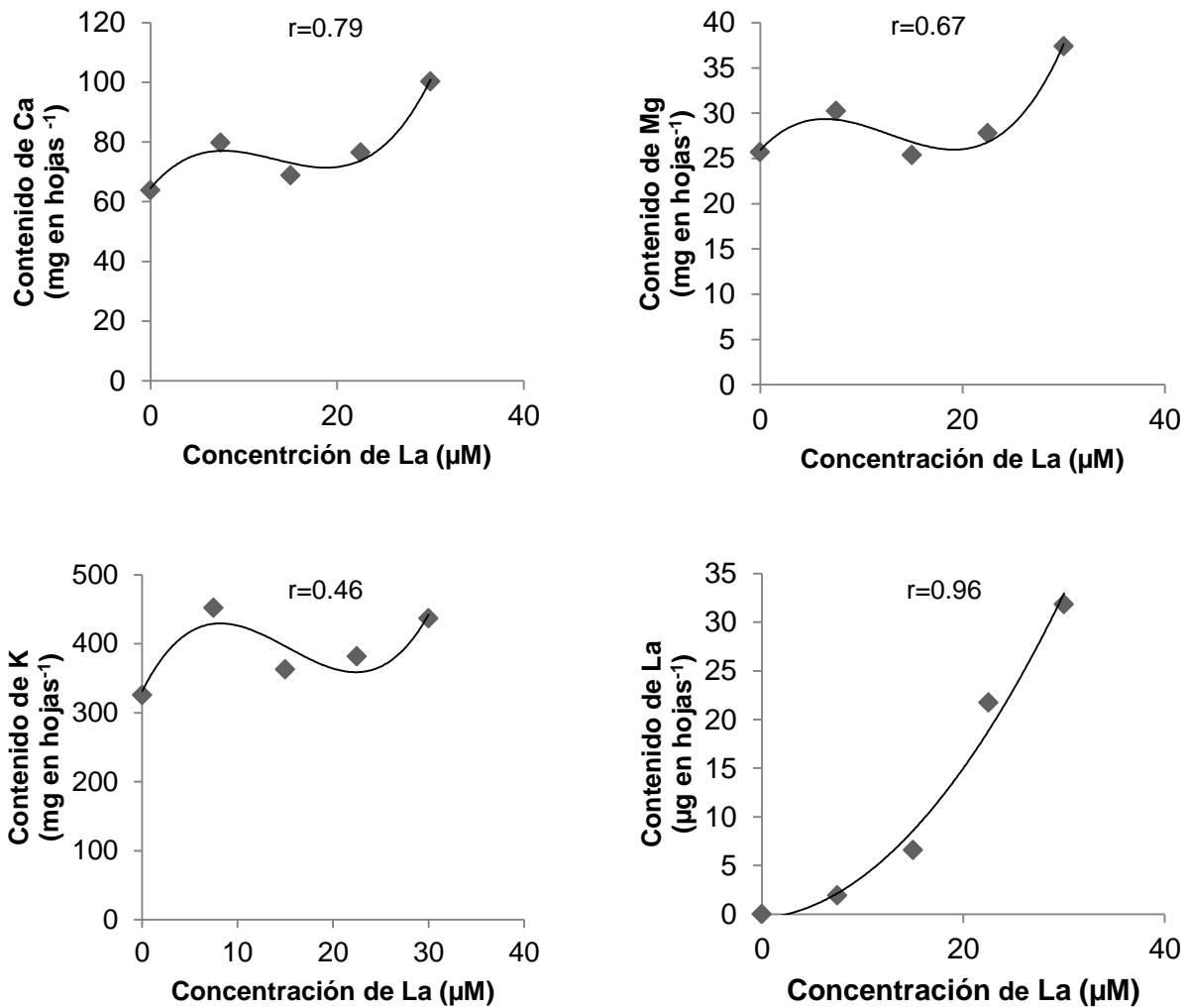
**Figura 1.15.** Contenido de N, P, K, Ca, Mg y S en plantas de lechuga var. “Parris Island Coss”, tratadas con diferentes concentraciones de La bajo un sistema de raíz flotante. Medias  $\pm$  DE con letras distintas sobre las barras de cada medición, indican diferencia significativa (Tukey,  $P \leq 0.05$ )  $n=5$ .

Por otro lado, el contenido de los micronutrientes evaluados fue significativamente aumentado con el tratamiento 30  $\mu\text{M}$  La. Estos aumentos, respecto al testigo, fueron de 52.5% para Fe, de 85% para Cu, de 58.4% para Zn, de 41.1% para Mn y de 38.6% para B (**Figura 1.16**).



**Figura 1.16.** Contenido de Fe, Cu, Zn, Mn y B en plantas de lechuga var. “Parris Island Coss”, tratadas con diferentes concentraciones de La bajo un sistema de raíz flotante. Medias  $\pm$  DE con letras distintas sobre las barras de cada medición, indican diferencia significativa (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).  $n=5$ .

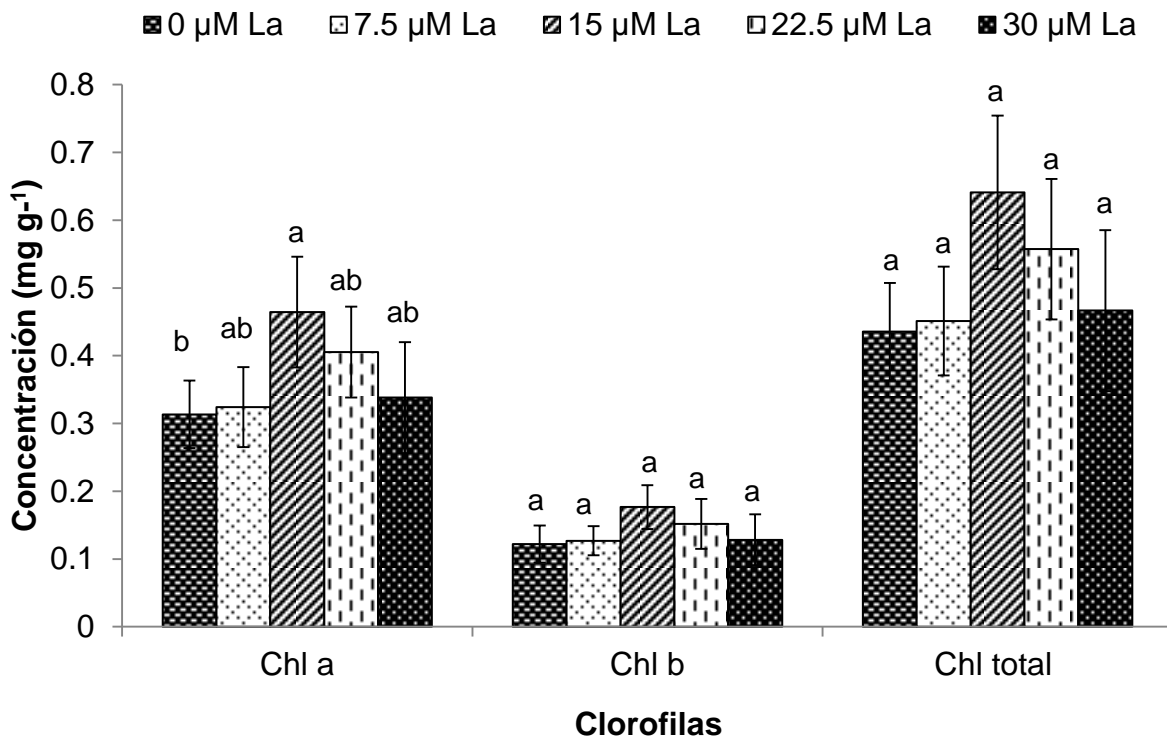
Por otra parte, en la **Figura 1.17** se presentan las tendencias de correlación entre los contenidos de Ca, Mg, K y La con las concentraciones de La, adicionadas a la solución nutritiva. Se aprecian correlaciones positivas; sin embargo, los valores de coeficientes de correlación fueron muy variados, el más bajo ( $r= 0.46$ ) se registró entre K; valores medios ( $r= 0.67$  y  $r=0.79$ ) fueron para Mg y Ca; mientras que entre el contenido de La y el suministro de este elemento, se aprecia una correlación muy alta ( $r=0.96$ ).



**Figura 1.17.** Curvas de acumulación de calcio (Ca), magnesio (Mg), potasio (K) y lantano (La) en hojas de lechuga var. “Parris Island Coss”, tratadas con diferentes concentraciones de La bajo un sistema de raíz flotante ( $r$ =coeficiente de correlación).

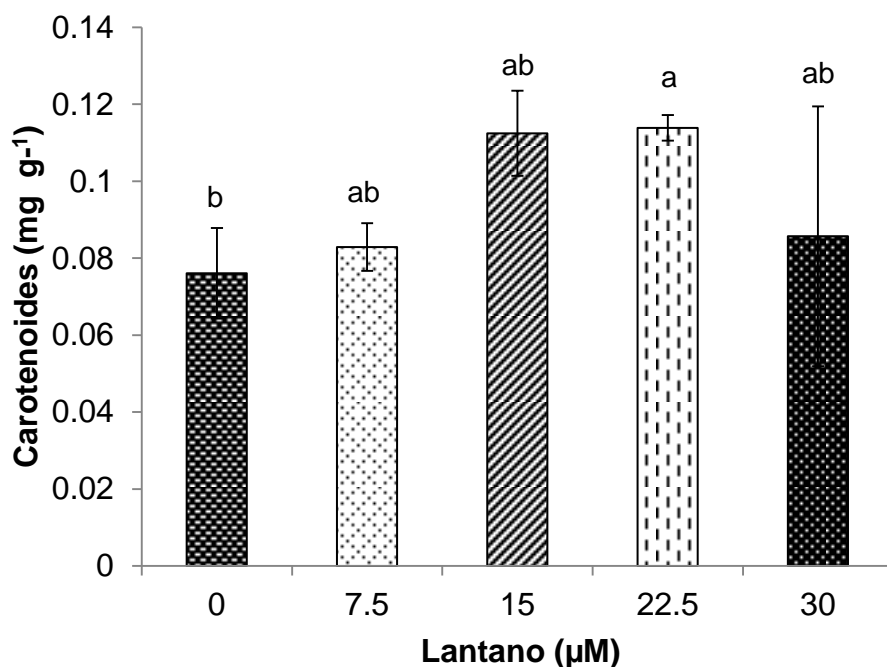
### 1.5.9. Concentración de clorofila *a*, *b*, total y carotenoides

Los resultados de las concentraciones de clorofila *a*, *b* y total evaluadas al finalizar el ciclo productivo en hojas recientemente maduras, se presentan en la **Figura 1.18**. Solo las concentraciones de clorofila *a* fueron influenciadas de forma significativa por los tratamientos evaluados. El tratamiento 15 µM La incrementó en 48.1% la concentración foliar de clorofila *a*, con respecto al testigo.



**Figura 1.18.** Concentración de clorofilas *a*, *b* y total en plantas de lechuga var. “Parris Island Coss”, tratadas con diferentes concentraciones de La bajo un sistema de raíz flotante. Medias ± DE con letras distintas sobre las barras de cada medición, indican diferencia significativa (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).  $n=4$ .

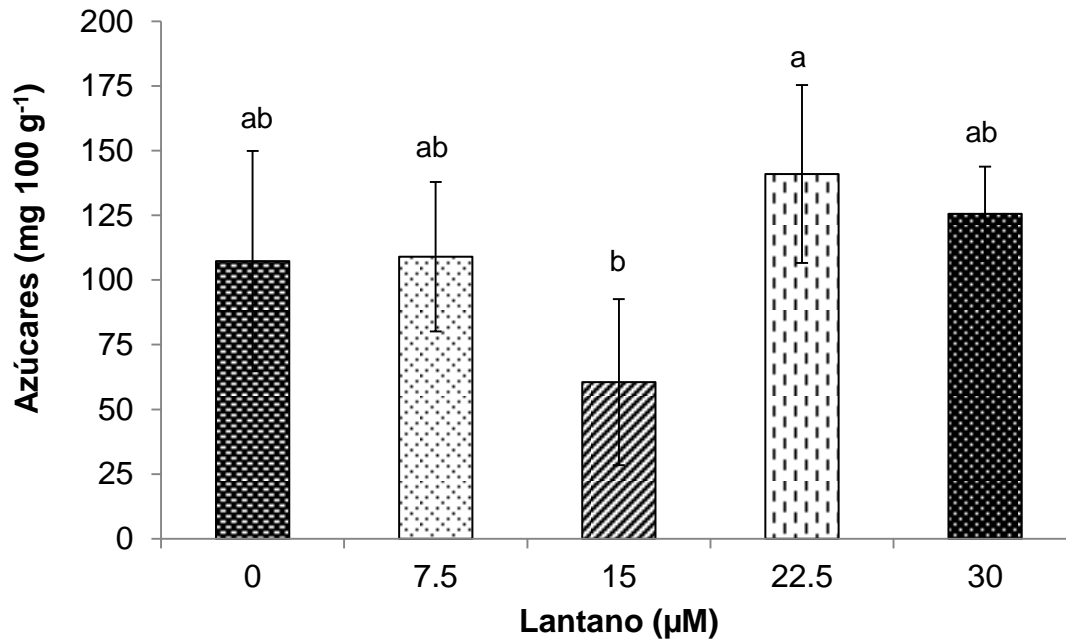
Finalmente, el contenido de carotenoides fue superior al testigo, en el tratamiento 22.5 μM La con un incremento de 49.7% (**Figura 1.19**).



**Figura 1.19.** Concentración de carotenoides en plantas de lechuga var. “Parris Island Coss”, tratadas con diferentes concentraciones de La bajo un sistema de raíz flotante. Medias  $\pm$  DE con letras distintas sobre las barras de cada medición, indican diferencia significativa (Tukey,  $P \leq 0.05$ )  $n=4$ .

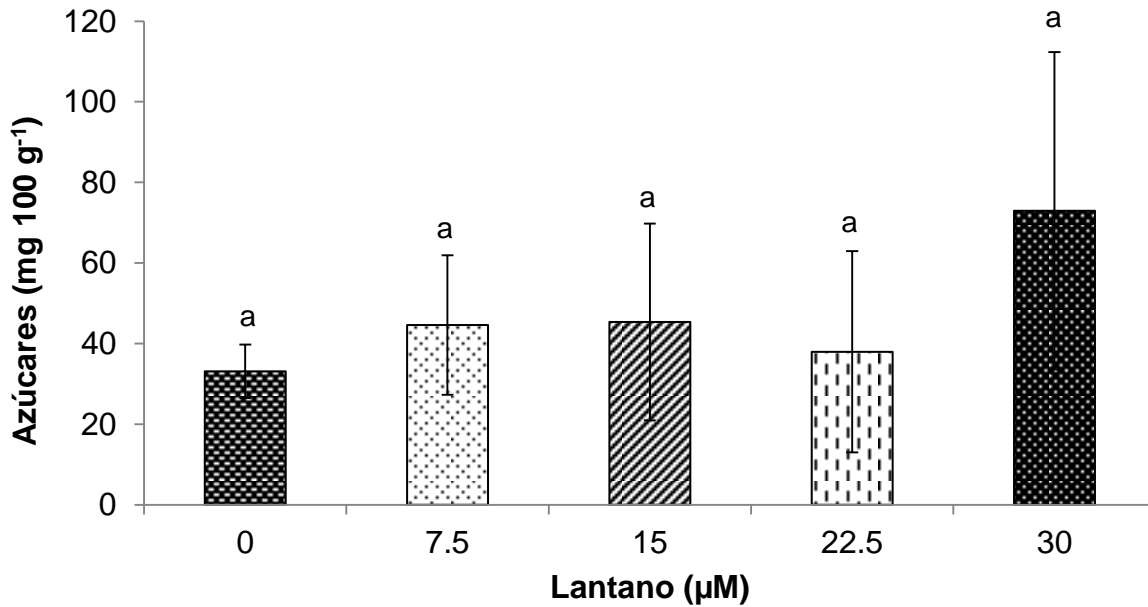
#### 1.5.10. Concentración de azúcares totales en hojas y raíces

La concentración de azúcares solubles totales se evaluó en hojas y en raíces al finalizar el ciclo productivo. Los valores más altos de esta variable en hojas, se registraron en el tratamiento 22.5  $\mu\text{M}$  La el cual superó en forma significativa (132.8% superior), al tratamiento 15  $\mu\text{M}$  La (**Figura 1.20**).



**Figura 1.20.** Concentración de azúcares solubles totales en hojas de lechuga var. “Parris Island Coss”, tratadas con diferentes concentraciones de La bajo un sistema de raíz flotante. Medias  $\pm$  DE con letras distintas sobre las barras de cada medición, indican diferencia significativa (Tukey,  $P \leq 0.05$ )  $n=4$ .

En raíces, la concentración de azúcares solubles totales registrados no fue afectada por los tratamientos; probablemente debido a la alta desviación estándar observada entre repeticiones de un mismo tratamiento. Sin embargo, se aprecia que el tratamiento 30  $\mu\text{M}$  La obtuvo los valores más altos (**Figura 1.21**).

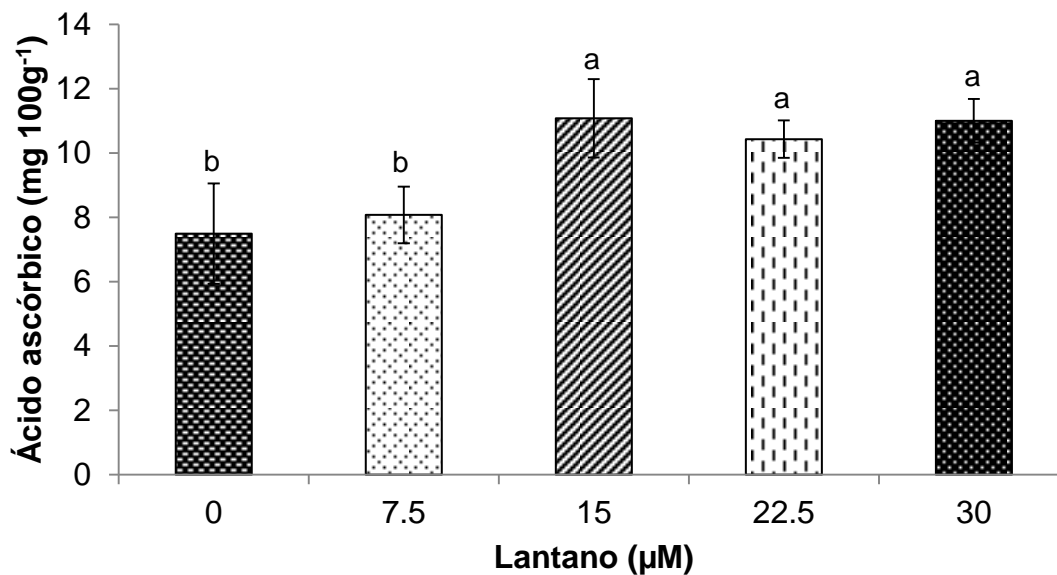


**Figura 1.21.** Contenido de azúcares solubles totales en raíces de lechuga var. “Parris Island Coss”, tratadas con diferentes concentraciones de La bajo un sistema de raíz flotante. Medias  $\pm$  DE con letras distintas sobre las barras de cada medición, indican diferencia significativa (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).  $n=4$ .

#### 1.5.11. Concentración de ácido ascórbico

Se evaluó la concentración de ácido ascórbico en materia fresca de hojas recientemente maduras. Destaca que dosis superiores a 15  $\mu\text{M}$  La incrementaron significativamente la concentración de ácido ascórbico. Se registraron incrementos en comparación con el testigo del orden de 47.9, 39.2 y 46.8% con las dosis de 15, 22.5 y 30  $\mu\text{M}$  La, respectivamente (**Figura 1.22**).

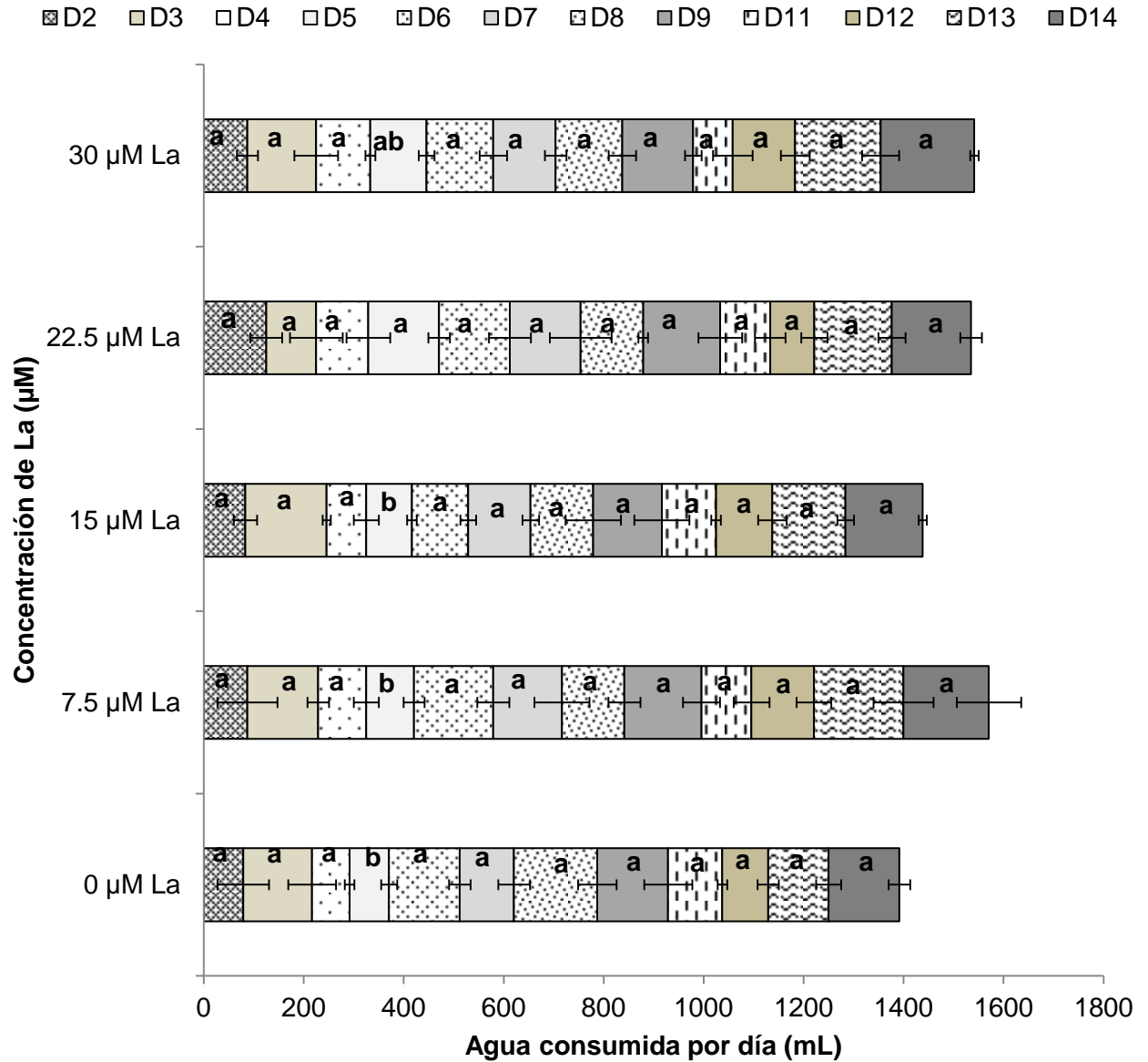




**Figura 1.22.** Contenido de ácido ascórbico en hojas de lechuga var. “Parris Island Coss”, tratadas con diferentes concentraciones de La bajo un sistema de raíz flotante. Medias ± DE con letras distintas sobre las barras de cada medición, indican diferencia significativa (Tukey,  $P \leq 0.05$ )  $n=4$ .

#### 1.5.12. Consumo de agua durante la fase terminal del cultivo

Durante la aplicación de los tratamientos con La en el sistema de raíz flotante se registró el consumo de agua durante un periodo de 12 días y se realizaron dos cambios de solución. El registro de estos resultados se presenta en la **Figura 1.23**, se observa que solo en el día 5 se registraron diferencias estadísticas, donde el tratamiento 22.5 5 μM La tuvo valores más altos en 78.9% en el consumo de agua, en comparación con el testigo.



**Figura 1.23.** Consumo de agua por contenedor durante los primeros 2, 3, 4, 5, 6, y 7 días de tratamiento con La en el cultivo lechuga var. “Parris Island Coss”, bajo un sistema de raíz flotante. Medias  $\pm$  DE con letras distintas sobre las barras de cada medición, indican diferencia significativa (Tukey,  $P \leq 0.05$ )  $n=4$ .

## 1.6. DISCUSIÓN

Generalmente el ciclo productivo de la lechuga en suelo dura alrededor de 70 días, mientras que en un sistema hidropónico abarca de 21 a 30 días aproximadamente debido a que se encuentran en disposición todos los nutrientes que la lechuga

necesita para completar su ciclo reproductivo (Sapkota *et al.*, 2019; Soares *et al.*, 2019). La producción y comercialización de esta hortaliza ha recibido cada vez más atención con respecto a la calidad y la inocuidad en los últimos años, debido a que su producto final son las hojas, que se consumen en crudo y normalmente en ensaladas (Yosoff *et al.*, 2015). Desde antes del siglo XX los elementos de tierras raras (ETR) se empezaron a utilizarse en China como fertilizantes en la agricultura dado que se demostró que su aplicación ocasionaba un aumento y mejora en el rendimiento y en la calidad de varios cultivos (Pang *et al.*, 2001; McDowell *et al.*, 2015), tales como maíz (*Zea mays*), trigo (*Triticum aestivum*), arroz (*Oryza sativa* L.) avena (*Avena sativa*), cebada (*Hordeum vulgare*), tabaco (*Nicotiana tabacum*), soya (*Glycine max*), entre otras especies. Por lo tanto, se han investigado diferentes métodos de aplicaciones de elementos de tierras raras, así como diversas concentraciones, las cuales en su mayoría son dosis baja (Redling, 2016). Sin embargo, hasta el momento no existen reportes de los efectos del suministro de La en la fase terminal del cultivo de lechuga durante la fase terminal y bajo un sistema de raíz flotante. Por lo anterior, se realizó la presente investigación.

Después de 5 y 10 d de aplicación de 7.5 y 30  $\mu\text{M}$  La, el número de hojas se incrementó en promedio en 14.4% (**Cuadro 1.3**). Estos resultados indican que el La, afecta el crecimiento y desarrollo de las plantas de lechuga, lo cual podía ser efecto de su alta movilidad y acumulación en hojas (**Figura 1.17**); la acumulación de elementos de las tierras raras ha mostrado mejorar la eficiencia de absorción de luz, la distribución de energía de excitación de PSI a PSII lo que promueve el crecimiento (Xiaoqing *et al.*, 2009). Por lo anterior, se ha demostrado que los ETR tienen efectos positivos en el crecimiento de las plantas, permitiendo un incremento en la biomasa total, la producción de metabolitos secundarios y la absorción de nutrientes (Basu *et al.*, 2015).

De la misma manera, la altura de la planta fue incrementada después de 5 días de tratamiento con 15  $\mu\text{M}$  La; empero, conforme avanzaba los días no se observó ningún efecto entre los tratamientos (**Figura 1.8**). En plántulas de pimiento morrón var. Yolo wonder se demostró que la dosis 10  $\mu\text{M}$  La estimula el crecimiento en 20% en comparación con su tratamiento testigo (García-Jiménez *et al.*, 2017). De tal manera que, los ETR entre ellos el lantano, puede incrementar la altura de las plantas siempre

y cuando la concentración no exceda su nivel óptimo ya que puede inhibir el crecimiento de las plantas como lo demuestra [Turra et al. \(2015\)](#) en *Citrus limonia* Osbeck. Sobrepasar las concentraciones óptimas de una especie conllevan a una desaceleración del crecimiento, marchitamiento y amarillento de las hojas como debilitamiento de la planta tal como se demostraron en tres portainjertos de cítricos (*Poncirus trifoliata* L. Raf. TO, *C. junos sieb. ex Tanaka* ZYXC y *Citrus grandis* var. Shatinyu Hort SP), donde las plántulas se estimulaban en concentraciones bajas de  $0.5 \text{ mmol L}^{-1}$  y se inhibían a concentraciones superiores de  $1 \text{ mmol L}^{-1}$ .

De igual manera, en este estudio se observó que el La incrementó, significativamente, el diámetro del tallo con dosis de  $7.5$  y  $30 \text{ }\mu\text{M}$  (**Figura 1.10**). Mejorando la calidad de plántulas, [Luo et al. \(2021\)](#) indican que al aplicar dosis de La mejora significativamente el diámetro del tallo, peso fresco y peso seco en *Oryza sativa* L. subsp. Japonica Kato., con dosis de  $80 \text{ mg LaCl}_3 \text{ kg}^{-1}$  y  $100 \text{ mg LaCl}_3 \text{ kg}^{-1}$ .

La lechuga es una hortaliza de consumo fresco y del cual su principal órgano de consumo son sus hojas; por lo tanto, surge el interés de producir alimentos de calidad, libres de tóxicos y en un periodo de tiempo corto. Es ahí donde surge el interés de aplicar fertilizantes en combinación con ETR y donde se demostró que el La aumenta el rendimiento y mejora la calidad de los diversos cultivos bajo la aplicación de concentraciones bajas entre ellos el elemento del La el cual estimulan la tasa fotosintética y el contenido total de clorofila ([De Oliveira et al., 2015](#)). El consumo de lechuga está determinado por el color, el tamaño, la textura, el sabor y las propiedades nutricionales ([Mampholo et al., 2016](#)). En este contexto, el color de las hojas de lechuga es definido por las concentraciones de pigmentos fotosintéticos. Las hortalizas de hojas verdes como la lechuga contienen varios tipos de pigmentos dentro de los cuales destacan la clorofila *a*, *b*, y carotenoides ([Steidle et al., 2016](#)). En este estudio, se observó que las lecturas SPAD muestran un aumento significativo después de 5 y 10 d en plantas tratadas con  $15$  y  $30 \text{ }\mu\text{M}$  La, respectivamente (**Figura 1.9**). Efectos positivos, se relacionan de manera directa de la dosis  $15 \text{ }\mu\text{M}$  La, en la concentración de clorofila *a* en hojas de lechuga al momento de la cosecha (17 d de tratamiento), como se observa en la **Figura 1.18**. Aplicaciones de ETR en concentraciones bajas pueden

intervenir en el contenido de clorofila en las plantas sin embargo al aplicar concentraciones altas de La inhiben tanto el contenido de clorofila como carotenoides y aumenta las especies reactivas de oxígeno y por consecuencia el crecimiento de las plantas se inhibe (Liu *et al.*, 2016a; Yin *et al.*, 2021).

En lo que respecta a los carotenoides, también pigmentos fotosintéticos, se observó el aumento de su concentración en hojas con el suministro de 22.5  $\mu\text{M}$  La (**Figura 1.19**). Las clorofilas y los carotenoides son altamente reactivas al oxígeno; por tanto, al incorporar las concentraciones adecuadas de La y el consecuente incremento de estos pigmentos, disminuye los niveles de especies reactivas de oxígeno (ROS) (Liu *et al.*, 2016a). Se ha demostrado que el incremento en el contenido de clorofila *a* y *b* propiciado por el suministro de los ETR aumenta la eficiencia de absorción de luz, regulando la distribución de energía de excitación de los fotosistemas I y II promoviendo las actividades de la reacción de Hill, lo que se cree que son de las razones principales del aumento del rendimiento de los cultivos (Duarte *et al.*, 2018).

Como se mencionó anteriormente los ETR están asociados con el incremento en los rendimientos; en este estudio, se observaron incrementos en el área foliar por planta de 31.1% cuando las plantas se trataron con 30  $\mu\text{M}$  La (**Figura 1.11**).

Por otra parte, se ha reportado que los ETR tienen efecto en el crecimiento de las raíces cuando se suministra una concentración adecuado de éstos (Song *et al.*, 2021). Por ello, como se puede apreciar en la **Cuadro 1.4**, la dosis 15  $\mu\text{M}$  La incrementa la longitud de la raíz después de 15 d de tratamiento. Estos resultados, coinciden con los de otras investigaciones, que indican que el La promueve al crecimiento del sistema radicular y la formación de raíces adventicias; asimismo que aumenta la tasa de enraizamiento y biomasa fresca de raíz (Diatloff *et al.*, 1995; Zhang *et al.*, 2013; Grosjean *et al.*, 2019). Por el contrario, también se ha establecido que concentraciones altas de La provocan la muerte celular en las raíces, debido a que inducen la acumulación de especies reactivas de oxígeno (ROS) afectando la señalización redox celular en las plantas (Liu *et al.*, 2016b). Las ROS son moléculas de señalización importantes que participan en la modulación del crecimiento y desarrollo de las plantas

(Mhamdi y Van, 2018). En este estudio, el suministro de La tuvo efecto en la biomasa seca de raíz; sin embargo, éstos no son significativos (**Cuadro 1.5**).

El suministro de lantánidos (La, Ce, Nd, Pr, Sm y Gd con dosis de 1, 2, 4 y 8 mg dm<sup>3</sup> cada uno) en el cultivo *in vitro* de *Cymbidium*, aumentó el peso fresco y seco de la raíz; observándose que la formación de raíces se vio fuertemente incrementada (Teixeira, 2014). Por ello, aplicaciones de concentraciones bajas de La incrementa favorablemente estas dos variables (Diatloff *et al.*, 2008; Liu *et al.*, 2013).

Del mismo modo, en este estudio se incrementó la biomasa fresca y seca de vástago con la incorporación de 30 µM La (**Cuadros 1.5 y 1.6**). Estos resultados se relacionan positivamente con la biomasa total fresca y seca (**Figuras 1.13 y 1.14**). Estos efectos positivos se observan siempre y cuando la aplicación de los ETR sean en aplicaciones bajas que beneficien el aumento de biomasa en los cultivos, no obstante, si estas concentraciones sobrepasan el umbral fisiológico pueden tener efectos negativos tales como cambiar funciones enzimáticas, el remplazo de elementos esenciales o el exceso de producción de especies reactivas de oxígeno (ROS) (Backer y Solomon, 2020). Gómez-Merino *et al.* (2020a; 2020b), analizaron 703 estudios que demostraban la hormesis inducida por La, y donde encontraron que no se pueden esperar efectos tóxicos en plantas, cuando se aplica La en concentraciones bajas, la media del 142% del control se alcanza a 56 µM La, mientras que la concentración promedio del Nivel de efecto adverso no observado (NOAEL) es de 249 µM La, esto dependerá tanto del genotipo de la planta, el pH del medio de crecimiento y la dosis de La empelada por debajo del NOAEL.

Por otra parte, el contenido de N, P, Ca, Mg y S en la parte aérea del cultivo en lechuga mostró incrementos con la incorporación de La con la dosis 30 µM La; mientras que, el contenido de K fue incrementado con el suministro de 7.5 y 30 µM La (**Figura 1.15**); lo anterior respecto a las plantas testigo. De la misma manera, los contenidos de Fe, Cu, Zn, Mn y B en vástagos fueron superiores a los registrados en el tratamiento testigo cuando las plantas fueron tratadas con 30 µM La (**Figura 1.16**). Debido que el La, al ser el más electropositivo de los ETR y al ser un catión, presenta similitudes en radios iónicos y actividades químicas similares a los elementos de Ca, Mg y K, logrando tener

efectos sobre la absorción y acumulación de éstos (Emmanuel *et al.*, 2010; Ramírez-Martínez *et al.*, 2012). Es por ello que el efecto de La favorece el contenido de algunos nutrientes esenciales como la absorción de K (Wahid *et al.*, 2000). De Oliveira *et al.* (2015), demostraron que aplicaciones de lantano en soya (*Glycine max* L. Merrill) aumenta el contenido de Ca, P, K y Mn (160  $\mu\text{M}$  La) mientras que los niveles de Cu y Fe (20  $\mu\text{M}$  La) disminuyen, caso contrario del presente estudio donde la dosis 30  $\mu\text{M}$  La demostró incrementos en estos elementos en lechuga. Además, se ha registrado que los niveles de Zn y Cu pueden ser disminuidos por La pero al mismo tiempo pueden aumentar los niveles de Mg y Mn en *Oryza sativa* L. cv. Shengdao, mientras que acumulaciones de K y Ca fueron promovidas por 0.05 y 0.1  $\text{mmol L}^{-1}$ , pero inhibidas por 0.5 y 1.0  $\text{mmol L}^{-1}$  de  $\text{La}^{+3}$  (Liu *et al.*, 2013).

En el presente estudio se demostró que las concentraciones de La adicionadas a la solución nutritiva presentaron correlaciones positivas (**Figura 1.17**); sin embargo, los valores de coeficientes de correlación fueron muy variados. En tabaco (*Nicotiana tabacum*) los límites permitidos de La para una estimulación fueron de 20  $\text{mg L}^{-1}$  de  $\text{LaCl}_3$ , arriba de 50  $\text{mg L}^{-1}$  indicaban efectos negativos (Che *et al.*, 2001), en trigo (*Triticum aestivum* L.) concentraciones de 0.5 a 25  $\text{mg L}^{-1}$  disminuye el contenido de Ca, K y Mg (Hu *et al.*, 2002). Mientras que en maíz (*Zea mays* Hycorn 82) y frijol mungo (*Vigna radiata* Berken) se ha redactado que concentraciones de 0.2 a 5  $\mu\text{M}$  La y Ce, disminuyen algunos nutrimentos (Ca, Zn y Mn) y efectos positivos solo pueden ocurrir por debajo de 0.2  $\mu\text{M}$  (Diatloff *et al.*, 2008). En tulipán (*Tulipa gesneriana* L.) se registraron acumulaciones de K y Ca en concentraciones de 10 y 20  $\mu\text{M}$  mientras que la dosis 30  $\mu\text{M}$  disminuyen su contenido (Ramírez-Martínez *et al.*, 2012). Finalmente en cebada (*Hordeum vulgare* L. cv. Mikhaylovsky) sugieren dosis menores de 100  $\text{mg kg}^{-1}$  debido que concentraciones mayores se asocia a la disminución de P, K, Mg, Cu y Fe, aumentando el Ca, posiblemente asociado a un desequilibrio de auxinas (Fastovets *et al.*, 2017).

En este estudio, se evidenció que el cultivo de lechuga responde diferencialmente a las dosis de La, así también se demostró que este elemento de las tierras raras es traslocado a la parte aérea sin dificultad (Ramírez-Martínez *et al.*, 2012).

El contenido de azúcares solubles totales en el cultivo de lechuga está compuesto principalmente por sacarosa, glucosa y fructosa entre los cuales la fructosa tiene el mayor dulzor y la cantidad de fructosa y glucosa se suma como hexosa (Chen *et al.*, 2019); es una variable importante en la calidad para esta especie debido que su principal órgano de consumo son sus hojas. Los resultados de este estudio indican incrementos en la concentración de azúcares en plantas tratadas con 22.5  $\mu\text{M}$  La en hojas (**Figura 1.20**), sin embargo éstos no son significativos en raíz (**Figura 1.21**). Yin *et al.* (2021) y García Jiménez *et al.* (2019), reportan que el lantano con dosis 30  $\text{mg L}^{-1}$  y 10  $\mu\text{M}$  La pueden mejorar los contenidos de azúcares totales en los cultivos.

Se ha mencionado la lechuga es una hortaliza que contiene componentes antioxidantes entre ellos el ácido ascórbico del cual desempeña múltiples funciones en el organismo humano entre las cuales participa en la formación de colágeno y mejora el sistema inmunológico al repelar infecciones contra bacterias y virus (Acámovic *et al.*, 2011), por ello es importante destacar esta variable como parámetro de calidad de este cultivo. En este contexto, se ha reportado que los ETR (fertilizante mixto de tierras raras que contenía La, Ce, Nd y Pr se aplicó una dosis de 100  $\text{mg L}^{-1}$  diariamente) incrementan el contenido de ácido ascórbico con aplicaciones bajas en col china (*Brassica chinensis* L.) y colza (*Brassica napus*) (Ren *et al.*, 2016). En esta investigación, se registraron incrementos en la concentración de ácido ascórbico en hojas del orden de 47.9%, 46.8% y 39.2% con las dosis 15, 22.5 y 30  $\mu\text{M}$  La, respectivamente en comparación con el tratamiento testigo (**Figura 1.22**). Estos resultados confirman que el La aumenta el contenido de ácido ascórbico; se ha indicado que los ETR posiblemente podrían formar una coordinación estable con los iones de las tierras raras para eliminar ROS (Zhang *et al.*, 2015).

Finalmente se registró el consumo de agua durante el periodo de aplicación de cada uno de los tratamientos y del cual a pesar no tener diferencias significativas entre las concentraciones evaluadas se aprecia que plantas de los tratamientos con La absorbían más agua que las del testigo. Esto es posible debido que los ETR tienen un efecto positivo en la eficiencia del uso del agua por parte de las plantas debido al aumento en el contenido de prolina, un aminoácido con una alta capacidad de



hidratación lo que hace que la planta sea más resistente al estrés hídrico (Ramos *et al.*, 2016).

### 1.7. CONCLUSIÓN

Se observó que el La en dosis 30  $\mu\text{M}$  ocasionó un aumento en las variables número de hojas, diámetro del tallo, área foliar, concentración de clorofila, biomasa fresca y seca en hojas y raíz, así como también aumentaron los contenidos de N, Ca, Mg, K, Fe, Cu, Zn, Mn, B y La en la parte aérea de la planta.

Por otro lado, dentro de las variables de calidad se observó que la concentración de azúcares solubles totales en hojas incrementó con la adición de 22.5  $\mu\text{M}$  La. Asimismo, la concentración de ácido ascórbico se incrementó con las concentraciones 15, 22.5 y 30  $\mu\text{M}$  La.

Se concluye que la mayoría de los parámetros de crecimiento, desarrollo y calidad fueron influenciados en forma positiva con la aplicación de 30  $\mu\text{M}$  La durante la fase final del cultivo establecido en un sistema de raíz flotante.

## CONCLUSIÓN GENERAL

El suministro de lantano en la solución nutritiva bajo un sistema hidropónico, obtiene efectos positivos en el crecimiento, desarrollo y calidad en el cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.) var. Parris Island Coss, durante la fase de poscosecha. Gracias a que el ciclo de producción es más precoz en comparación con un cultivo convencional. Además tras la incorporación de dosis menores de 30  $\mu\text{M}$  La, se observaron efectos estimulantes en número de hojas, lecturas de SPAD, área foliar, diámetro del tallo, biomasa fresca y seca de vástago y raíz como incrementos en el análisis nutrimental de la planta en un periodo de evaluación de 17 d después de la aplicación de La.

Por otra parte dentro de las variables de calidad, es importante mencionar que el órgano principal consumible de la lechuga son sus hojas, y del cual el ojo humano centra su atención para consumirla. Esto está relacionado en la concentración de pigmentos fotosintéticos y carotenoides, destacando un aumento en el contenido de clorofila *a* y carotenoides con la incorporación de 15 y 22.5  $\mu\text{M}$  La. Mientras que el contenido de azúcares solubles, otra de las variables de calidad y del cual genera interés en el consumidor al momento de ingerirla, reflejo un aumento con la dosis 30  $\mu\text{M}$  La, en hojas. Así mismo las aplicaciones mayores de 15  $\mu\text{M}$  La, mejora el contenido de ácido ascórbico, un compuestos antioxidantes importante dentro de la salud humana.

Finalmente con todas estas evidencias se recomienda el uso de La en el cultivo de lechuga en solución nutritiva bajo un sistema de raíz flotante, para mejorar aspectos de producción y calidad durante la poscosecha, sin embargo se recomienda realizar más estudiós con dosis superiores a 30  $\mu\text{M}$ , para evaluar diferentes intervalos de concentraciones en esta especie.

## LITERATURA CITADA

### Introducción general

- Campos-Júnior JE, Santos-Júnior JA, Berraza-Martins J, Farías-De Franca e Silva E, Guedes-Cabral-De Almeida C. 2018. Rocket production in a low cost hydroponic system using brackish water. *Revista Caatinga* 31(4): 1008-1016. <https://doi.org/10.1590/1983-21252018v31n424rc>
- Chen WJ, Tao Y, Gu YH, Zhao GW. 2001. Effect of lanthanide chloride on photosynthesis and dry matter accumulation in tobacco seedlings. *Biological Trace Element Research* 79 (2): 169-176. <https://doi.org/10.1385/BTER:79:2:169>
- D'Aquino L, Concetta de PM, Nardi L, Morgana M, Tommasi F. 2009. Effect of some light rare earth elements on seed germination, seedling growth and antioxidant metabolism in *Triticum durum*. *Chemosphere* 75(7): 900-905. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.01.026>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2019. Producción de Cultivos. Obtenido de la Red Mundial el 22 de mayo de 2020. <http://www.fao.org/faostat/es/#data>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2013. Afrontar la escasez de agua un marco de acción para la agricultura y la seguridad alimentaria. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-i3015s.pdf> (Consultado 21 Agosto 2019).
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2015. Los suelos están en peligro, pero la degradación puede revertirse. Disponible en: <http://www.fao.org/news/story/es/item/357165/icode/> (Consultado 17 Agosto 2019).
- Fashui H, Zhenggui W, Guiwen Z. 2000. Effect of lanthanum on aged seed germination of rice. *Biological Trace Element Research* 75(1-3): 205-213. <https://doi.org/10.1385/BTER:75:1-3:205>
- Gan YZ, Azrina A. 2016. Antioxidant properties of selected varieties of lettuce (*Lactuca sativa* L.) commercially available in Malaysia. *International Food Research Journal* 23(6): 2357-2362.
- García-Casal MN. 2007. La alimentación del futuro: Nuevas tecnologías y su importancia en la nutrición de la población. *Anales Venezolanos de Nutrición* 20(2): 108-114.
- García-Jiménez A, Gómez-Merino FC, Tejada-Sartorius O, Trejo-Téllez LI. 2017. Lanthanum affects bell pepper seedling quality depending on the genotype and time of exposure by differentially modifying plant height, stem diameter and

- concentrations of chlorophylls, sugar, amino acids and proteins. *Frontiers in Plant Science* 8: 308. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00308>
- Guerrero EM, Revelo JC, Benavides BO, Chávez G, Moncayo CA. 2014. Evaluación de sustratos en un cultivo de lechuga bajo un sistema hidropónico en el Municipio de Pasto, *Revista de Ciencias Agrícolas* 31(1): 3-16.
- Han F, Shan XQ, Zhang J, Xie YN, Pei ZG, Zhang SZ, Zhu YG, Wen B. 2005. Organic acids promote the uptake of lanthanum by barley roots. *New Phytologist* 165: 481-492. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2004.01256.x>
- Hernández MJL, Verma SP. 2009. Reseña sobre las metodologías de campo, analíticas y estadísticas empleadas en la determinación y manejo de datos de los elementos de tierras en el sistema suelo-planta. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrícolas* 41(2): 153-189.
- IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) 2005. Nomenclature of Inorganic Chemistry. International Union of Pure and Applied Chemistry Recommendations 2005. Connelly NG, Damhus T, Hartshorn RM, Hutton AT (Eds.). *Royal Society of Chemistry*. Cambridge, RU. 366 pp.
- La Rosa VOJ. 2015. Cultivo de lechuga (*Lactuca sativa*) bajo condiciones del Valle del Rímac, Lima. Tesis de Licenciatura. Universidad Agraria La Molina Facultad de Agronomía. Lima, Perú. 56 p.
- Liu D, Lin Y, Wang X. 2012. Effects of lanthanum on growth, element uptake, and oxidative stress in rice seedlings. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 175: 907-911.
- Liu D, Wang X, Zhang X, Gao Z. 2013. Effects of lanthanum on growth and accumulation in roots of rice seedlings. *Plant Soil and Environment* 59(5): 196-200.
- Martinez E. 2014. México con Posibilidades para Producir “Tierras Raras” para Energía Renovable. Obtenido de la Red Mundial el 21 de junio de 2020. <https://petroquimex.com/mexico-con-posibilidades-para-producir-tierras-raras-para-energia-renovable/>
- Ma Y, Zhang P, Zhang Z, He X, Li Y, Zhang J, Zheng L, Chu S, Yang K, Zhao Y, Chai Z. 2015. Origin of the different phytotoxicity and biotransformation of cerium and lanthanum oxide nanoparticles in cucumber. *Nanotoxicology*. 9(2): 262-270. <https://doi.org/10.3109/17435390.2014.921344>
- Morales R. 2014. México ira en busca de tierras raras. Obtenido de la Red mundial el 21 de junio de 2020. <https://www.eleconomista.com.mx/empresas/Mexico-ira-en-busca-de-tierras-raras-20140522-0046.html>
- NOTIMEX. 2014. Yacimientos de Tierras Raras en México. Obtenido de la Red mundial el 21 de junio de 2020.

<http://www.mexiconewsnetwork.com/es/noticias/yacimientos-de-tierras-raras-en-mexico/>

- Olivares E, Aguilar G, Colonnello G. 2011. Elementos tierras raras en plantas vasculares una revisión. *Interciencia* 36(5): 331-340.
- Parkell NB, Hochmuth RC, Laughlin WL. 2015. An overview of lettuce production systems and cultivars used in hydroponics and protected culture in Florida. The Institute of Food and Agricultural Sciences (IFAS).
- Ramírez-Martínez M, Trejo-Téllez LI, Gómez-Merino FC, Castillo-González AM, Hernández-Ríos I, Hernández-Acosta E. 2012. Bioacumulación de potasio, calcio y lantano en tulipán tratado con lantano. *Terra Latinoamericana* 30(3): 229-238.
- Saha S, Kalia P, Sureja AK, Srivastava A, Sarkar SK. 2016. Genetic analysis of bioactive compounds and antioxidant properties in lettuce (*Lactuca sativa*). *Indian Journal of Agricultural Sciences* 86(11): 1471-6.
- Santos FBG, Lobato AKS, Silva RB, Schimidt D, Costa RCL, Alves GAR, Oliveira NCF. 2009. Growth of lettuce (*Lactuca sativa* L.) in protected cultivation and open field. *Journal of Applied Sciences Research* 5(5): 529-533.
- SIAP (Servicio de información Agroalimentaria y Pesquera). 2020. Panorama agroalimentario 2020. SADER/SIAP, México. 200 p.
- Van Steveninck RF., Van Steveninck ME, Chescoe D. 1976. Intracellular binding of lanthanum in root tips of barley (*Hordeum vulgare*). *Protoplasma* 90: 89–97.

### **Marco teórico**

- Acuña R, Jara C, Ah Hen K, Mathias K. 2017. Contenido y estabilidad de clorofilas y carotenoides en el zumo de lechuga (*Lactuca sativa* L.). *Agrosur* 45(3): 11-20. <https://doi.org/10.4206/agrosur.2017.v45n3-03>
- Agathokleous E, Kitao M, Calabrese EJ. 2018. The rare earth element (REE) lanthanum (La) induces hormesis in plants. *Environmental Pollution* 238: 1044-1047. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.02.068>
- Arroyo OCE, Marques VJE. 2014. Rare earth elements in the international economic scenario. *Revista Escola de Minas* 64(4): 361-366. <http://dx.doi.org/10.1590/0370-44672014670162>
- Baca CGAJ, Rodríguez CE, Quevedo NA. 2016. La solución nutritiva en hidroponía. Studio Litográfico: Estado de México.
- Balaram V. 2019. Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact. *Geoscience Frontiers* 10: 1285-1303. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.12.005>

- Beltrano J, Giménez DO. 2015. *Cultivo de hidroponía*, Editorial de la Universidad Nacional de la Plata, Buenos Aires, Argentina, 180 p.
- Benton JJ. 2014. Complete Guide for Growing Plants Hydroponically. Boca Raton: London New York. 206 p.
- Bosques VJH. 2010. Curso básico de hidroponía. Moca, P.R.: Bosques Hidropónicos. 205 p.
- Brioschi L, Steinmann M, Lucot E, Pierret MC, Stille P, Prunier J, Badot PM. 2012. Transfer of rare earth elements (REE) from natural soil to plant systems: implications for the environmental availability of anthropogenic REE. *Plant and Soil* 366: 143-163. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1407-0>
- Brown PH, Rathjen AH, Graham RD, Tribe DE. 1990. Chapter 92 Rare earth elements in biological systems. *Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths* 3: 423-453.
- Calabrese EJ, Blain RB. 2009. Hormesis and plant biology. *Environmental Pollution* 157: 42-48. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2008.07.028>
- Charalampides G, Vatalis KI, Apostoplos B, Ploutarch-Nikolas B. 2015. Rare earth elements: Industrial applications and economic dependency of Europe. *Procedia Economics and Finance* 24: 126-135. [https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(15\)00630-9](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(15)00630-9)
- Che Y, Xing R, Zhu Y, Cui Y, Jiang X. 2011. Effects of lanthanum chloride administration on detouring learning in chicks. *Biological Trace Element Research* 143(1): 274-280. <https://doi.org/10.1007/s12011-010-8860-5>
- Chen WJ, Tao Y, Gu YH, Zhao GW. 2001. Effect of Lanthanide Chloride on Photosynthesis and Dry Matter Accumulation in Tobacco Seedlings. *Biological Trace Element Research* 79(2): 169-176. <https://doi.org/10.1385/BTER:79:2:169>
- Cruz CDS. 2009. Desarrollo de una función de producción de lechuga (*Lactuca sativa*) a partir de diferentes niveles de nitrógeno, distanciamiento entre plantas, ante escenarios con y sin cobertura plástica, en Zamorano. Tesis de licenciatura. Zamorano Carrera de Administración de Agronegocios. Zamorano, Honduras. 41 p.
- D'Alessandro O, Selmi GJ, Deya C, Romagnoli R. 2018. Síntesis y caracterización de “tanatos” de lantano como inhibidores de la corrosión. *Revista Materia (Rio de Janeiro)* 23(2): e12058. <https://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620180002.0394>
- D'Aquino L, Concetta de PM, Nardi L, Morgana M, Tommasi F. 2009. Effect of some light rare earth elements on seed germination, seedling growth and antioxidant metabolism in *Triticum durum*. *Chemosphere* 75(7): 900-905. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.01.026>

- Diatloff E, Asher CJ, Smith FW. 1999. Foliar application of rare earth elements to maize and mungbean. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 39(2): 189-194. <https://doi.org/10.1071/EA98149>
- De Oliveira C, Ramos SJ, Siqueira JO, Faquin V, De castro EM, Amaral DC, Techio VH, Coelho LCE, Silva PHP, Schnug E, Guilherme LRG. 2015. Bioaccumulation and effects of lanthanum on growth and mitotic index in soybean plants. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 122:136-144.
- Dostal J. 2017. Rare earth element deposits of alkaline igneous rocks. *Resources*. 6(34):1-12. <https://doi.org/10.3390/resources6030034>
- Echeverri LF, Parra BJJ. 2019. Los Lantánidos: ni tierras ni raras. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* 43(167): 291-296. <http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.917>
- Fashui H, Zhenggui W, Guiwen Z. 2000. Effect of lanthanum on aged seed germination of rice. *Biological Trace Element Research* 75(1-3): 205-213. <https://doi.org/10.1385/bter:75:1-3:205>
- Fontana L, Rossi CA, Hubinger SZ, Ferreira MD, Spoto MHF, Sala FC, Verruma-Bernardi MR. 2018. Physicochemical characterization and sensory evaluation of lettuce cultivated in there growing systems. *Horticulture Brasileira* 36: 020-026. <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-053620180104>
- Frietema de Vries FT, Van der Meijden R, Brandenburg WA. 1995. Botanical files on lettuce (*Lactuca sativa*)-On the hance for gene flow between wild and cultivated lettuce (*Lactuca sativa* L. including *L. serriola* L., Compositae) and the generalized implications for risk-assessments on genetically modified plants. *Gorteria* 2: 1-44.
- García-Jiménez A, Gómez-Merino FC, Tejada-Sartorius O, Trejo-Téllez LI. 2017. Lanthanum affects bell pepper seedling quality depending on the genotype and time of exposure by differentially modifying plant height, stem diameter and concentrations of chlorophylls, sugar, amino acids and proteins. *Frontiersin Plant Science* 8: 308. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00308>
- Gómez-Merino FC, Trejo-Téllez LI. 2018. The role of beneficial elements in triggering adaptive responses to environmental stressors and improving plant performance, S. Vats (ed.), *Biotic and Abiotic Stress Tolerance in Plants*. pp. 137-172. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-9029-5\\_6](https://doi.org/10.1007/978-981-10-9029-5_6)
- González MJF. 2019. Z=57, lantano, La. Primer elemento de las tierras raras. *Anales de Química* 115(2):119.
- Han F, Shan XQ, Zhang J, Xie YN, Pei ZG, Zhang SZ, Zhu YG, Wen B. 2005. Organic acids promote the uptake of lanthanum by barley roots. *New Phytologist* 165: 481-492. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2004.01256.x>

- He Z, Li J, Zhang H, Ma M. 2004. Different effects of calcium and lanthanum on the expression of phytochelatin synthase gene and cadmium absorption in *Lactuca sativa*. *Plant Science* <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2004.07.001>
- He YW, Loh CS. 2000. Cerium and lanthanum promote floral initiation and reproductive growth of *Arabidopsis thaliana*. *Plant Science* (159): 117-124.
- Helm J. 1954. *Lactuca sativa* L. in morphologisch-systematischer sicht. *Kulturpflanze*. 2:72-129.
- Hu X, Ding Z, Chen Y, Wang X, Dai L. 2002. Bioaccumulation of lanthanum and cerium and their effects on the growth of wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings. *Chemosphere* 48: 621-629.
- Hu Z, Rechter H, Sparovek G, Schnug E. 2004. Physiological and biochemical effects of rare earth elements on plants and their agricultural significance: A Review. *Journal of Plant Nutrition* 27(1): 183-220.
- Kastori RR, Maksimović IV, Zeremski-Škarić TM, Putnik-Delić M. 2010. Rare earth elements- Yttrium and higher plants. *Proceedings for Natural Sciences, Matica Srpska Novi Sad* 118: 87-98.
- Kobayashi Y, Ikka T, Kimura K, Yasuda O, Koyama H., 2007. Characterisation of lanthanum toxicity for root growth of *Arabidopsis thaliana* from the aspect of natural genetic variation. *Functional Plant Biology* 34: 984-994.
- Kusi E. 2020. Growth, nutrient content and tipburn in lettuce (*Lactuca sativa* L. 'Frillice') in response to light quality and aerial environment. *Plant Sciences. Plant production systems*. 68 p.
- Liang T, Ding S, Song W, Chong Z, Zhang C, Li H. 2008. A review of fractionations of rare earth elements in plants. *Journal of Rare Earth* 26: 7-15.
- Lindqvist K. 1960. On the origin of cultivated lettuce. *Hereditas* 46: 319-350.
- Liu D, Lin Y, Wang X. 2012. Effects of lanthanum on growth, element uptake, and oxidative stress in rice seedlings, *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 175: 907-911.
- Liu D, Wang X, Zhang X, Gao Z. 2013. Effects of lanthanum on growth and accumulation in roots of rice seedlings. *Plant Soil and Environment* 59(5): 196-200.
- Liu M. 2012. *The State Council Information Office of the People's Republic of China*. Available at: [http://www.scio.gov.cn/zfbps/ndhf/2012/Document/1175419/1175419\\_5.htm](http://www.scio.gov.cn/zfbps/ndhf/2012/Document/1175419/1175419_5.htm)  
Accessed: 17 Agosto 2010.



- Liu D, Zheng S, Wang X. 2016. Lanthanum regulates the reactive oxygen species in the roots of rice seedlings. *Scientific Reports* 6: 31860. <https://doi.org/10.1038/srep31860>
- Liu Y, Xu L, Dai Y. 2018. Phytotoxic Effects of Lanthanum Oxide Nanoparticles on Maize (*Zea mays* L.). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 113: 012020. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/113/1/012020>
- Luo H, Chen Y, He L, Tang X. 2021. Lanthanum (La) improves growth, yield formation and 2-acetyl-1-pyrroline biosynthesis in aromatic rice (*Oriza sativa* L.). *BMC Plant Biology* 21: 233. <https://doi.org/10.1186/s12870-021-03006-5>
- Ma Y, Zhang P, Zhang Z, He X, Li Y, Zhang J, Zheng L, Chu S, Yang K, Zhao Y, Chai Z. 2015. Origin of the different phytotoxicity and biotransformation of cerium and lanthanum oxide nanoparticles in cucumber. *Nanotoxicology* 9(2): 262-270. <https://doi.org/10.3109/17435390.2014.921344>.
- Martinez E. 2014. México con Posibilidades para Producir “Tierras Raras” para Energía Renovable. Obtenido de la Red Mundial el 21 de junio de 2020. <https://petroquimex.com/mexico-con-posibilidades-para-producir-tierras-raras-para-energia-renovable/>
- Moreno-Pérez E del C, Sánchez-Del Castillo F, Guitierrez-Tlaque J, González-Molina L, Pineda-Pineda J. 2015. Greenhouse lettuce production with and without nutrient solution recycling. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 21(1): 43-55. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2013.12.047>
- Navas-Serrano VM. 2008. Carbonato de lantano como tratamiento de la hiperfosfatemia de la enfermedad renal crónica. *Diálisis y Trasplante* 29(2): 67-71. [https://doi.org/10.1016/S1886-2845\(08\)70625-8](https://doi.org/10.1016/S1886-2845(08)70625-8)
- Nijse J, Erbe E, Brantjes NBM, Schel JHN, Wergin WP. 1998. Low-temperature scanning electron microscopic observations on endosperm in imbibed and germinated lettuce seeds. *Canadian Journal of Botany* 76: 509-516.
- Olivares E, Aguilar G, Colonnello G. 2011. Elementos tierras raras en plantas vasculares una revisión. *Interciencia* 36(5): 331-340.
- Pérez-López U, Miranda-Apodaca J, Lacuesta M, Mena-Petite A, Muñoz-Rueda A. 2015. Growth and nutritional quality improvement in two differently pigmented lettuce cultivars grown under elevated CO<sub>2</sub> and/or salinity. *Scientia Horticulturae* 195:56-66. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.08.034>
- Poschenrieder C, Cabot C, Martos S, Gallego B, Barceló J. 2013. Do toxic ions induce hormesis in plants? *Plant Science* 212: 15-25. <http://dx.doi.org/10.1016/j.plantsci.2013.07.012>
- Ramírez-Martínez M, Trejo-Téllez LI, Gómez-Merino FC, Castillo-González AM, Hernández-Ríos I, Hernández-Acosta E. 2012. Bioacumulación de potasio,

- calcio y lantano en tulipán tratado con lantano. *Terra Latinoamericana* 30(3): 229-238.
- Rezaee A, Hale B, Santos RM, Chiang YW. 2018. Accumulation and toxicity of lanthanum and neodymium in horticultural plants (*Brassica chinensis* L. and *Helianthus annuus* L.). *Canadian Society for Chemical Engineering* 9999: 1-10. <https://doi.org/10.1002/cjce.23152>
- Rulkens AJH. 1987. DE CGN sla collectie: inventarisatie, paspoort gegevens en enkele richtlijnen voor de toekomst. CGN, Wageningen. 51 p.
- Saavedra Del RG. 2017. Manual de producción de lechuga. Instituto de investigaciones Agropecuarias (INIA). Santiago, Chile.
- Sainz BS. 2016. Estudio para la Instalación de una Planta de Beneficio de Tierras Raras en el Complejo del Monte Galiñeiro (Pontevedra, Galicia). Tesis de Licenciatura. Universidad de Cantabria Escuela Politécnica de Ingeniería de Minas y Energía. 177 p.
- Sánchez-del-Castillo F, González-Molina L, Moreno-Pérez EC, Pineda-Pineda J, Reyes-González CE. 2014. Dinámica nutrimental y rendimiento de pepino cultivado en hidroponía con y sin recirculación de la solución nutritiva. *Revista Fitotecnia Mexicana* 37(3): 261-269.
- Sharma N, Acharya S, Kumar K, Singh N, Chaurasia OP. 2018. Hydroponics as an advanced technique for vegetable production: An overview. *Journal of Soil and Water Conservation* 17(4): 364-371. <https://doi.org/10.5958/2455-7145.2018.00056.5>
- SIAP (Servicio de información Agroalimentaria y Pesquera). 2020. Panorama agroalimentario 2020. SADER/SIAP, México. 200 p.
- Soria CJA. 2012. 6° curso de Hidroponía básica para principiantes. Hidroponía y acuarística del caribe. Obtenido en la Red mundial el 15 de septiembre del 2018. [http://www.asohofrucol.com.co/archivos/biblioteca/biblioteca\\_247\\_Curso%20Hidropon%C3%ADa%20Basica.pdf](http://www.asohofrucol.com.co/archivos/biblioteca/biblioteca_247_Curso%20Hidropon%C3%ADa%20Basica.pdf)
- Thomas PJ, Carpenter D, Boutin C, Allison JE. 2014. Rare earth elements (REEs): Effects on germination and growth of selected crop and native plant species. *Chemosphere* 26: 57-66.
- Torres-Flores NI, Gómez-Merino FC, Trejo-Téllez LI, Alcántar-González G, Trejo-Téllez BI, Sánchez-García P, Bello-Camacho F. 2018. Concentraciones de lantano en la solución nutritiva incrementan la vida de la flor en maceta de dos variedades de *lisianthus*. *Agroproductividad* 11(8): 149-153.
- Turra C, De Nadai FEA, Arruda BM, Sarries GA, Barbosa JF, Teixeira CAL, Lai RAE. 2015. Effects of lanthanum on citrus plant. *International Journal of New Technology and Research* 1(7):48-50.

- Valdivia ZHB, Almanza VG. 2016. Evaluation of the effect of macronutrients from human urine as fertilizer in the grow of *Lactuca sativa*. *Bolivian Journal of Chemistry* 33(1): 20-26.
- Van Steveninck RFM, Van Steveninck ME, Chescoe D. 1976. Intracellular binding of lanthanum in root tips of barley (*Hordeum vulgare*). *Protoplasma* 90: 89-97.
- Vargas-Hernández M, Macías-Bobadilla I, Guevara-González RG, Romero-Gómez S de J, Rico-García E, Ocampo-Velázquez RV, Álvarez-Arquita L de L, Torres-Pacheco I. 2017. Plant hormesis management with biostimulants of biotic origin in agriculture. *Frontiers in Plant Science* 8: 1762. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01762>
- Vries IM. 1997. Origin and domestication of *Lactuca sativa* L. *Genetic Resources and Crop Evolution* 44: 165-174.
- Wang C, Luo X, Tian Y, Xie Y, Wang S, Li Y, Tian L, Wang X. 2012. Biphasic effects of lanthanum on *Vicia faba* L. seedlings under cadmium stress, implicating finite antioxidation and potential ecological risk. *Chemosphere* 86: 530-537. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.10.030>
- Watanabe T, Broadley MR, Jansen S, White PJ, Takada J, Satake K, Takamats T, Tuah SJ, Osaki M. 2007. Evolution control of leaf element composition in plants. *New Phytologist* 174: 516-523.
- Wedeen RP, Berlinger B, Aaseth J. 2015. Lanthanum. *Handbook on the Toxicology of Metals (Fourth Edition)*. Volumen II: 903-909. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59453-2.00042-1>

### **Capítulo I. lantano en crecimiento, desarrollo y calidad de lechuga en un sistema de raíz flotante**

- Acámovic DG, Pavlovic R, Mladenovic J, Djuric M. 2011. Vitamin C content of different types of lettuce varieties. *Acta Agriculturae Serbica* XVI(32): 83-89.
- Agathokleous E, Kitao M, Calabrese EJ. 2018. Hormetic dose responses induced by lanthanum in plants. *Environmental Pollution* 238: 1044-1047. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.02.068>
- Backer R, Solomon D. 2020. REAP supplemental fertilizer improves greenhouse crop yield. <https://doi.org/10.1101/2020.08.27.266916>
- Bailey RW. 1958. The reaction of pentoses with anthrone. *Biochemical Journal* 68(4): 669-672. <https://doi.org/10.1042/bj0680669>
- Basu A, Panda SS, Dhal NK. 2015. Effect and accumulation of lanthanum on the growth and physiological activities of *Cymbopogon flexuosus* (Nees ex Steud.) W. Watson. *Current World Environment* 10(3): 951-956. <http://dx.doi.org/10.12944/CWE.10.3.26>

- Bollo MM, Hernández SJR, Méndez LAP. 2014. The state of the environment in Mexico. *Central European Journal of Geosciences* 6(2): 219-228. <https://doi.org/10.2478/s13533-012-0172-1>
- Carrasco G, Ramírez P, Vogel H. 2007. Efecto de la conductividad eléctrica de la solución nutritiva sobre el rendimiento y contenido de aceite esencial en albahaca cultivada e NFT. *Idesia* 25(2): 59-62.
- Chen WJ, Tao Y, Gu YH, Zhao GW. 2001. Effect of lanthanide chloride on photosynthesis and dry Matter accumulation in tobacco seedlings. *Biological Trace Element Research* 79(2): 169-176. <https://doi.org/10.1385/BTER:79:2:169>
- Chen XL, Wang LC, Li T, Yang QC, Guo WZ. 2019. Sugar accumulation and growth of lettuce exposed to different lighting modes of red and blue LED light. *Scientific Reports* 9: 6926. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43498-8>
- De Oliveira C, Ramos SJ, Siqueira JO, Faquin V, de Castro EM, Amaral DC, Techio VH, Coelho LC, e Silva PHP, Schnug E, Guilherme LRG. 2015. Bioaccumulation and effects of lanthanum on growth and mitotic index in soybean plants. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 122: 136-144. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.07.020>
- Diatloff E, Smith FW, Asher CJ. 1995. Rare earth elements and plant growth: I. Effects of lanthanum and cerium on root elongation of corn and mungbean. *Journal of Plant Nutrition* 18(10): 1963-1976. <https://doi.org/10.1080/01904169509365037>
- Diatloff E, Smith FW, Asher CJ. 2008. Effects of lanthanum and cerium on the growth and mineral nutrition of corn and mungbean. *Annals of Botany* 101: 971-982. <https://doi.org/10.1093/aob/mcn021>
- Duarte ACO, De Oliveira C, Junio RS, De Castro EM, Siqueira JO, Guimarães GLR. 2018. Lanthanum content and effects on growth, gas exchanges and chlorophyll index in maize plants. *Acta Scientiarum Biological Sciences* 40(1): e38469. <https://doi.org/10.4025/actascibiols.v40i1.38469>
- Emmanuel ESC, Vignesh V, Anandkumar B, Maruthamuthu S. 2010. Bioaccumulation and physiological impact rare earth elements on wheat (*Triticum aestivum*). *Indian Journal of Plant Physiology* 15(2):177-180.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2020. The State of Food and Agriculture. Overcoming water challenges in agriculture. Roma. 210 p. <https://doi.org/10.4060/cb1447en>
- Fastovets I, Kotelnikova A, Olga R, Nikolai S, Elena P. Effects of soil lanthanum on growth and elemental composition of plants. *EGU General assembly Conference Abstracts* 19: 305.
- García-Jiménez A, Gómez-Merino FC, Tejeda-Sartorius O, Trejo-Téllez LI. 2017. Lanthanum affects bell pepper seedling quality depending on the genotype and

- time of exposure by differentially modifying plant height, stem diameter and concentrations of chlorophylls, sugars, amino acids, and proteins. *Frontiers in Plant Science* 8: 308. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00308>
- Gómez-Merino FC, Castillo-González AM, Ramírez-Martínez M, Trejo-Téllez LI. 2020a. Lanthanum delays senescence and improves postharvest quality in cut tulip (*Tulipa gesneriana* L.) flowers. *Scientific Reports* 10:19437. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-76266-0>
- Gómez-Merino FC, Ramírez-Martínez M, Castillo-González AM, Trejo-Téllez LI. 2020b. Lanthanum prolongs vase life of cut tulip flowers by increasing water consumption and concentrations of sugars, proteins and chlorophylls. *Scientific Reports* 10: 4209. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61200-1>
- Grosjean N, Le JM, Berthelot C, Chalot M, Gross EM, Blaudez D. 2019. Accumulation and fractionation of rare earth elements are conserved traits in the *Phytolacca* genus. *Scientific Reports* 9:18458. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54238-3>
- Hernández-Rodríguez A, Robles-Hernández L, Ojeda-Barríos D, Prieto-Luévano J, González-Franco AC, Guerrero-Prieto V. 2017. Semicomposta y vermicomposta mezclada con turba de musgo incrementa la germinación de semillas y desarrollo de plántula de tomate y lechuga. *Interciencia* 42(11): 774-779.
- Hu X, Ding Z, Chen Y, Wang X, Dai L. 2002. Bioaccumulation of lanthanum and cerium and their effects on the growth of wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings. *Chemosphere* 48: 621-629.
- Huang X, Zhou Q. 2006. Alleviation effect of lanthanum on cadmium stress in seedling hydroponic culture of kidney bean and corn. *Journal of Rare Earths* 24(2): 248-252. [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(06\)60103-8](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(06)60103-8)
- Ippolito MP, Fasciano C, D'Aquino L, Tommasi F. 2011. Responses of antioxidant systems to lanthanum nitrate treatments in tomato plants during drought stress. *Plant Biosystems-An International Journal Dealing with All Aspects of Plant Biology* 145(1): 248-252. <https://doi.org/10.1080/11263504.2010.509937>
- Jia Y, Gao Y, Zeng F. 2005. Resistance of  $\text{LaCl}_3$  to oxidative stress induced by 2, 4-dichlorophenoxy. *Journal of Rare Earths* 23: 240-244.
- Lichtenthaler HK. 1987. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in Enzymology* 148: 350-382. [https://doi.org/10.1016/0076-6879\(87\)48036-1](https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1)
- Liu D, Wang X, Lin Y, Chen Z, Xu H, Wang L. 2012. The effects of cerium on the growth and some antioxidant metabolisms in rice seedlings. *Environmental Science Pollution Research* 19: 3282-3291. <https://doi.org/10.1007/s11356-012-0844-x>

- Liu D, Wang X, Zhang X, Gao Z. 2013. Effects of lanthanum on growth and accumulation in roots of rice seedlings. *Plant Soil and Environment* 59(5): 196-200. <https://doi.org/10.17221/760/2012-PSE>
- Liu D, Zheng S, Wang X. 2016a. Lanthanum regulates the reactivas oxygen species in the roots of rice seedlings. *Scientific Reports* 6: 31860. <https://doi.org/10.1038/srep31860>
- Liu YY, Wang RL, Zhang P, Liang LS, Xu J. 2016b. Involvement of reactive oxygen species in lanthanum-induced inhibition of primary root growth. *Journal of Experimental Botany* 67(21): 6149-6159. <https://doi.org/10.1093/jxb/erw379>
- Luo H, Chen Y, He L, Tang X. 2021. Lanthanum (La) improves growth, yield formation and 2-acetyl-1-pyrroline biosynthesis in aromatic rice (*Oryza sativa* L.). *BMC Plant Biol* 21: 233. <https://doi.org/10.1186/s12870-021-03006-5>
- Mampholo BM, Maboko MM, Soundy P, Sivakumar D. 2016. Phytochemicals and overall quality of leafy lettuce (*Lactuca sativa* L.) varieties grown in closed hydroponic system. *Journal of Food Quality* 39: 805-815. <https://doi.org/10.1111/jfq.12234>
- McDowell RW, Catto W, Orchiston T. 2015. Can the application of rare earth elements improve yield and decrease the uptake of cadmium in ryegrass-deminated pastures? *Soil Research* 53(7): 826-834. <https://doi.org/10.1071/SR15073>
- Mesa-Pérez MA, Díaz-Rizo O, Tavella MJ, Bagué D, Sánchez-Pérez JM. 2018. Factores de transferencia suelo-planta de elementos tierras raras en arroz (*Oriza sativa* L.). *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. 27(2): 1-9.
- Mhamdi A, Van BF. 2018. Reactive oxygen species in plant development. *Developments* 145(15): dev164376. <https://doi.org/10.1242/dev.164376>. PMID: 30093413.
- Moreno-Pérez EC, Sánchez-Del Castillo F, Gutiérrez-Tlaque J, González-Molina L, Pineda-Pineda J. 2015. Greenhouse lettuce production with and without nutrient solution recycling. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 21 (1): 43-55. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2013.12.04>
- Moreno RA, Aguilar DJ, Luévano GA. 2011. Características de la agricultura protegida y su entorno en México. *Revista Mexicana de Agronegocios* 29: 763-774.
- Ortega-Martínez LD, Sánchez-Olarte J, Díaz-Ruíz R, Ocampo-Mendoza J. 2010. Efecto de diferentes sustratos en el crecimiento de plántulas de tomate (*Lycopersicum esculentum* MILL.). *Ra Ximhai* 6(3): 365-372.
- Pang X, Li D, Peng A. 2001. Application of rare-earth elements in the agricultura of China and its environmental Behavior in soil. *Environmental Science and Pollution Research* 1(2): 124-129. <https://doi.org/10.1007/BF02987718>

- Ramírez-Martínez M, Trejo-Téllez LI, Gómez-Merino FC, Castillo-González AM, Hernández-Ríos I, Hernández-Acosta E. 2012. Bioacumulación de potasio, calcio y lantano en tulipán tratado con lantano. *Terra Latinoamericana* 30(3): 229-238.
- Ramos SJ, Dinali GS, Oliveira C, Martins GC, Moreira CG, Siqueira JO, Guilherme LRG. 2016. Rare Earth Elements in the Soil Environment. *Current Pollution Reports* 2: 28-50. <https://doi.org/10.1007/s40726-016-0026-4>
- Redling K. 2016. Rare earth elements in agriculture with emphasis on animal husbandry. Dissertation, LMU München: Tierärztliche Fakultät. 360 p.
- Reiss C. 1993. Measuring the amount of ascorbic acid in cabbage. Available at: <https://www.ableweb.org/biologylabs/wp-content/uploads/volumes/vol-7/7-reiss.pdf>
- Ren Y, Ren X, Ma J, Yan L. 2016. Effects of mixed rare earth fertilizer on yield and nutrient quality of leafy vegetables during different seasons. *Journal of Rare Earths* 34(6): 638-643. [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(16\)60073-X](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(16)60073-X)
- Sapkota S, Sapkota S, Liu Z. 2019. Effects of nutrient composition and lettuce cultivar on crop production in hydroponic culture. *Horticulturae* 5(72): 1-8. <https://doi.org/10.3390/horticulturae5040072>
- Soares HR, Santos JJA, França e SÊF, Monteiro RM, Ferreira SG. 2019. Water and physiological relationships of lettuce cultivated in hydroponics with brackish waters. *Revista Ciência Agronômica* 50(2): 216-222. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20190025>
- Song K, Gao J, Li S, Sun Y, Sun H, An B, Hu T, He X. 2021. Experimental and theoretical study of the effects of rare earth elements on growth and chlorophyll of alfalfa (*Medicago sativa* L.) seedling. *Frontiers in Plant Science* 12: 731838. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.731838>
- Steidle NAJ, Moura LO, Lopes DC, Carlos LA, Martins LM, Ferraz LCL. 2017. Non-destructive prediction of pigment contents in lettuce based on Vis-NIR spectroscopy. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 97(7): 2015-2022. DOI: 10.1002 / jsfa.8002
- Teixeira da SJA 2014. How do rare earth elements (lanthanoids) affect root development and protocorm-like-body formation in hybrid *Cymbidium*? *Journal of Horticultural Research* 22(1):67-75. <https://doi.org/10.2478/johr-2014-0008>
- Torregrosa PV. 2008. Lanthanum carbonate in clinical practice. *Nefrología*. 28(S5): 11-4.
- Turra C, De Nadai FEA, Arruda BM, Sarriés GA, Barbosa JF, Teixeira CAL, Lai RAE. 2015. Effects of Lanthanum on *Citrus* Plant. *International Journal of New Technology and Research* 1(7): 48-50.

- Wahid PA, Valiathan MS, Kamalam NV, Eapen JT, Vijayalakshmi S, Prabhu RK, Mahalingam TR. 2000. Effect of rare earth elements on growth and nutrition of coconut palm and root competition for these elements between the palm and *Calotropis gigantean*. *Journal of Plant Nutrition* 23(3): 329-338. <https://doi.org/10.1080/01904160009382019>
- Xiaoqing L, Hao H, Chao L, Min Z, Fashui H. 2009. Physico-chemical property of rare earths-effects on the energy regulation of photosystem II in *Arabidopsis thaliana*. *Biologica Trace Element Research* 130:141-151. <https://doi.org/10.1007/s12011-009-8321-1>
- Yin H, Wang J, Zeng Y, Shen X, He Y, Ling L, Cao L, Fu X, Peng L, Chun C. 2021. Effect of the rare earth element lanthanum (La) on the growth and development of *Citrus* rootstock seedlings. *Plants* 10: 1388. <https://doi.org/10.3390/plants10071388>
- Yosoff SF, Muda MMT, Parvez A, Hajat AS, Mohd GF, Hassan H. 2015. Production system and harvesting stage influence on nitrate content and quality of butterhead lettuce. *Soil and Plant Nutrition Bragantia* 74(3): 322-330. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.0453>
- Zang X, Du Y, Wang L, Zhou Q, Huang X, Sun Z. 2015. Combined effects of lanthanum (iii) and acid rain on antioxidant enzyme system in soybean roots. *PLOS ONE* 10(7): e0134546. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0134546>
- Zhang C, Li Q, Zhang M, Zhang N, Li M. 2013. Effects of rare earth elements on growth and metabolism of medicinal plants. *Acta Pharmaceutia Sinica B* 3(1): 20-24. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsb.2012.12.005>