

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE HORTICULTURA



Potencial Bioestimulante de Extractos Botánicos Derivados de Biomasa de Forraje Verde Hidropónico Aplicados por Aspersión Foliar en Plántulas de Lechuga como Modelo Biológico

Por:

BERNARDO LUJAN RAMOS

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN HORTICULTURA

Saltillo, Coahuila, México
Junio 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO DE HORTICULTURA

Potencial Bioestimulante de Extractos Botánicos Derivados de Biomasa de Forraje Verde Hidropónico Aplicados por Aspersión Foliar en Plántulas de Lechuga como Modelo Biológico

Por:

BERNARDO LUJAN RAMOS

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN HORTICULTURA

Aprobada por el Comité de Asesoría:



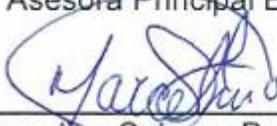
Dr. Adalberto Benavides Mendoza
Asesor Principal



MC. Lucia Marcial Salvador
Asesora Principal Externa



ME. Laura Olivia Fuentes Lara
Coasesora



Dr. Marcelino Cabrera De la Fuente
Coasesor

Dr. Alberto Sandoval Rangel
Coordinador de la División de Agronomía

Saltillo, Coahuila, México
Junio 2025



Declaración de no plagio

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

Autor principal

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Z3u/A', is written over a horizontal line.

Firma y Nombre

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por esta vida y por permitirme cumplir un sueño más, que busque desde el inicio de la carrera. Por ser de gran apoyo en momentos difíciles, por llenarme de experiencias buenas y malas que me han formado hasta el día de hoy, le doy gracias a Dios porque a pesar de sentirme mal en múltiples ocasiones no me abandonó y me proporcionó la sabiduría, paciencia y la fuerza para seguir siempre de pie.

A mi poderosa UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO, mi alma terra mater, quien me cobijo cálidamente con sus instalaciones, profesores y compañeros, le agradezco por hacerme parte de ella, a cuál considero mi segunda casa, quien con todo su sistema ayudo a formarme profesionalmente y me brindo todo el conocimiento y me hizo crecer personalmente. Gracias por brindarme todas las herramientas para hacer de uno de sus alumnos a un gran buitre, mi bella universidad le doy gracias por todo y siempre portare su escudo con orgullo, agradezco por tener el privilegio de ser un BUITRE de la NARRO.

Al departamento de Horticultura quien con mucho aprecio me proporcionó de los mejores maestros de mi rama a los cuales le poseo un afecto por brindarme de su tiempo y amistad y conocimiento.

A mis asesores de tesis MC. Lucia Marcial Salvador por su paciencia, tiempo y gran apoyo siempre en la realización de este proyecto de investigación, por brindarme de sus conocimientos y por ser excelente persona conmigo y al Dr. Adalberto Benavides Mendoza por sus años de experiencia y tiempo dedicado a este proyecto.

A mis amigos y compañeros Ana Daniela Medina Robles, H. Marilyn Miranda Melo y Ismael Lujan Tetlale por acompañarme y ser de las mejores amistades, por compartir risas, experiencias y grandes momentos juntos. A ustedes Gerardo Mendoza Olguin, Alondra Yesenia Álvarez Palacios, Brenda Viviana Ramírez Ramírez, Jhovana Orduña Orduña por formar parte de mi proyecto y ayudarme cuando lo necesité.

DEDICATORIAS

A mis padres:

Ma. Francisca Ramos Ahuanta y Bernardo Lujan Tecalixco, porque gracias a ustedes soy quien soy. Su ejemplo de trabajo incansable, honestidad y humildad ha sido mi mayor guía a lo largo de este camino. Gracias, mamá, por tu ternura, tus oraciones, tus consejos sabios y por enseñarme que el amor se demuestra en los detalles más simples. Gracias, papá, por tu fortaleza, tu dedicación y por enseñarme con tu vida que todo esfuerzo tiene su recompensa. No hay palabras suficientes para agradecerles los sacrificios que hicieron para darme una educación y una vida digna. Esta meta que hoy se cumple no sería posible sin todo lo que me han dado, sin su apoyo silencioso pero constante, y sin su inmenso amor.

A mis hermanos:

Alicia, Cándida y Urbano Lujan Ramos, por ser parte fundamental de mi historia. A cada uno de ustedes, gracias por su compañía en este recorrido, por sus palabras de aliento en los momentos difíciles y por compartir conmigo no solo los buenos momentos, sino también los retos y las incertidumbres. Su cariño, comprensión y presencia han sido una fuente de fuerza y motivación para no rendirme y continuar, incluso cuando las circunstancias se volvían complicadas.

Esta tesis no solo representa el cierre de una etapa académica, sino también el reflejo del esfuerzo colectivo de una familia que ha estado presente en cada paso. La dedico con profundo amor, respeto y gratitud a ustedes, quienes han creído en mí incluso cuando yo mismo dudaba.

Gracias por ser mi base, mi sostén y mi inspiración.

INDICE

AGRADECIMIENTOS.....	IV
DEDICATORIAS.....	V
ÍNDICE DE CUADROS.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1 Bioestimulantes	3
2.2 Extractos botánicos como bioestimulantes	3
2.2.1 Principales compuestos bioactivos presentes en extractos vegetales	6
2.2.2. Mecanismos de absorción y transporte tras la aplicación foliar.....	7
2.3 Extractos botánicos aplicados como bioestimulantes foliares	7
2.3.1 Vías de aplicación: foliar VS edáfica.	8
2.4 Uso del yodo como nutriente benéfico	9
2.5 Características del cultivo de lechuga	9
2.5.1 Ciclo fenológico del cultivo de lechuga	10
2.5.2 Importancia económica de la lechuga	10
3.1 Ubicación de la zona de estudio.....	12
3.2 Material biológico.....	12
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	19
4. CONCLUSIONES.....	25
5. LITERATURA CITADA	26

ÍNDICE DE CUADROS

Tabla 1 Descripción de tratamientos y cantidad de extracto concentrado utilizado por L de agua para obtener los diferentes extractos botánicos diluidos para la aspersión de plántulas de lechuga. _____	13
Tabla 2 Efecto de los HGFE sobre los parámetros agronómicos en plántulas de lechuga. _____	19
Tabla 3 Efecto de la aspersión de los HGFE sobre algunos parámetros bioquímicos evaluados en plántulas de lechuga. _____	20
Tabla 4 Efecto de la aspersión de los HGFE sobre el contenido de minerales en la raíz de la lechuga _____	21
Tabla 5 Efecto de la aspersión de los HGFE sobre el contenido de minerales en la biomasa foliar de la lechuga. _____	23

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Siembra de semillas _____	12
Figura 2 Establecimiento del cultivo _____	13
Figura 3 Aplicación de los HGFE _____	14
Figura 4 Medición de algunas variables agronómicas _____	15
Figura 5 Muestras liofilizadas _____	16
Figura 6 Digestión de muestras para determinar el contenido de minerales _____	18

RESUMEN

Los bioestimulantes vegetales se posicionan como una alternativa segura y ecológica para mejorar la productividad de los cultivos, por lo tanto el objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de los extractos botánicos del forraje verde hidropónico (HGFE), obtenidos a partir del pretratamiento de semillas de maíz con diferentes concentraciones de yoduro y yodato de potasio y un testigo (agua destilada), sobre los parámetros morfológicos, bioquímicos y contenido de minerales de plantas de lechuga mediante aplicaciones foliares. El experimento se llevó a cabo en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Buenavista, Saltillo, Coahuila. Se trabajó con semillas de lechuga variedad Parris Island Cos. El experimento se estableció bajo un diseño completamente al azar con 5 tratamientos y 4 repeticiones. Después de 42 días después del trasplante se evaluaron las variables agronómicas, bioquímicas y contenido de minerales. Las aplicaciones de los extractos botánicos procedentes de biomasa del forraje verde hidropónico de semillas tratadas con yodo presentaron un efecto significativo sobre la longitud de la raíz de la lechuga. Por otra parte, los tratamientos: T1: HGFE-KI 1×10^{-3} mol L⁻¹, T2: HGFE-KI 0.5×10^{-3} mol L⁻¹, T4: HGFE-KIO₃ 0.5×10^{-3} mol L⁻¹ fueron diferentes al testigo T5: HGFE-H₂O en cuanto al potencial antioxidante y en cuanto al contenido mineral, los valores se encontraron dentro del rango considerado óptimo para el cultivo de lechuga.

Palabras claves: Bioestimulación, extractos botánicos, bioestimulantes, aplicación foliar, *Lactuca sativa*.

1. INTRODUCCIÓN

La agricultura está marcada por una creciente demanda de alimentos debido al constante aumento de la población mundial, lo que plantea grandes desafíos en términos de sostenibilidad. En este contexto, los bioestimulantes vegetales se posicionan como una alternativa segura y ecológica para mejorar la productividad de los cultivos (Martínez-Lorente *et al.*, 2024). Los bioestimulantes son sustancias que trabajan interna y externamente en la planta, aumentando la disponibilidad de nutrientes, mejorando la estructura, incrementando la velocidad, eficiencia metabólica y fotosintética, por lo que su empleo en la agricultura protegida puede ser una alternativa a la problemática descrita (Barraza *et al.*, 2019).

Los bioestimulantes ofrecen el potencial de reducir la dependencia de agentes químicos artificiales, al tiempo que mejoran la eficiencia nutricional y promueven el crecimiento de las plantas en condiciones de estrés abiótico, así como en condiciones de ausencia de estrés. Los bioestimulantes de uso común, que son amigables con la ecología y la salud humana, abarcan sustancias inorgánicas y sustancias naturales. En particular, dar prioridad a los bioestimulantes respetuosos con el medio ambiente es crucial para prevenir problemas como la degradación del suelo y la contaminación del aire y el agua (Asif *et al.*, 2023).

Dentro de los bioestimulantes, los extractos botánicos destacan como una opción prometedora debido a su contenido de metabolitos secundarios, como compuestos fenólicos, flavonoides y alcaloides, que actúan como promotores fisiológicos del desarrollo vegetal. La diversidad de fitoquímicos presentes en estos extractos influye positivamente en la síntesis de metabolitos primarios y secundarios, particularmente polifenoles en las plantas tratadas. Su aplicación foliar ha sido considerada una estrategia efectiva, ya que permite una absorción rápida y directa, favoreciendo respuestas metabólicas aceleradas y beneficiosas para el crecimiento y la fisiología del cultivo (Neira *et al.*, 2014).

En este contexto, la lechuga (*Lactuca sativa* L.) constituye una especie modelo ideal para evaluar los efectos de los extractos botánicos, debido a su rápido ciclo de

crecimiento, sensibilidad a tratamientos exógenos y alta relevancia en la producción hortícola. Es una planta herbácea de sabor suave, comúnmente de color verde intenso, con una gradación de tonalidad que se aclara hacia la base del tallo y se oscurece en la punta de las hojas. A nivel global, existe una amplia diversidad de variedades comerciales de lechuga. En México, las más cultivadas son la Romana y la Orejona, que en conjunto representan aproximadamente el 98 % de la producción nacional, aunque también se cultivan otras variedades como Baby leaf y Escarola (SADER, 2021).

Objetivo general: Evaluar el impacto en la morfología, bioquímica y contenido mineral de plantas de lechuga de los extractos botánicos obtenidos del forraje verde hidropónico proveniente de semillas de maíz tratadas con diferentes concentraciones de yoduro y yodato de potasio.

Objetivos específicos

1. Investigar la composición y el potencial bioestimulante de los extractos botánicos (HGFE) obtenidos a partir de la biomasa del forraje verde hidropónico (FVH).
2. Determinar la respuesta de las variables agronómicas de la lechuga ante la aspersion de los distintos extractos botánicos.
3. Determinar la respuesta bioquímica y del contenido mineral de la lechuga ante la aspersion de los distintos extractos botánicos.

Hipótesis: La aplicación de extractos botánicos de forraje verde, obtenidos de semillas de maíz pretratadas con diferentes concentraciones de yodo y yoduro de potasio, mejora los parámetros morfológicos y bioquímicos, así como el contenido mineral de lechuga en comparación con el uso de extractos provenientes de semillas tratadas únicamente con agua destilada.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Bioestimulantes

Un bioestimulante es una sustancia o microorganismo que, al aplicarse a las semillas, plantas o rizosfera, estimula procesos fisiológicos naturales que favorecen la absorción y eficiencia en el uso de nutrientes, mejoran la tolerancia al estrés abiótico y contribuyen a incrementar la calidad y el rendimiento de los cultivos (Chico-Ruíz, 2023). En este contexto, un bioestimulante vegetal se define como un producto capaz de promover procesos relacionados con la nutrición vegetal, independientemente de su contenido nutricional, con el propósito de optimizar aspectos clave como la eficiencia en el uso de nutrientes, la resiliencia frente a condiciones ambientales adversas, la calidad de la producción agrícola y la disponibilidad de nutrientes en el suelo y la rizosfera (Ricci *et al.*, 2019).

Los bioestimulantes se presentan en diversas formulaciones y contienen una amplia variedad de ingredientes activos. Entre los más comunes se encuentran las sustancias húmicas (ácidos húmicos y fúlvicos), extractos de algas marinas, bacterias y hongos beneficiosos. Algunos productos también incorporan quitosano (una forma soluble de la quitina), hidrolizados de proteínas y compuestos inorgánicos como el silicio. Estos bioestimulantes no solo mejoran la absorción y eficiencia en el uso del agua y los nutrientes, sino que también promueven una mejor arquitectura radical, estimulan el crecimiento lateral de las raíces e inducen mecanismos de resistencia sistémica en las plantas (Albrecht, 2019).

2.2 Extractos botánicos como bioestimulantes

Tradicionalmente, los extractos botánicos han sido obtenidos a partir de plantas medicinales debido a su rica composición en metabolitos bioactivos. Sin embargo, actualmente se explora el uso de cultivos agrícolas abundantes como fuente alternativa, con el objetivo de facilitar su disponibilidad, reducir costos y favorecer la producción sostenible de bioestimulantes. Las plantas medicinales que

comúnmente son empleadas para la obtención de extractos botánicos podemos mencionar; el ajo (*Allium sativum*), la moringa (*Moringa oleifera*) y la sábila o aloe vera (*Aloe barbadensis*). Estas especies son ampliamente reconocidas por su alto contenido de compuestos bioactivos con propiedades antimicrobianas, antioxidantes, estimulantes del crecimiento y regeneradoras, lo que las hace valiosas en aplicaciones medicinales, cosméticas y agrícolas (Singh *et al.*, 2024).

La *Moringa oleifera* Lam. ha ganado mucha atención debido a su uso potencial como alimento funcional no solo para la salud humana sino también para la salud animal, así como para la agricultura. Se demostró que el extracto de hoja de *Moringa oleifera* es una rica fuente de compuestos bioactivos incluyendo carbohidratos, compuestos fenólicos, carotenoides, ácidos grasos, aminoácidos esenciales y péptidos funcionales (Pop *et al.*, 2022).

El ajo contiene compuestos bioactivos como organosulfurados, fenoles y saponinas con actividades biológicas, a saber, antioxidantes (Tavares *et al.*, 2021), en la investigación de (Gedik & Mugan-Ertugral, 2019) se demostró que el extracto a base de ajo funcionó como bioestimulante debido a que el cultivo de calabacín mostró ayudar en el mayor vigor vegetativo, mayor contenido de clorofila en hojas y una mejor capacidad de inducción floral, además de que se encontró una mayor cantidad antioxidante.

El aloe vera es una planta suculenta conocida por sus propiedades medicinales, que contiene numerosos compuestos bioactivos como polisacáridos, compuestos fenólicos, vitaminas y minerales (Mensah *et al.*, 2025). El neem (*Azadirachta indica*) se caracteriza por sus propiedades antioxidantes, antifúngicas y antibacterianas y contiene varios compuestos bioactivos, los estudios en los campos concernientes demuestran que los compuestos bioactivos y los extractos de neem tienen un efecto regulador sobre varios mecanismos biológicos, se ha evidenciado a través de diferentes estudios que los extractos de neem tienen el potencial de eliminar radicales libres y reducir el daño mediado por ROS a las células (Sarkar *et al.*, 2021).

Por otra parte, entre los cultivos que surgen como alternativa para obtener extractos botánicos destacan especies como el maíz por los compuestos fenólicos y las antocianinas que son algunos de los compuestos más estudiados y representativos de estas gramíneas, los carotenoides son un grupo de moléculas pertenecientes a los compuestos terpénicos, presentes en un gran número de razas de maíz pigmentadas, principalmente las amarillas, cuya actividad biológica incorpora un amplio espectro. Los péptidos bioactivos se pueden encontrar en abundancia en el maíz, con efectos biológicos muy diverso. Otros compuestos con actividad biológica que se encuentran en el maíz pigmentado son los almidones resistentes, algunos ácidos grasos, fitoesteroles, policosanoles, fosfolípidos, ácido ferúlico y flobafenos, así como una gran variedad de vitaminas, elementos y fibras (Sánchez-Nuño *et al.*, 2024).

Por lo tanto, la incorporación de extractos de plantas puede estimular a las plantas, desencadenando diversas reacciones internas, ayudando a las plantas a resistir mejor el estrés ambiental y, en última instancia, promoviendo el crecimiento y desarrollo de las plantas (Han *et al.*, 2024). Su uso se ha comparado con otros bioestimulantes como algas o ácidos húmicos, destacando por su origen natural y multifuncionalidad (Poojar *et al.*, 2017).

Los extractos botánicos pueden obtenerse mediante solventes como agua, etanol o metanol, y se elaboran a partir de distintas partes de la planta (hojas, raíces, semillas). Los solventes comúnmente utilizados en la extracción de plantas medicinales son solventes polares (por ejemplo, agua, alcoholes), polares intermedios (por ejemplo, acetona, diclorometano) y no polares (por ejemplo, n-hexano, éter, cloroformo). En general, los procedimientos de extracción incluyen maceración, digestión, decocción, infusión, percolación, extracción Soxhlet, extracción superficial, extracciones asistidas por ultrasonidos y asistidas por microondas (Abubakar & Haque, 2020).

2.2.1 Principales compuestos bioactivos presentes en extractos vegetales

Estos extractos contienen una diversidad de metabolitos secundarios como fenoles, flavonoides, terpenos y saponinas, así como aminoácidos, esteroides, betaínas, vitaminas y minerales esenciales en distintas concentraciones (Alejandro Espinosa-Antón *et al.*, 2020). Estos compuestos actúan como antioxidantes o mimetizan la acción de hormonas vegetales, favoreciendo la activación de respuestas fisiológicas benéficas en las plantas tratadas (Drago *et al.*, 2006).

Los compuestos fenólicos son metabolitos secundarios no esenciales presentes en una amplia variedad de frutas, verduras, raíces, cereales y bebidas. Estructuralmente, se caracterizan por poseer uno o más grupos hidroxilo unidos a un anillo aromático y se clasifican, en términos generales, en dos grupos principales: flavonoides y no flavonoides (Gonz & Cuadrado, 2022). Junto con ciertas vitaminas, estos compuestos son considerados potentes antioxidantes dietéticos. En las plantas, se han identificado miles de compuestos fenólicos, los cuales se agrupan en distintas clases según su estructura química y grupo funcional, desempeñando roles clave en la defensa vegetal y la interacción con el ambiente (Peñarrieta *et al.*, 2014).

La vitamina C, también conocida como ácido ascórbico, es un compuesto abundante en las plantas, donde puede alcanzar concentraciones superiores a 20 mM en los cloroplastos. Está distribuida en todas las estructuras celulares, incluida la pared celular. En algunas especies vegetales, el ascorbato actúa como precursor del tartrato y del oxalato. Además, desempeña un papel fundamental en la fotosíntesis, participando en la reacción de Mehler a través de la acción conjunta con la peroxidasa de ascorbato, lo que contribuye al mantenimiento del equilibrio redox en los transportadores de electrones fotosintéticos. Asimismo, actúa como cofactor de la enzima violaxantina de-epoxidasa, esencial para la fotoprotección mediante el ciclo de la xantofila. (Smirnoff & Wheeler, 2000).

El potencial antioxidante se define como la capacidad de neutralizar los radicales libres de oxígeno que se generan en exceso debido a las influencias ambientales

(Jakubczyk *et al.*, 2020). Las plantas tienen una capacidad innata para sintetizar antioxidantes no enzimáticos. Sin embargo, en condiciones de estrés biótico y abiótico, la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS) aumenta en las plantas, lo que resulta en la inducción de estrés oxidativo. En respuesta al aumento del estrés oxidativo, las plantas aumentan la producción y acumulación de varios antioxidantes de bajo peso molecular (por ejemplo, vitamina C, vitamina E, ácidos fenólicos, etc.) y metabolitos secundarios antioxidantes de alto peso molecular, como los taninos (Kasote *et al.*, 2015).

2.2.2. Mecanismos de absorción y transporte tras la aplicación foliar

Los compuestos bioactivos aplicados foliarmente pueden ingresar a los tejidos vegetales a través de los estomas o por difusión directa a través de la cutícula, mecanismos que dependen de su peso molecular, polaridad y de la formulación del extracto. La eficiencia de absorción está influenciada por diversos factores fisicoquímicos, como el pH de la solución, la presencia de tensioactivos, la solubilidad de los compuestos, así como las características estructurales de la hoja, incluyendo el grosor de la cutícula y la densidad estomática, la optimización de estos parámetros es clave para maximizar la eficacia de los bioestimulantes aplicados por vía foliar. (Tredenick *et al.*, 2019).

2.3 Extractos botánicos aplicados como bioestimulantes foliares

La aplicación foliar de los extractos botánicos en cultivos hortícolas ha demostrado beneficios tanto en el crecimiento como en la calidad fisiológica y nutracéutica de las plantas. En investigaciones recientes se ha demostrado que la aplicación foliar de extractos de aloe vera, mejoró el crecimiento y rendimiento de las plantas, además de ayudar a incrementar su valor nutricional en cardo mariano *Sylibum marianum* al mejorar los niveles de componentes bioactivos (Alkuwayti *et al.*, 2022).

Un bioestimulante a base de extractos de algas y otros extractos vegetales fue capaz de reducir los tiempos de maduración y el tamaño de los frutos, al tiempo que aumentó ligeramente los valores nutricionales y nutraceuticos, dando lugar a frutos de tomate más comercializables (Mannino *et al.*, 2020). Las aplicaciones foliares de bioestimulantes en plantas complementadas con fertilización del suelo promovieron significativamente la floración temprana. Este adelanto fenológico se acompañó de una mayor acumulación y una distribución más eficiente de la materia seca en el conjunto de flores de cacao, lo cual sugiere una mejora en la asignación de recursos hacia los órganos reproductivos y un posible impacto positivo en el rendimiento del cultivo (Díaz-Leguizamón *et al.*, 2016).

2.3.1 Vías de aplicación: foliar VS edáfica.

Los extractos botánicos pueden aplicarse tanto al suelo (edáfica) como directamente sobre el follaje (foliar). La vía foliar es particularmente efectiva para una rápida absorción de compuestos bioactivos a través de estomas o poros cuticulares, permitiendo respuestas fisiológicas inmediatas. En contraste, la aplicación edáfica permite una interacción más prolongada con la rizosfera, influyendo en la absorción de nutrientes y en la actividad microbiana del suelo. La elección de la vía depende del tipo de cultivo, el objetivo de la bioestimulación y las características del extracto (Youssef *et al.*, 2022).

Se ha demostrado que las aplicaciones foliares pueden contribuir significativamente al aumento de los azúcares solubles en las hojas y a la mejora de la actividad fotosintética. Los resultados también indican que los extractos foliares de algas *Ascophyllum nodosum* representan una alternativa sostenible para optimizar el rendimiento fisiológico de las plantas. Por su parte, las aplicaciones vía suelo (drench) mostraron un efecto positivo sobre el intercambio gaseoso foliar y la eficiencia en el uso del agua, lo que resalta su potencial complementario en estrategias integradas de manejo. (Froni *et al.*, 2021).

2.4 Uso del yodo como nutriente benéfico

En la actualidad, el yodo no se reconoce como un elemento esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas. No obstante, algunos estudios informan de efectos beneficiosos del yodo, incluyendo un mejor crecimiento, y cambios en la tolerancia al estrés y la capacidad antioxidante, mientras que otros estudios informan que las aplicaciones de yodo no causan respuesta o incluso tienen efectos adversos, es un elemento que las plantas pueden absorber por distintas vías, ya sea a través del sistema radicular o mediante estructuras aéreas. En estas últimas, la absorción puede ocurrir tanto por medio de los estomas como a través de las ceras cuticulares con alto grado de instauración y gran capacidad para absorber yodo. Las formas químicas del yodo más comúnmente utilizadas para la fortificación de los cultivos son el yoduro de potasio y el yodato de potasio (Medrano-Macías *et al.*, 2016).

2.5 Características del cultivo de lechuga

La lechuga (*Lactuca sativa* L.) es una planta herbácea anual, dicotiledónea autógama, perteneciente a la familia *Compositae*. Su raíz es pivotante, corta y con ramificaciones; las hojas están colocadas en rosetas, desplegadas al principio. El borde de los limbos puede ser liso, ondulado o aserrado; su tallo es cilíndrico y ramificado muy corto, y no se ramifica cuando la planta está en el estado óptimo de cosecha (SIAP, 2024).

La lechuga es una verdura de hoja popular y juega un papel importante en la dieta y nutrición, además de las diferencias varietales, la calidad nutricional de la lechuga puede verse influenciada por factores ambientales como la luz, la temperatura, la temporada de crecimiento, las prácticas culturales, la aplicación de fertilizantes, el procesamiento posterior a la cosecha y las condiciones de almacenamiento (Mou, 2012). Sin embargo, su producción intensiva ha llevado a una dependencia excesiva de fertilizantes sintéticos (Muñante Carrillo & Tirado Rebaza, 2025).

2.5.1 Ciclo fenológico del cultivo de lechuga

La lechuga tarda entre 65 y 130 días en crecer, lo que varía según el cultivar. Sin embargo, los agricultores a menudo comienzan a recoger las hojas antes, alrededor de 30 a 70 días después del trasplante de las plántulas. El tiempo exacto para que su hoja verde madure depende no solo de la variedad, sino también de las condiciones de cultivo locales y las prácticas agrícolas (EOS DATA ANALYTICS, 2025).

Germinación: Las semillas de lechuga germinan a partir de los 5 °C, con una temperatura óptima entre 16 y 20 °C. Temperaturas superiores a 20 °C inhiben la germinación, por lo que puede ser necesario enfriar el ambiente en siembras de verano (Guide, 2021).

Siembra y trasplante: La lechuga puede establecerse mediante siembra directa o trasplante. Los trasplantes se realizan después de las 4–6 semanas después de la siembra, dependiendo del desarrollo de sistema radicular de las plántulas (Guide, 2021).

Manejo del cultivo: Es un cultivo de ciclo corto que requiere riego constante y clima fresco. Necesita de 25–30 cm de agua durante su ciclo. Es muy sensible a la falta de agua y a temperaturas mayores de 30 °C, que pueden inducir espigado y amargor. La cosecha debe realizarse a tiempo, ya que retrasos reducen la calidad comercial del producto debido a su alta perecibilidad (Guide, 2021).

2.5.2 Importancia económica de la lechuga

La producción de lechuga en México ha mostrado un crecimiento constante en los últimos años. En 2020, alcanzó las 539 mil toneladas, lo que representa un incremento del 4.5 % respecto a las 516 mil toneladas obtenidas en 2019. Las exportaciones también han seguido una tendencia ascendente, según datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) y la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). Entre 2017 y 2019, la producción pasó de 481 mil a 516 mil toneladas, lo que equivale a una tasa media de crecimiento anual

del 3.6 % (SADER, 2021). Para 2023, la producción nacional se elevó a 553 mil toneladas, lo que representa un aumento del 11.9 % respecto al promedio de los últimos diez años, aunque reflejó una disminución del 3.0 % en comparación con el volumen registrado en 2022 (SIAP, 2024).

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Ubicación de la zona de estudio

El experimento se estableció en uno de los invernaderos que se encuentra en el área de investigación del departamento de Horticultura donde la radiación fotosintéticamente activa alcanzó valores máximos de $1200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ entre 13:00 y 15:30, así como también una temperatura máxima de $57 \text{ }^\circ\text{C}$ y una temperatura mínima de $22 \text{ }^\circ\text{C}$, con una humedad relativa promedio de 45 %.

3.2 Material biológico

Como material vegetal para el experimento se utilizó semillas de lechuga variedad Parris Island Cos.

Se sembraron las semillas de lechuga en charolas de poliestireno de 200 cavidades previamente desinfectadas, una vez que el sistema radicular cubrió todo el cepellón, las plántulas se trasladaron en contenedores de poliestireno de 1 L con sustrato de peat moss y perlita 1:1 (v:v), para el trasplante se trabajó bajo un diseño completamente al azar con 5 tratamientos y 4 repeticiones, se tuvieron 4 plantas por cada repetición, sumando un total de 80 plantas en todo el experimento.



Figura 1 Siembra de semillas

Para cubrir las necesidades de cultivo se utilizó un sistema de riego localizado a una presión de 4 PSI con un gasto por gotero de 25 ml por minuto con una solución

nutritiva Steiner al 25% durante los primeros 14 días, posteriormente se aumentó al 50%.

Después del trasplante se aplicó el fungicida Captan en forma preventiva en concentración de 2.5 g L^{-1} de agua con intervalos de 12-15 días. Después de una semana de adaptación, las plantas se asperjaron usando los extractos botánicos diluidos (HGFE) de acuerdo al tratamiento correspondiente, posteriormente se realizaron otras dos aspersiones cada 15 días.



Figura 2 Establecimiento del cultivo

En la Tabla 1 se presenta la cantidad de extracto botánico que se aplicó de forma foliar en cada uno de los tratamientos evaluados. Cabe mencionar que los extractos botánicos fueron obtenidos a partir de biomasa seca de forraje verde hidropónico de maíz y estandarizados en función de su concentración total de compuestos fenólicos, con el fin de asegurar uniformidad en la actividad bioestimulante.

Tabla 1 Descripción de tratamientos y cantidad de extracto concentrado utilizado por L de agua para obtener los diferentes extractos botánicos diluidos para la aspersión de plántulas de lechuga.

Tratamientos	Fenoles totales (mg L^{-1})	ml del extracto concentrado para un L de agua
T1: HGFE-KI $1 \times 10^{-3} \text{ mol L}^{-1}$	825.70	18.18
T2: HGFE-KI $0.5 \times 10^{-3} \text{ mol L}^{-1}$	929.95	16.13

T3: HGFE-KIO₃ 1 x 10⁻³ mol L⁻¹	800.33	18.75
T4: HGFE-KIO₃ 0.5 x 10⁻³ mol L⁻¹	879.70	17.06
T5: HGFE-H₂O	703.20	21.35



Figura 3 Aplicación de los HGFE

Después de 4 días de la última aplicación se recolectaron las plantas para determinar algunos parámetros morfológicos como la biomasa fresca (parte aérea y raíz): los datos de peso fresco de las plántulas fueron evaluadas mediante una balanza digital marca Rhino. La raíz se extrajo separando el sustrato del vaso manualmente y se retiró el exceso de sustrato con abundante agua, la longitud de la raíz se midió con un flexómetro marca Truper, para obtener el peso seco y poder determinar el contenido de minerales toda la raíz y una tercera parte de la biomasa aérea se colocaron en bolsas de papel previamente etiquetados en una estufa de secado marca Linderberg/blue modelo GO1350C1 por 72 horas aproximadamente, a una temperatura de 70°C, transcurrido este tiempo, se pesaron en la balanza. El diámetro y altura del tallo se determinaron con un vernier digital marca Steren.



Figura 4 Medición de algunas variables agronómicas

El resto de la biomasa aérea se almacenó a una temperatura de -80°C en el ultracongelador para después liofilizar las muestras y molerlas con mortero de mano para así poder determinar algunas variables bioquímicas.



Figura 5 Muestras liofilizadas

a) Fenoles totales

En cuanto a la determinación de fenoles se realizó en base al método de (Ainsworth & Gillespie, 2007). Para la extracción de la muestra se colocaron 100 mg de tejido liofilizado en un tubo de 2 mL, y se adicionaron 2 mL de solución de extracción (agua: acetona 1:1 v/v). Después se agitaron 20 s en un vórtex y se pasaron al sonicador por 5 min, las muestras se centrifugaron a 15,231 g durante 10 min a 4 °C para obtener el sobrenadante. La cuantificación se realizó agregando 50 µL de cada muestra, 200 µL de reactivo de Folin Ciocalteu al 100 %, 500 µL de carbonato de sodio al 20 % y 5 mL de agua destilada en tubos de ensayo. La mezcla se dejó reposar durante 30 minutos a 45°C antes de ser leída a una longitud de onda de 750 nm en un espectrofotómetro UVv-Vis (Genesis 10s UVv-Vis, Thermo Scientific, Waltham, MA, EE. UU.). Los resultados de los fenoles se expresaron en mg g⁻¹, lo que significa miligramos equivalentes de ácido gálico por gramo de peso seco (mg g⁻¹).

b) Potencial antioxidante:

Se tomaron 100 mg del material macerado y se colocaron en un tubo para centrifuga, se le añadieron 2 mL de 0.1 M de buffer de fosfatos pH 7.2, se sometió a sonicación por 5 min, posteriormente se llevó a cabo una centrifugación a 15,231 g por 10 min a 4 °C. A continuación, el sobrenadante fue recolectado y filtrado con una membrana de nylon. Se diluyó en una proporción 1:15 con buffer de fosfatos, la extracción permitió la cuantificación del potencial antioxidante y glutatión para los experimentos de la segunda y tercera fase. Los resultados para potencial antioxidante y glutatión fueron reportados en mM de ácido ascórbico en 100 mg de peso seco y en miligramos por gramo de peso seco (mg g^{-1}) respectivamente. El radical se obtuvo de la reacción del ABTS a 7 mM con persulfato de potasio a 2.45 Mm (1:1 v/v) en la oscuridad durante 16 h, posteriormente se diluyó con etanol al 20 % hasta obtener una absorbancia de 0.7 ± 0.01 a 754 nm. Luego, para determinar la capacidad antioxidante de los compuestos hidrofílicos, en un tubo de 2 mL se colocaron 20 microlitros del extracto y 980 microlitros de la dilución del radical ABTS, se agitaron durante 5 s y se dejaron reposar 7 min en oscuridad. La absorbancia se midió en un espectrofotómetro UV-VIS a 754 nm (Kotíková *et al.*, 2011). Los resultados se expresaron en mmol de equivalentes de ácido ascórbico por mg de peso seco.

c) Ácido ascórbico:

Se pesaron 10 g de cada HGFE en una balanza analítica, se le añadió 10 mL de ácido clorhídrico al 2%, y se mezcló por 10 min. El contenido se depositó sobre un embudo de filtración y se lavó tres veces con agua destilada. El líquido filtrado se depositó dentro de un matraz volumétrico de 100 mL, se continuó lavando el sólido hasta completar 100 mL con agua destilada. Se midieron 10 ml de extracto de vitamina C y se depositó en un matraz erlenmeyer de 125 mL y se tituló con solución de 2,6 diclorofenolindofenol (0.001N), hasta que apareció el primer tono rosa que persistió 30 s. Se repitió el proceso con un blanco (agua destilada). Las unidades fueron expresadas en mg L^{-1} (Principle & Apparatus, 2005).

d) Contenido de minerales

En cuanto al contenido de minerales en las plántulas de lechuga tanto de la parte aérea como de la raíz se realizó por medio del equipo de espectrofotometría ICP plasma previa digestión ácida de las muestras vegetales (Pequerul et al., 1993). El contenido de minerales en las plántulas de lechuga tanto de la parte aérea como de la raíz para la determinación del contenido de Nitrógeno se usó el método micro Kjeldahl (Sáez-Plaza et al., 2013) y para el contenido de P, K, Ca, Mg, S y Cu, Fe, Mn, Zn así como otros elementos (Al, Ba, Na, Si, Sr) se realizó por medio del equipo de espectrofotometría ICP plasma previa digestión ácida de las muestras vegetales (Pequerul et al., 1993).

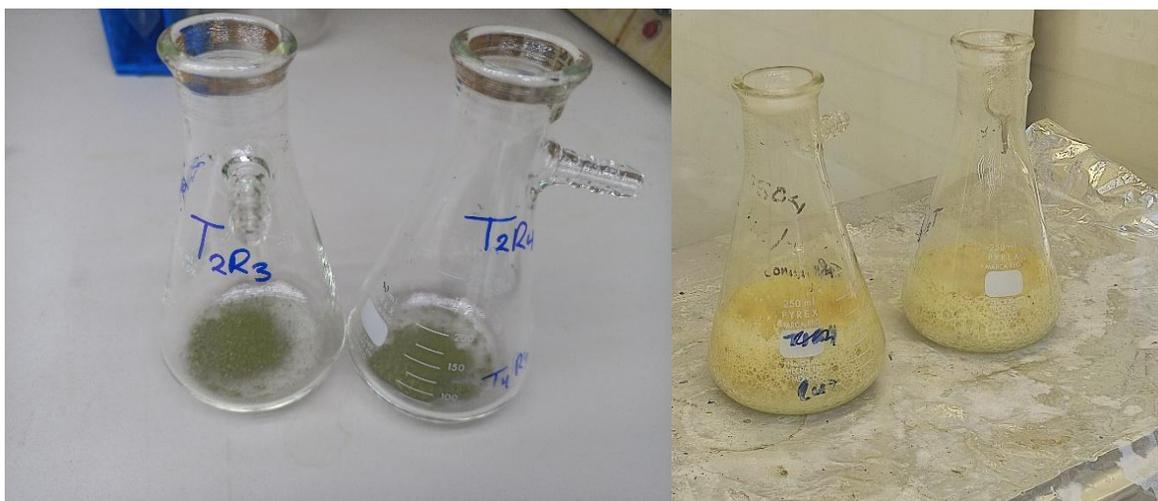


Figura 6 Digestión de muestras para determinar el contenido de minerales

Análisis estadístico

Se realizó con el software InfoStat versión 2020 y las gráficas se obtuvieron con el software Microsoft Excel 2016, los datos obtenidos se sometieron a una prueba de normalidad de Shapiro Wilk, corroborando la distribución normal de los valores. Luego, se efectuó un análisis de varianza (Anova), usando la prueba de comparación múltiple de Tukey ($P \leq 0.05$),

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este experimento, al examinar la Tabla 2, se encontraron diferencias estadísticamente significativas en cuanto al peso fresco de la raíz siendo mejor el T3: HGFE-KIO₃ 1 x 10⁻³ mol L⁻¹ un 22.74 % mayor al T5: HGFE-H₂O, también en la longitud de raíz se presentaron diferencias entre los cuatro tratamientos provenientes de los extractos botánicos donde se usó el yodo en la bioestimulación pregerminativa del maíz y el T5: HGFE-H₂O. En las demás variables evaluadas no se encontraron diferencias con el testigo. Contrario a lo reportado en estudios realizados con extractos acuosos de plantas *Achnatherum splendens* (Trin.) Nevski, *Artemisia frigida* Willd. y *Stellera chamaejasme* L., donde los parámetros de crecimiento de la parte aérea de lechuga aumentaron, mientras que los de las raíces disminuyeron (Wang *et al.*, 2022). De igual manera en otros estudios en el cual se utilizó extracto de plantas tropicales Auxym (TPE) incrementó el número de hojas, el rendimiento fresco y la biomasa seca de ambos cultivares en comparación con el testigo en los cultivares de lechuga salanova roja y verde (Giordano *et al.*, 2022).

Tabla 2 Efecto de los HGFE sobre los parámetros agronómicos en plántulas de lechuga.

Tratamientos	PFA g	PSA g	AT cm	DT cm	PFR g	PSR g	LR cm
T1: HGFE-KI 1x 10⁻³ mol L⁻¹	32.03 a	2.67 a	6.45 a	9.56 a	13.53 ab	0.80 a	29.47 a
T2: HGFE-KI 0.5 x 10⁻³ mol L⁻¹	35.03 a	3.06 a	6.81 a	9.44 a	13.77 ab	0.66 a	27.98 a
T3: HGFE-KIO₃ 1 x 10⁻³ mol L⁻¹	34.60 a	3.07 a	6.91 a	9.85 a	14.99 a	0.83 a	28.73 a
T4: HGFE-KIO₃ 0.5 x 10⁻³ mol L⁻¹	35.08 a	2.93 a	6.98 a	9.34 a	13.73 ab	0.72 a	28.81 a
T5: HGFE-H₂O	31.65 a	3.0 a	6.20 a	9.84 a	11.58 b	0.70 a	24.58 b
DMS	8.417	0.813	1.057	1.194	2.767	0.248	2.848

PFA: Peso fresco parte aérea, PSA: Peso seco parte aérea, AT: altura del tallo, DT: Diámetro del tallo, PFR: Peso fresco raíz, PSR: Peso seco raíz, LR: Longitud de la raíz. Letras diferentes por columna indican diferencias significativas de acuerdo con Tukey (p≤0.05).

Al analizar los resultados obtenidos de los parámetros bioquímicos evaluados (Tabla 3) podemos destacar el T4: HGFE-KIO₃ 0.5 x 10⁻³ mol L⁻¹ pues presentó valores numéricos más altos, aunque no significativos sobre los demás tratamientos en lo referente al contenido de fenoles totales, de igual manera no se encontraron diferencias en cuanto al contenido de ácido ascórbico. Por otra parte, el potencial antioxidante mostró un comportamiento distinto, con los tratamientos T1: HGFE-KI 1x 10⁻³ mol L⁻¹, T2: HGFE-KI 0.5 x 10⁻³ mol L⁻¹ y T4: HGFE-KIO₃ 0.5 x 10⁻³ mol L⁻¹ destacándose significativamente frente al (T5: HGFE-H₂O). A diferencia de lo reportado por (Atero-Calvo *et al.*, 2024) donde la aplicación de bioestimulantes Green Leaves, que comprende extracto de alga *Macrocystis* y contiene una mezcla de aminoácidos, extracto de licor de maíz, calcio y el compuesto bioactivo glicina betaína una dosis de 3 mL L⁻¹ incrementó significativamente la concentración de compuestos fenólicos, ascorbato y la capacidad antioxidante en plantas de lechuga. Sin embargo, se registró un aumento en el potencial antioxidante, lo cual podría atribuirse a otros mecanismos de defensa activados, como la acumulación de metabolitos no fenólicos (por ejemplo, glutatión, carotenoides o vitamina C) en los extractos botánicos utilizados. Es importante resaltar que el contenido de Ácido ascórbico en este estudio osciló de 31.85 a 38.98 mg 100 g⁻¹ valores considerablemente más altos a lo reportado por otros autores donde encontraron que el contenido de ácido ascórbico de los cultivares de lechuga varió de 4.81 a 10.3 mg 100 g⁻¹ FW al aplicarles de manera foliar extractos de hojas de moringa al 6% (Yaseen & Takacs-Hajos, 2022).

Tabla 3 Efecto de la aspersion de los HGFE sobre algunos parámetros bioquímicos evaluados en plántulas de lechuga.

Tratamientos	FT mg/g	AA mg 100 g ⁻¹	PO mM de AA/100 mg de Peso seco
T1: HGFE-KI 1x 10 ⁻³ mol L ⁻¹	23.12 a	32.07 a	90.73 a
T2: HGFE-KI 0.5 x 10 ⁻³ mol L ⁻¹	24.06 a	34.24 a	93.04 a
T3: HGFE-KIO ₃ 1 x 10 ⁻³ mol L ⁻¹	26.72 a	38.98 a	81.16 ab

T4: HGFE-KIO₃ 0.5 x 10⁻³ mol L⁻¹	27.67 a	36.79 a	91.50 a
T5: HGFE-H₂O	25.41 a	31.85 a	68.19 b
DMS	4.93	11.30	18.567

FT: Fenoles totales, AA: ácido ascórbico, PO: potencial antioxidante. Letras diferentes por columna indican diferencias significativas de acuerdo con Tukey ($p \leq 0.05$).

Efecto de la aspersión foliar de los extractos diluidos sobre el contenido de minerales en las plantas de lechuga

Una de las principales preocupaciones de la agricultura es optimizar la eficiencia de los nutrientes de las plantas para mejorar el rendimiento y la calidad de los cultivos (Fragalà *et al.*, 2023). Por tal motivo se determinó el contenido de minerales y se encontró que la concentración de algunos minerales en la raíz de la lechuga, aunque no se presentaron diferencias estadísticamente significativas, los valores más altos se hallaron en el T1: HGFE-KI 1x 10⁻³ mol L⁻¹ ya que la concentración de estos elementos (P, K, Ca, Mg, Fe, S, Mn y Zn) fueron mayores a todos los demás tratamientos (Tabla 4). En cuanto al contenido de Fe el T1: HGFE-KI 1x 10⁻³ mol L⁻¹ fue estadísticamente diferente al T5: HGFE-H₂O. En la literatura se ha documentado que la aplicación de sustancias húmicas (HS) mejoró la absorción de hierro mediante la modificación de la arquitectura radicular y la activación de mecanismos fisiológicos asociados a la adquisición de nutrientes (como el metabolismo y el equilibrio hormonal), nuestros resultados indican que los extractos botánicos también podrían inducir efectos similares (Zanin *et al.*, 2019). Los resultados obtenidos también están en línea con los reportado por otros autores donde la aplicación de bioestimulantes Green Leaves a una dosis de 5 mL L⁻¹ mejoró la absorción de la mayoría de los nutrientes (Atero-Calvo *et al.*, 2024).

Tabla 4 Efecto de la aspersión de los HGFE sobre el contenido de minerales en la raíz de la lechuga

Tratamientos	N %	P g·kg ⁻¹	K g·kg ⁻¹	Ca g·kg ⁻¹	Mg g·kg ⁻¹	S g·kg ⁻¹
---------------------	---------------	--------------------------------	--------------------------------	---------------------------------	---------------------------------	--------------------------------

T1: HGFE-KI 1×10^{-3} mol L⁻¹	2.92 a	1.42 a	21.92 a	7.19 a	1.63 a	4.76 a
T2: HGFE-KI 0.5×10^{-3} mol L⁻¹	2.99 a	1.13 a	17.18 a	5.46 a	1.37 a	3.78 a
T3: HGFE-KIO₃ 1×10^{-3} mol L⁻¹	2.86 a	1.20 a	18.83 a	5.98 a	1.49 a	4.28 a
T4: HGFE-KIO₃ 0.5×10^{-3} mol L⁻¹	2.82 a	1.31 a	15.84 a	4.75 a	1.23 a	4.64 a
T5: HGFE-H₂O	2.85 a	1.10 a	16.31 a	7.85 a	1.22 a	3.83 a
DMS	0.312	0.521	*	3.127	*	*
Tratamientos	Cu	Fe	Mn	Zn		
	mg·kg⁻¹	mg·kg⁻¹	mg·kg⁻¹	mg·kg⁻¹		
T1: HGFE-KI 1×10^{-3} mol L⁻¹	5.16 a	148.64 a	18.99 a	7.33 a		
T2: HGFE-KI 0.5×10^{-3} mol L⁻¹	3.15 b	83.50 b	15.04 a	4.21 b		
T3: HGFE-KIO₃ 1×10^{-3} mol L⁻¹	4.44 ab	101.19 b	13.06 a	5.14 b		
T4: HGFE-KIO₃ 0.5×10^{-3} mol L⁻¹	6.94 a	107.48 ab	15.16 a	4.85 b		
T5: HGFE-H₂O	3.09 b	83.21 b	11.20 a	3.94 b		
DMS	*	61.90	8.11	2.02		

Letras diferentes por columna indican diferencias significativas de acuerdo con Tukey ($p \leq 0.05$).

Al analizar los resultados obtenidos del contenido de minerales en la biomasa foliar de la lechuga y aunque no se encontraron diferencias estadísticamente significativas se puede observar que el T1: HGFE-KI 1×10^{-3} mol L⁻¹ presentó la concentración más alta en la mayoría de los minerales analizados (Tabla 5). Sin embargo, la mayoría de los minerales analizados se encontraron dentro de los

rangos suficientes para las plantas de lechuga. Considerando los niveles recomendados de nutrientes, se encontró una concentración adecuada de N, Ca, Mg, y S, mientras que los valores de P y K se encontraron por debajo de lo recomendado. En cuanto al Fe se detectaron niveles por encima de lo recomendado para Fe (Ag Analytical Services Lab, 2025), estos resultados coinciden con lo reportado por otros autores, quienes han señalado que la aplicación de bioestimulantes de manera foliar aminoácidos bioestimulantes (Perfectose™, líquido) mejoró el rendimiento y el valor nutritivo de la lechuga (Al-Karaki & Othman, 2023). De igual manera a lo reportado en otros estudios donde utilizaron bioestimulantes 2 mL L^{-1} y 4 mL L^{-1} se incrementó el contenido de nutrientes en la parte aérea de la lechuga (N, P, K y Mg) (Al-Karaki & Othman, 2023).

Tabla 5 Efecto de la aspersión de los HGFE sobre el contenido de minerales en la biomasa foliar de la lechuga.

Tratamientos	N %	P $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	K $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	Ca $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	Mg $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	S $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$
T1: HGFE-KI $1 \times 10^{-3} \text{ mol L}^{-1}$	3.64 a	1.98 a	41.97 a	12.35 a	4.47 a	4.70 a
T2: HGFE-KI $0.5 \times 10^{-3} \text{ mol L}^{-1}$	3.78 a	1.92 a	41.91 a	12.29 a	4.29 a	4.91 a
T3: HGFE-KIO₃ $1 \times 10^{-3} \text{ mol L}^{-1}$	3.71 a	2.05 a	41.24 a	11.53 a	3.61 a	4.73 a
T4: HGFE-KIO₃ $0.5 \times 10^{-3} \text{ mol L}^{-1}$	3.69 a	1.92 a	40.62 a	11.62 a	3.95 a	4.46 a
T5: HGFE-H₂O	3.59 a	1.87 a	42.34 a	11.55 a	4.13 a	4.55 a
DMS	0.292	0.456	7.504	2.955	1.733	*
Tratamientos	Cu $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	Fe $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	Mn $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	Zn $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		
T1: HGFE-KI $1 \times 10^{-3} \text{ mol L}^{-1}$	4.65 a	352.84 a	123.18 a	9.98 a		
T2: HGFE-KI $0.5 \times 10^{-3} \text{ mol L}^{-1}$	2.8 bc	263.5 a	106.99 a	8.08 a		

T3: HGFE-KIO₃ 1 x 10⁻³ mol L⁻¹	4.18 ab	134.24 a	80.04 a	8.75 a
T4: HGFE-KIO₃ 0.5 x 10⁻³ mol L⁻¹	3.58 ab	189.61 a	87.25 a	8.58 a
T5: HGFE-H₂O	2.65 c	231.78 a	97.56 a	7.88 a
DMS	*	298.288	79.111	3.121

Letras diferentes por columna indican diferencias significativas de acuerdo con Tukey ($p \leq 0.05$).

4. CONCLUSIONES

Los resultados permitieron cumplir el objetivo planteado, ya que la aplicación foliar de extractos botánicos estandarizados respecto a las variables agronómicas evaluadas no causó efectos negativos en los parámetros evaluados al contrario impactó de manera significativa en la longitud de la raíz de la lechuga.

A nivel fisiológico y nutrimental se observaron respuestas específicas, destacando un incremento significativo en el potencial antioxidante y en el contenido de hierro específicamente en la raíz.

Estos hallazgos sugieren que, si bien el efecto de los extractos fue limitado bajo las condiciones del presente estudio, existe un potencial bioestimulante selectivo que justifica su evaluación en condiciones diferentes o con ajustes en la dosis y frecuencia de aplicación.

5. LITERATURA CITADA

- Abubakar, A. & Haque, M. (2020). Preparation of medicinal plants: Basic extraction and fractionation procedures for experimental purposes. *Journal of Pharmacy And Bioallied Sciences*, 12(1), 1. https://doi.org/10.4103/jpbs.JPBS_175_19
- Ag Analytical Services Lab. (2025). *Interpretive Nutrient Levels for Plant Analysis: Lettuce*. <https://agsci.psu.edu/aasl/plant-analysis/plant-tissue-total-analysis/interpretive-nutrient-levels-for-plant-analysis/lettuce-any>
- Ainsworth, E. A. & Gillespie, K. M. (2007). Estimation of total phenolic content and other oxidation substrates in plant tissues using Folin–Ciocalteu reagent. *Nature Protocols*, 2(4), 875–877. <https://doi.org/10.1038/nprot.2007.102>
- Al-Karaki, G. N. & Othman, Y. (2023). Effect of foliar application of amino acid biostimulants on growth, macronutrient, total phenol contents and antioxidant activity of soilless grown lettuce cultivars. *South African Journal of Botany*, 154, 225–231. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2023.01.034>
- Albrecht, U. (2019). Plant Biostimulants: Definition and Overview of Categories and Effects. *EDIS*, 2019(3). <https://doi.org/10.32473/edis-hs1330-2019>
- Alejandro Espinosa-Antón, A., Mireya Hernández-Herrera, R. & Zapopan Jalisco, N. C. (2020). Extractos bioactivos de algas marinas como bioestimulantes del crecimiento y la protección de las plantas. *Artículo de Revisión Biotecnología Vegetal*, 20(4), 257–282.
- Alkuwayti, M. A., Aldayel, M. F., Yap, Y.-K. & El Sherif, F. (2022). Exogenous Application of Aloe vera Leaf Extract Improves Silybin Content in *Silybum marianum* L. by Up-Regulating Chalcone Synthase Gene. *Agriculture*, 12(10), 1649. <https://doi.org/10.3390/agriculture12101649>
- Asif, A., Ali, M., Qadir, M., Karthikeyan, R., Singh, Z., Khangura, R., Di Gioia, F. & Ahmed, Z. F. R. (2023). Enhancing crop resilience by harnessing the synergistic effects of biostimulants against abiotic stress. *Frontiers in Plant Science*, 14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1276117>
- Atero-Calvo, S., Izquierdo-Ramos, M. J., García-Huertas, C., Rodríguez-Alcántara, M., Navarro-Morillo, I. & Navarro-León, E. (2024). An Evaluation of the Effectivity of the Green Leaves Biostimulant on Lettuce Growth, Nutritional Quality, and Mineral Element Efficiencies under Optimal Growth Conditions. *Plants*, 13(7), 917. <https://doi.org/10.3390/plants13070917>
- Barraza, O., Ovalle, B. & Peña, E. (2019). Producción y caracterización de bioestimulantes para la producción agrícola a partir de residuos locales. *Revista Electrónica Anfei Digital*, 6(11), 1–9.
- Chico-Ruíz, J. (2023). ALTERNATIVAS DE MEJORA EN LA AGRICULTURA: MICROALGAS COMO BIOESTUMULANTE. *Sagasteguiana*, 11(1), 1–2.

<https://revistas.unitru.edu.pe/index.php/REVSAGAS/article/view/6050>

- Díaz-Leguizamón, J. J., Chingaté-Cruz, O. F., Sánchez-Reinoso, A. D. & Restrepo-Díaz, H. (2016). THE EFFECT OF FOLIAR APPLICATIONS OF A BIO-STIMULANT DERIVED FROM ALGAE EXTRACT ON THE PHYSIOLOGICAL BEHAVIOR OF LULO SEEDLINGS (*Solanum quitoense* CV. SEPTENTRIONALE). *Ciencia e Investigación Agraria*, 43(1), 3–3. <https://doi.org/10.4067/S0718-16202016000100003>
- Drago, M., Lopéz, M. & Sainz, T. (2006). Componentes bioactivos de alimentos funcionales de origen vegetal. *Revista Mexicana de Ciencias Farmaceuticas*, 37(4), 58–68. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57937408%0ACómo>
- EOS DATA ANALYTICS. (2025). *Cultivo de lechuga: cómo plantar, cuidar y cosechar*. <https://eos.com/blog/how-to-grow-lettuce/>
- Fragalà, F., Puglisi, I., Padoan, E., Montoneri, E., Stevanato, P., Gomez, J. M., Herrero, N., La Bella, E., Salvagno, E. & Baglieri, A. (2023). Effect of municipal biowaste derived biostimulant on nitrogen fate in the plant-soil system during lettuce cultivation. *Scientific Reports*, 13(1), 7944. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-35090-y>
- Frioni, T., VanderWeide, J., Palliotti, A., Tombesi, S., Poni, S. & Sabbatini, P. (2021). Foliar vs. soil application of *Ascophyllum nodosum* extracts to improve grapevine water stress tolerance. *Scientia Horticulturae*, 277, 109807. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109807>
- Gedik, S. & Mugan-Ertugral, S. (2019). The effects of marine tourism on water pollution. *Fresenius Environmental Bulletin*, 28(2), 863–866.
- Giordano, M., El-Nakhel, C., Carillo, P., Colla, G., Graziani, G., Di Mola, I., Mori, M., Kyriacou, M. C., Roupheal, Y., Soteriou, G. A. & Sabatino, L. (2022). Plant-Derived Biostimulants Differentially Modulate Primary and Secondary Metabolites and Improve the Yield Potential of Red and Green Lettuce Cultivars. *Agronomy*, 12(6), 1361. <https://doi.org/10.3390/agronomy12061361>
- Gonz, E. & Cuadrado, S. (2022). Effect of Phenolic Compounds on Human Health. In *Effect of Phenolic Compounds on Human Health*. <https://doi.org/10.3390/books978-3-0365-2899-1>
- Guide, C. P. (2021). Lettuce (Field). In *Newfoundland Labrador* (p. 6). <https://www.gov.nl.ca/ffa/files/FFA-Crop-Guide-Lettuce.pdf>
- Han, M., Kasim, S., Yang, Z., Deng, X., Saidi, N. B., Uddin, M. K. & Shuib, E. M. (2024). Plant Extracts as Biostimulant Agents: A Promising Strategy for Managing Environmental Stress in Sustainable Agriculture. *Phyton*, 93(9), 2149–2166. <https://doi.org/10.32604/phyton.2024.054009>
- Jakubczyk, K., Drużga, A., Katarzyna, J. & Skonieczna-Żydecka, K. (2020). Antioxidant Potential of Curcumin—A Meta-Analysis of Randomized Clinical

Trials. *Antioxidants*, 9(11), 1092. <https://doi.org/10.3390/antiox9111092>

- Kasote, D. M., Katyare, S. S., Hegde, M. V. & Bae, H. (2015). Significance of antioxidant potential of plants and its relevance to therapeutic applications. *International Journal of Biological Sciences*, 11(8), 982–991. <https://doi.org/10.7150/ijbs.12096>
- Kotíková, Z., Lachman, J., Hejtmánková, A. & Hejtmánková, K. (2011). Determination of antioxidant activity and antioxidant content in tomato varieties and evaluation of mutual interactions between antioxidants. *LWT - Food Science and Technology*, 44(8), 1703–1710. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2011.03.015>
- Mannino, G., Campobenedetto, C., Vigliante, I., Contartese, V., Gentile, C. & Berteà, C. M. (2020). The Application of a Plant Biostimulant Based on Seaweed and Yeast Extract Improved Tomato Fruit Development and Quality. *Biomolecules*, 10(12), 1662. <https://doi.org/10.3390/biom10121662>
- Martínez-Lorente, S. E., Martí-Guillén, J. M., Pedreño, M. Á., Almagro, L. & Sabater-Jara, A. B. (2024). Higher plant-derived biostimulants: Mechanisms of action and their role in mitigating plant abiotic stress. *Antioxidants*, 13(3), 318. <https://doi.org/10.3390/antiox13030318>
- Medrano-Macías, J., Leija-Martínez, P., González-Morales, S., Juárez-Maldonado, A. & Benavides-Mendoza, A. (2016). Use of Iodine to Biofortify and Promote Growth and Stress Tolerance in Crops. *Frontiers in Plant Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01146>
- Mensah, E. O., Adadi, P., Asase, R. V., Kelvin, O., Mozhdehi, F. J., Amoah, I. & Agyei, D. (2025). Aloe vera and its byproducts as sources of valuable bioactive compounds: Extraction, biological activities, and applications in various food industries. *PharmaNutrition*, 31, 100436. <https://doi.org/10.1016/j.phanu.2025.100436>
- Mou, B. (2012). Nutritional Quality of Lettuce. *Current Nutrition & Food Science*, 8(3), 177–187. <https://doi.org/10.2174/157340112802651121>
- Muñante Carrillo, K. A. & Tirado Rebaza, L. U. M. (2025). Efecto del hidrolizado de residuos de pescado en el cultivo de lechuga crespita (*Lactuca sativa*) en Tacna, Perú. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 13. <https://doi.org/10.53287/ozyq5541hg24i>
- Neira, R. T., Navarro, R. M., Leonelli, G. & Contreras, A. (2014). Efecto de dos extractos botánicos en el desarrollo y contenido de polifenoles de ají (*Capsicum annum* L.). 5, 115–127.
- Peñarrieta, J. M., Tejeda, L., Mollinedo, P., Vila, J. L. & Bravo, J. A. (2014). Compuestos fenolicos en los alimentos. *Revista Boliviana de Química*, 31(2), 68–81. <https://www.redalyc.org/pdf/4263/426339682006.pdf>

- Pequerul, A., Pérez, C., Madero, P., Val, J. & Monge, E. (1993). A rapid wet digestion method for plant analysis. In *Optimization of Plant Nutrition* (Vol. 2, pp. 3–6). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-017-2496-8_1
- Poojar, B., Ommurugan, B., Adiga, S., Thomas, H., Sori, R. K., Poojar, B., Hodlur, N., Tilak, A., Korde, R., Gandigawad, P., In, M., Sleep, R., Albino, D., Rats, W., Article, O., Schedule, P., Injury, C. C., Sori, R. K., Poojar, B., ... Gandigawad, P. (2017). Methodology Used in the Study. *Asian Journal of Pharmaceutical and Clinical Research*, 7(10), 1–5. <https://doi.org/10.4103/jpbs.JPBS>
- Pop, O. L., Kerezsi, A. D. & Ciont (Nagy), C. (2022). A Comprehensive Review of Moringa oleifera Bioactive Compounds—Cytotoxicity Evaluation and Their Encapsulation. *Foods*, 11(23), 3787. <https://doi.org/10.3390/foods11233787>
- Principle, A. & Apparatus, B. (2005). Official Methods of Analysis of AOAC INTERNATIONAL 18th Edition, 2005. *Official Methods of Analysis of AOAC INTERNATIONAL 18th Edition, 2005*, 0-935584-77-3, 4–5. https://doi.org/https://www.researchgate.net/publication/292783651_AOAC_2005
- Ricci, M., Tilbury, L., Daridon, B. & Sukalac, K. (2019). General Principles to Justify Plant Biostimulant Claims. *Frontiers in Plant Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00494>
- SADER. (2021). *Al alza, producción y exportación de lechuga mexicana*. <https://www.gob.mx/agricultura/prensa/al-alza-produccion-y-exportacion-de-lechuga-mexicana?idiom=es>
- Sáez-Plaza, P., Navas, M. J., Wybraniec, S., Michałowski, T. & Asuero, A. G. (2013). An Overview of the Kjeldahl Method of Nitrogen Determination. Part II. Sample Preparation, Working Scale, Instrumental Finish, and Quality Control. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 43(4), 224–272. <https://doi.org/10.1080/10408347.2012.751787>
- Sánchez-Nuño, Y. A., Zermeño-Ruiz, M., Vázquez-Paulino, O. D., Nuño, K. & Villarruel-López, A. (2024). Bioactive Compounds from Pigmented Corn (*Zea mays* L.) and Their Effect on Health. *Biomolecules*, 14(3), 338. <https://doi.org/10.3390/biom14030338>
- Sarkar, S., Singh, R. P. & Bhattacharya, G. (2021). Exploring the role of *Azadirachta indica* (neem) and its active compounds in the regulation of biological pathways: an update on molecular approach. *3 Biotech*, 11(4), 178. <https://doi.org/10.1007/s13205-021-02745-4>
- SIAP. (2024). *Panorama-Agroalimentario-2024* (p. 192).
- Singh, P., Bakshi, M. & . A. (2024). Natural plant extracts as a sustainable alternative to synthetic plant growth regulators: A review. *International Journal of Advanced Biochemistry Research*, 8(7), 281–287.

<https://doi.org/10.33545/26174693.2024.v8.i7d.1471>

- Smirnoff, N. & Wheeler, G. L. (2000). Ascorbic Acid in Plants: Biosynthesis and Function. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 19(4), 267–290. <https://doi.org/10.1080/07352680091139231>
- Tavares, L., Santos, L. & Zapata Noreña, C. P. (2021). Bioactive compounds of garlic: A comprehensive review of encapsulation technologies, characterization of the encapsulated garlic compounds and their industrial applicability. *Trends in Food Science & Technology*, 114, 232–244. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.05.019>
- Tredenick, E. C., Farrell, T. W. & Forster, W. A. (2019). Mathematical Modelling of Hydrophilic Ionic Fertiliser Diffusion in Plant Cuticles: Lipophilic Surfactant Effects. *Plants*, 8(7), 202. <https://doi.org/10.3390/plants8070202>
- Wang, K., Wang, T., Ren, C., Dou, P., Miao, Z., Liu, X., Huang, D. & Wang, K. (2022). Aqueous Extracts of Three Herbs Allelopathically Inhibit Lettuce Germination but Promote Seedling Growth at Low Concentrations. *Plants*, 11(4), 486. <https://doi.org/10.3390/plants11040486>
- Yaseen, A. A. & Takacs-Hajos, M. (2022). Evaluation of moringa (*Moringa oleifera* Lam.) leaf extract on bioactive compounds of lettuce (*Lactuca sativa* L.) grown under glasshouse environment. *Journal of King Saud University - Science*, 34(4), 101916. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.101916>
- Youssef, S. M., El-Serafy, R. S., Ghanem, K. Z., Elhakem, A. & Abdel Aal, A. A. (2022). Foliar Spray or Soil Drench: Microalgae Application Impacts on Soil Microbiology, Morpho-Physiological and Biochemical Responses, Oil and Fatty Acid Profiles of Chia Plants under Alkaline Stress. *Biology*, 11(12), 1844. <https://doi.org/10.3390/biology11121844>
- Zanin, L., Tomasi, N., Cesco, S., Varanini, Z. & Pinton, R. (2019). Humic Substances Contribute to Plant Iron Nutrition Acting as Chelators and Biostimulants. *Frontiers in Plant Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00675>