

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA  
PROGRAMA DOCENTE DE LA CARRERA DE  
INGENIERO AGRÓNOMO EN HORTICULTURA



Efecto de Aspersiones Foliaras de Ácido Glutámico y Silicio sobre el Rendimiento y  
Calidad de Frutos en Fresa (Fragaria × ananassa Duch.)

Por:

**MAURICIO ALVARADO GARCIA**

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

**INGENIERO AGRÓNOMO EN HORTICULTURA**

Saltillo, Coahuila de Zaragoza, México  
Junio 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA  
PROGRAMA DOCENTE DE LA CARRERA DE  
INGENIERO AGRÓNOMO EN HORTICULTURA

Efecto de Aspersiones Foliare de Ácido Glutámico y Silicio sobre el Rendimiento y  
Calidad de Frutos en Fresa (Fragaria × ananassa Duch.)

Por:

**MAURICIO ALVARADO GARCIA**

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

**INGENIERO AGRÓNOMO EN HORTICULTURA**

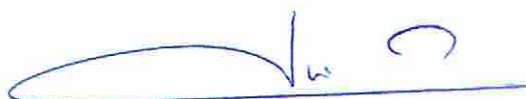
Aprobada por el Comité Asesor:



DRA. DANIELA ALVARADO CAMARILLO  
Asesor Principal



MC. ADOLFO BAYLON PALOMINO  
Asesor Principal Externo



DR. LUIS ALONSO VALDEZ AGUILAR  
Coasesor



DR. PEDRO PEREZ RODRIGUEZ  
Coasesor



DR ALBERTO SANDOVAL RANGEL  
Coordinador de la División de Agronomía



## Derechos de Autor

Todo el contenido incluido en la presente tesis se encuentra resguardado conforme a lo establecido por la Ley Federal del Derecho de Autor de los Estados Unidos Mexicanos y es propiedad del autor principal, quien asume la responsabilidad directa y declara, bajo protesta de decir verdad, que no se incurrió en plagio ni en prácticas académicas indebidas. Esto comprende: la reproducción de fragmentos o textos sin la debida citación de la fuente o del autor original (copiar y pegar); la reutilización de trabajos propios previamente publicados sin hacer referencia al documento original (autoplagio); la adquisición, apropiación o solicitud de datos o de la tesis para presentarlos como propios; la omisión de referencias bibliográficas o la cita textual sin el uso de comillas; el empleo de ideas o argumentos de otros autores sin otorgar el crédito correspondiente; así como el uso de material digital, como imágenes, videos, ilustraciones, gráficas, mapas o datos, sin citar la fuente o autor original.

Asimismo, se reconoce que cualquier uso distinto de estos materiales, incluyendo fines de lucro, reproducción, edición o modificación, será objeto de las sanciones correspondientes por parte del titular de los derechos de autor. En virtud de lo anterior, se asume la responsabilidad por las posibles consecuencias derivadas de cualquier forma de plagio, en caso de existir, y se declara que el presente trabajo no ha sido previamente presentado en ninguna otra institución educativa, organización o medio, ya sea público o privado.

Autor principal

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Mauricio', is written over a horizontal line.

Mauricio Alvarado García

## **AGRADECIMIENTOS**

**A la vida**, por demostrarme lo compleja que puede llegar a ser, por brindarme experiencias inolvidables ya sean positivas o negativas, por ponerme pruebas y retos que desafían mi capacidad para resolverlos, así como demostrarme que yo soy el responsable de las cosas que hago y quiero realizar para mi destino.

**A mi gloriosa Alma Terra Mater, la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN)**, por todo lo que ha hecho por mí y convertirme en la persona que soy hoy y que seré el día de mañana, gracias por permitir realizar mis estudios en tus gloriosas aulas con excelentes maestros, por siempre brindarme las 3 comidas diarias en el comedor, agradezco tu gimnasio de box (lugar donde pude encontrar paz por las tardes cuando salía de clases aún con proyectos o exámenes pendientes) y tu servicio de transporte, los autobuses “Buitres”.

**Al internado varonil “Palomares” de mi Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro**, por darme un lugar cálido donde dormir, refugiarme, llegar a descansar después de un largo día de escuela o trabajo, por asignar compañeros con los que compartí la habitación de Palomar 2, cuarto 14, en el que nos divertimos muchísimo y pasamos todo tipo de experiencias inolvidables.

**Al Departamento de Horticultura**, por darme la opción de elegir muy buenos maestros para aprovechar al máximo mis materias, en especial a la Dra. Fabiola Aureoles Rodríguez, el Dr. Adalberto Benavides y el Dr. Juan José Galván, por impartir su clase de una manera profesional y muy apasionada tanto en tiempos difíciles de pandemia de COVID-19 como en clases presenciales, gracias por motivar a los estudiantes a ser mejores cada día y a sacar su máximo potencial aprovechando el conocimiento disponible.

### **A mis asesores**

A la **Dra. Daniela Alvarado Camarillo** y el **Dr. Luis Alonso Valdez Aguilar**, por ser excelentes maestros, agradecido estoy de haber aprendido de las clases que me impartieron y agradezco la oportunidad que me dieron de realizar mi proyecto

de investigación, gracias por dirigirse a mí con mucha paciencia, alegría, amabilidad, darme su apoyo incondicional y conocimiento.

### **A mis compañeros y amigos**

**Citlaly Andradre, Javier Gallardo, Felipe, Lesther, Belén**, por brindarme su hospitalidad para quedarme a vivir donde rentaban, durante los periodos de vacaciones y huelga, fueron de gran ayuda para poder llevar a cabo este proyecto, siempre estaré más que agradecido con ustedes.

### **A mis amigos de la carrera de horticultura**

**Juan Antonio Castañeda, Javier Gallardo, Gerardo Reyes**, por su valiosa amistad, compañerismo, motivación y lealtad. Pasé momentos muy divertidos, así como también tristes, de ansiedad o estrés por pasar las materias junto a ustedes, siempre estarán en mi mente y corazón porque son lo mejor que la Narrito pudo darme.

### **A mis amigos en general**

Comenzando con mis compañeros de cuarto, **Miguel, Aldo, Adolfo**, gracias por hacer que mi estadía en los internados fuera más cómoda y divertida, a **Arturo (Churro), Wenssy, José Luis (Ranita), Kevin, Héctor Castañeda, Jesús Grana, Fabián Cervantes (Mino)** y todas las personas que me aportaron su apoyo, sé que siempre podré contar con ustedes, así como ustedes pueden contar conmigo.

**A Elizabeth Cruz Hernández**, agradezco de todo corazón el tiempo y el apoyo incondicional que me brindaste para motivarme a concluir este gran proyecto personal y preocuparte por el cumplimiento de mis sueños y metas, siempre lo recordaré e igual estaré para apoyarte en todo lo que te propongas, muchas gracias.

## **DEDICATORIA**

### ***A MI PADRE***

#### **J. Antero Alvarado Mejía**

Por ser un buen ejemplo por seguir como papá, hombre y amigo, enseñándome cosas valiosas de la vida como el respeto, la humildad, la amistad, la responsabilidad, el enseñarme el trabajo duro desde pequeño ya sea ayudándole en la milpa junto a mis hermanos o como ayudante en la construcción para solventar mis estudios.

Un consejo que siempre me ha dicho es: “realizar y terminar los proyectos que me proponga siempre con paciencia, alegría y devoción”, ¡gracias, papá!

### ***A MI MADRE***

#### **Rosa García Sánchez**

Por ser una excelente mamá, la mejor que Dios me pudo haber dado, eres un gran ejemplo que seguir, gracias por cuidarme todos los días de mi vida, por enseñarme la importancia del cariño, el amor, la paciencia, la alegría de vivir un nuevo día, cuidar y convivir con las personas que uno ama y estima, así como nunca darme por vencido, ¡gracias, mamá!

### ***A MIS HERMANOS***

Todos han influido de manera positiva en mi vida, he aprendido cosas valiosas de cada uno, gracias por todo su compañerismo en las buenas y malas, en especial a Orlando y David, por guiarme en el maravilloso mundo del conocimiento a lo largo de mi formación académica y orientarme en mi carrera para aprovechar al máximo mi potencial, ¡gracias!

## INDICE

<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	IV
<b>DEDICATORIA</b> .....	VI
<b>INDICE DE CUADROS</b> .....	X
<b>INDICE DE FIGURAS</b> .....	XI
<b>RESUMEN</b> .....	XIV
<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>1.1. Objetivos</b> .....	4
<b>1.1.1 Objetivo general</b> .....	4
<b>1.1.2 Objetivos específicos</b> .....	4
<b>1.2. Hipótesis</b> .....	4
<b>II. REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	5
<b>2.1 Importancia de la fresa</b> .....	5
<b>2.2 Origen y distribución</b> .....	5
<b>2.3 Descripción botánica</b> .....	6
<b>2.3.1 Tallo</b> .....	6
<b>2.3.2 Hoja</b> .....	6
<b>2.3.3 Flor</b> .....	6
<b>2.3.4 Fruto</b> .....	7
<b>2.3.5 Sistema radicular</b> .....	7
<b>2.4 Clasificación taxonómica</b> .....	7
<b>2.5 Valor nutricional</b> .....	7
<b>2.6 Producción mundial</b> .....	8
<b>2.6.1 Principales países productores</b> .....	9
<b>2.7 Producción nacional</b> .....	9
<b>2.7.1 Principales estados productores</b> .....	9
<b>2.8 Cultivos sin suelo</b> .....	9
<b>2.8.1 Sustrato</b> .....	10
<b>2.8.2 Clasificación de los sustratos</b> .....	10
<b>2.8.3 Propiedades de los sustratos</b> .....	12
<b>2.9 Nutrición mineral en cultivo sin suelo</b> .....	13
<b>2.10 Bioestimulantes</b> .....	13
<b>2.11 Importancia de los bioestimulantes</b> .....	14

2.12	Silicio .....	14
2.13	Ácido glutámico .....	15
2.14	Solución nutritiva .....	15
2.14.1	pH .....	15
2.14.2	Conductividad eléctrica .....	15
2.14.3	Concentración de nutrientes .....	16
2.14.4	Función de los elementos .....	17
2.15	Sistemas abiertos .....	18
2.15.1	Inmersión de raíces .....	19
2.15.2	Flotante .....	19
2.15.3	Acción capilar .....	19
2.16	Sistemas cerrados .....	19
2.16.1	NFT (Nutrient film technique, Técnica de la película nutritiva) .....	20
2.16.2	DFT (Deep flow technique, Técnica de flujo profundo) .....	20
2.16.3	Sistema de raíz flotante .....	20
2.16.4	Sistema de subirrigación .....	21
2.16.5	Aeroponía .....	21
2.17	Agricultura vertical .....	21
2.17.1	Origen .....	21
2.17.2	Agricultura vertical a nivel mundial .....	23
2.17.3	Agricultura vertical a nivel nacional .....	23
2.17.4	Impactos .....	24
2.17.5	Beneficios .....	25
2.17.6	Lámparas LED (Light emitting diodes) .....	26
2.17.7	Humedad relativa .....	26
2.17.8	Temperatura .....	27
III.	<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	28
3.1	Sitio de estudio .....	28
3.2	Material vegetativo .....	28
3.3	Preparación del sustrato .....	28
3.4	Trasplante .....	29
3.5	Sistema de cultivo vertical de interior .....	29
3.6	Control de temperatura y humedad relativa .....	29
3.7	Solución nutritiva y fertilización .....	30

3.8	Forma de aplicación de los tratamientos .....	30
3.9	Manejo agronómico del cultivo .....	31
3.9.1	Podas .....	31
3.9.2	Control de plagas y enfermedades .....	31
3.10	Cosecha .....	32
3.11	Variables evaluadas .....	32
3.11.1	Variables de rendimiento .....	32
3.11.2	Variables agronómicas .....	33
3.11.3	Variables de calidad .....	33
3.11.4	Variables nutrimentales .....	34
3.12	Diseño experimental .....	34
IV.	RESULTADOS Y DISCUSION .....	35
4.1	Rendimiento .....	35
4.2	Número de frutos .....	37
4.3	Longitud y diámetro de fruto .....	39
4.4	Peso de frutos .....	42
4.5	Número de coronas .....	44
4.6	Longitud y diámetro de coronas .....	45
4.7	Peso fresco de hojas .....	48
4.8	Peso fresco de coronas .....	50
4.9	Peso fresco de raíz .....	52
4.10	Firmeza y sólidos solubles totales .....	53
4.11	Concentración de nitrato, potasio y calcio en el fruto .....	57
V.	CONCLUSIONES .....	62
VI.	LITERATURA CITADA .....	63
6.1	Citas electrónicas .....	71

## INDICE DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> Taxonomía de la fresa (Toapanta, 2021).....	7
<b>Cuadro 2.</b> Propiedades nutritivas en 100 g de fresas.....	8
<b>Cuadro 3.</b> Propiedades que debe tener un buen sustrato en cultivo sin suelo. ....	12
<b>Cuadro 4.</b> Función de los macro y micronutrientes esenciales para las plantas.....	18
<b>Cuadro 5.</b> Beneficios de la agricultura vertical en el ámbito económico, ambiental y social. ....	25
<b>Cuadro 6.</b> Tratamientos evaluados en el estudio aplicados vía foliar a plantas de fresa. ....	30
<b>Cuadro 7.</b> Acaricidas para el control de la plaga Araña roja ( <i>Tetranychus urticae</i> ).....	32

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Impactos de la agricultura vertical en el ámbito económico, ambiental y social. ....	24
<b>Figura 2.</b> Ubicación del Laboratorio de Agricultura Vertical en el Departamento de Ciencias del Suelo de la UAAAN. Fuente: Google Earth, 2024. ....	28
<b>Figura 3.</b> Rendimiento de fresa ( <i>Fragaria × ananassa</i> Duch) establecidas en un sistema de agricultura vertical con uso de iluminación LED en condiciones de ambiente controlado bajo distintas aplicaciones foliares de ácido glutámico y silicio. ....	35
<b>Figura 4.</b> Efecto de aplicaciones foliares a distintas concentraciones de ácido glutámico y silicio sobre el rendimiento de fruto de fresa ( <i>Fragaria × ananassa</i> Duch) establecidas en un sistema de agricultura vertical con uso de iluminación LED en condiciones de ambiente controlado. ....	36
<b>Figura 5.</b> Número de frutos en fresa ( <i>Fragaria × ananassa</i> Duch) establecidas en un sistema de agricultura vertical con uso de iluminación LED en condiciones de ambiente controlado bajo distintas aplicaciones foliares de ácido glutámico y silicio. ....	38
<b>Figura 6.</b> Efecto de aplicaciones foliares a distintas concentraciones de ácido glutámico y silicio sobre el número de frutos de fresa ( <i>Fragaria × ananassa</i> Duch) establecidas en un sistema de agricultura vertical con uso de iluminación LED en condiciones de ambiente controlado. ....	39
<b>Figura 7.</b> Longitud de frutos de fresa ( <i>Fragaria × ananassa</i> Duch) establecidas en un sistema de agricultura vertical con uso de iluminación LED en condiciones de ambiente controlado bajo distintas aplicaciones foliares de ácido glutámico y silicio. ....	40
<b>Figura 8.</b> Efecto de aplicaciones foliares a distintas concentraciones de ácido glutámico y silicio sobre la longitud de frutos de fresa ( <i>Fragaria × ananassa</i> Duch) establecidas en un sistema de agricultura vertical con uso de iluminación LED en condiciones de ambiente controlado. ....	40
<b>Figura 9.</b> Diámetro de frutos de fresa ( <i>Fragaria × ananassa</i> Duch) establecidas en un sistema de agricultura vertical con uso de iluminación LED en condiciones de ambiente controlado bajo distintas aplicaciones foliares de ácido glutámico y silicio. ....	41
<b>Figura 10.</b> Efecto de aplicaciones foliares a distintas concentraciones de ácido glutámico y silicio sobre el diámetro de frutos de fresa ( <i>Fragaria × ananassa</i> Duch) establecidas en un sistema de agricultura vertical con uso de iluminación LED en condiciones de ambiente controlado. ....	41
<b>Figura 11.</b> Peso de frutos de fresa ( <i>Fragaria × ananassa</i> Duch) establecidas en un sistema de agricultura vertical con uso de iluminación LED en condiciones de ambiente controlado bajo distintas aplicaciones foliares de ácido glutámico y silicio. ....	43
<b>Figura 12.</b> Efecto de aplicaciones foliares a distintas concentraciones de ácido glutámico y silicio sobre el peso de frutos de fresa ( <i>Fragaria × ananassa</i> Duch) establecidas en un sistema de agricultura vertical con uso de iluminación LED en condiciones de ambiente controlado. ....	43
<b>Figura 13.</b> Número de coronas en fresa ( <i>Fragaria × ananassa</i> Duch) establecidas en un sistema de agricultura vertical con uso de iluminación LED en condiciones de ambiente controlado bajo distintas aplicaciones foliares de ácido glutámico y silicio. ....	44

<b>Figura 14.</b> Efecto de aplicaciones foliares a distintas concentraciones de ácido glutámico y silicio sobre el número de coronas de fresa ( <i>Fragaria × ananassa</i> Duch) establecidas en un sistema de agricultura vertical con uso de iluminación LED en condiciones de ambiente controlado. ....	45
<b>Figura 15.</b> Longitud de coronas de fresa ( <i>Fragaria × ananassa</i> Duch) establecidas en un sistema de agricultura vertical con uso de iluminación LED en condiciones de ambiente controlado bajo distintas aplicaciones foliares de ácido glutámico y silicio.....	46
<b>Figura 16.</b> Efecto de aplicaciones foliares a distintas concentraciones de ácido glutámico y silicio sobre la longitud de coronas de fresa ( <i>Fragaria × ananassa</i> Duch) establecidas en un sistema de agricultura vertical con uso de iluminación LED en condiciones de ambiente controlado. ....	46
<b>Figura 17.</b> Diámetro de coronas de fresa ( <i>Fragaria × ananassa</i> Duch) establecidas en un sistema de agricultura vertical con uso de iluminación LED en condiciones de ambiente controlado bajo distintas aplicaciones foliares de ácido glutámico y silicio. ...	47
<b>Figura 18.</b> Efecto de aplicaciones foliares a distintas concentraciones de ácido glutámico y silicio sobre el diámetro de coronas de fresa ( <i>Fragaria × ananassa</i> Duch) establecidas en un sistema de agricultura vertical con uso de iluminación LED en condiciones de ambiente controlado. ....	48
<b>Figura 19.</b> Peso fresco de hojas de fresa ( <i>Fragaria × ananassa</i> Duch) establecidas en un sistema de agricultura vertical con uso de iluminación LED en condiciones de ambiente controlado bajo distintas aplicaciones foliares de ácido glutámico y silicio. ...	49
<b>Figura 20.</b> Efecto de aplicaciones foliares a distintas concentraciones de ácido glutámico y silicio sobre el peso fresco de hojas de fresa ( <i>Fragaria × ananassa</i> Duch) establecidas en un sistema de agricultura vertical con uso de iluminación LED en condiciones de ambiente controlado. ....	50
<b>Figura 21.</b> Peso fresco de coronas de fresa ( <i>Fragaria × ananassa</i> Duch) establecidas en un sistema de agricultura vertical con uso de iluminación LED en condiciones de ambiente controlado bajo distintas aplicaciones foliares de ácido glutámico y silicio. ...	51
<b>Figura 22.</b> Efecto de aplicaciones foliares a distintas concentraciones de ácido glutámico y silicio sobre el peso fresco de coronas de fresa ( <i>Fragaria × ananassa</i> Duch) establecidas en un sistema de agricultura vertical con uso de iluminación LED en condiciones de ambiente controlado.....	51
<b>Figura 23.</b> Peso fresco de raíz de fresa ( <i>Fragaria × ananassa</i> Duch) establecidas en un sistema de agricultura vertical con uso de iluminación LED en condiciones de ambiente controlado bajo distintas aplicaciones foliares de ácido glutámico y silicio.....	52
<b>Figura 24.</b> Efecto de aplicaciones foliares a distintas concentraciones de ácido glutámico y silicio sobre el peso fresco de raíz de fresa ( <i>Fragaria × ananassa</i> Duch) establecidas en un sistema de agricultura vertical con uso de iluminación LED en condiciones de ambiente controlado. ....	53
<b>Figura 25.</b> Firmeza de frutos de fresa ( <i>Fragaria × ananassa</i> Duch) establecidas en un sistema de agricultura vertical con uso de iluminación LED en condiciones de ambiente controlado bajo distintas aplicaciones foliares de ácido glutámico y silicio.....	54
<b>Figura 26.</b> Efecto de aplicaciones foliares a distintas concentraciones de ácido glutámico y silicio sobre la firmeza de frutos de fresa ( <i>Fragaria × ananassa</i> Duch) establecidas en un sistema de agricultura vertical con uso de iluminación LED en condiciones de ambiente controlado. ....	55

<b>Figura 27.</b> Sólidos solubles totales en frutos de fresa ( <i>Fragaria</i> × <i>ananassa</i> Duch) establecidas en un sistema de agricultura vertical con uso de iluminación LED en condiciones de ambiente controlado bajo distintas aplicaciones foliares de ácido glutámico y silicio.....	56
<b>Figura 28.</b> Efecto de aplicaciones foliares a distintas concentraciones de ácido glutámico y silicio sobre los sólidos solubles totales de frutos de fresa ( <i>Fragaria</i> × <i>ananassa</i> Duch) establecidas en un sistema de agricultura vertical con uso de iluminación LED en condiciones de ambiente controlado.....	56
<b>Figura 29.</b> Concentración nutrimental de nitrato (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) en frutos de fresa ( <i>Fragaria</i> × <i>ananassa</i> Duch) establecidas en un sistema de agricultura vertical con uso de iluminación LED en condiciones de ambiente controlado bajo distintas aplicaciones foliares de ácido glutámico y silicio. ....	57
<b>Figura 30.</b> Efecto de aplicaciones foliares a distintas concentraciones de ácido glutámico y silicio sobre la concentración nutrimental de nitrato (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) de frutos de fresa ( <i>Fragaria</i> × <i>ananassa</i> Duch) establecidas en un sistema de agricultura vertical con uso de iluminación LED en condiciones de ambiente controlado. ....	58
<b>Figura 31.</b> Concentración nutrimental de potasio (K <sup>+</sup> ) en frutos de fresa ( <i>Fragaria</i> × <i>ananassa</i> Duch) establecidas en un sistema de agricultura vertical con uso de iluminación LED en condiciones de ambiente controlado bajo distintas aplicaciones foliares de ácido glutámico y silicio. ....	58
<b>Figura 32.</b> Efecto de aplicaciones foliares a distintas concentraciones de ácido glutámico y silicio sobre la concentración nutrimental de potasio (K <sup>+</sup> ) de frutos de fresa ( <i>Fragaria</i> × <i>ananassa</i> Duch) establecidas en un sistema de agricultura vertical con uso de iluminación LED en condiciones de ambiente controlado. ....	59
<b>Figura 33.</b> Concentración nutrimental de Ca <sup>2+</sup> en frutos de fresa ( <i>Fragaria</i> × <i>ananassa</i> Duch) establecidas en un sistema de agricultura vertical con uso de iluminación LED en condiciones de ambiente controlado bajo distintas aplicaciones foliares de ácido glutámico y silicio.....	59
<b>Figura 34.</b> Efecto de aplicaciones foliares a distintas concentraciones de ácido glutámico y silicio sobre la concentración nutrimental de calcio (Ca <sup>2+</sup> ) en frutos de fresa ( <i>Fragaria</i> × <i>ananassa</i> Duch) establecidas en un sistema de agricultura vertical con uso de iluminación LED en condiciones de ambiente controlado. ....	60

## RESUMEN

El trabajo experimental fue realizado en las instalaciones del Departamento de Ciencias del Suelo, específicamente en el Laboratorio de Agricultura Vertical en Ambiente Controlado dentro de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro con ubicación sobre la Calzada Antonio Narro 1923, Buenavista, C.P., 25084, Saltillo, Coahuila, México. El objetivo fue evaluar el efecto de las aspersiones foliares de dos bioestimulantes (silicio y ácido glutámico), para determinar las dosis que afecten positivamente en el rendimiento, así mismo evaluar su influencia en las características de calidad del fruto y planta de fresa.

Las plantas de fresa se desarrollaron en un sistema de agricultura vertical con ambiente controlado; los tratamientos evaluados durante el ciclo de cultivo fueron las siguientes concentraciones: T1 (Testigo): 0 mg/L de ácido glutámico + 0 mg/L de silicio, T2: 75 mg/L de ácido glutámico + 0 mg/L de silicio, T3: 75 mg/L de ácido glutámico + 150 mg/L de silicio, T4: 150 mg/L de ácido glutámico + 0 mg/L de silicio, T5: 150 mg/L de ácido glutámico + 150 mg/L de silicio, T6: 225 mg/L + 0 mg/L de silicio y T7: 225 mg/L de ácido glutámico + 150 mg/L de silicio.

De acuerdo con los datos obtenidos, las aplicaciones foliares de ácido glutámico a distintas concentraciones incrementaron el rendimiento, siendo las aspersiones a 75 mg/L de ácido glutámico tanto con silicio o sin silicio, las que obtuvieron mejores resultados en esta variable. Similares tendencias se observaron en la longitud y diámetro de fruto. El peso fresco de corona aumentó un 155% con la aplicación de 75 mg/L de ácido glutámico sin silicio en tanto que la longitud y diámetro de coronas se favoreció con aplicaciones de 150 mg/L de ácido glutámico + 150 mg/L de silicio. Las variables de firmeza, sólidos solubles y peso de fruto no mostraron diferencias significativas entre tratamientos.

**Palabras clave:** Agricultura vertical, ambiente controlado, cultivo sin suelo, silicio, ácido glutámico, fresa, bioestimulantes.

## I. INTRODUCCIÓN

México, es uno de los cinco principales países productores de fresas a nivel mundial, en primer lugar, se encuentra China con 3,981,600 t, siguiendo Estados Unidos con 1,293,650 t, en tercero, Turquía con 728,112 t, en cuarto lugar, está Egipto con 689,013 t y en quinta posición está México con 578,141.89 t (FAOSTAT, 2022).

En el tema de importación, los países sobresalientes son: Estados Unidos con 166,576 t (17.6%), seguido de Canadá con 110,487 t (11.7%) y Alemania con 108,407 t (11.4%), lo que resulta en cerca del 41% de importaciones de fresa mundialmente. En cuanto a exportación, destacan España con 304,314 t (32%), Estados Unidos con 146,385 t (15.4%) y México con 126,157 t (13.3%); estos países exportadores representan el 61% de las exportaciones globales de fresa (FAOSTAT, 2020).

En México, el 99.8% de sus exportaciones de fresa son destinadas a Estados Unidos, su principal importador (FAOSTAT, 2019) debido a que, entre los meses de septiembre y junio, la producción de Estados Unidos alcanza los niveles más bajos, requiriendo importación para abastecer su consumo, por lo que México aprovecha esta oportunidad, llamada ventana de invierno, al contar con las condiciones climáticas para la producción de berries (González- Ramírez et al., 2020). Es por ello, la importancia de México en la producción de fresa en el mundo al ser el tercer país productor y exportador a nivel mundial (Ramírez Padrón et al., 2020).

Por otro lado, la producción nacional en el 2023 obtuvo un volumen de 641,552 t, significando un 11% de incremento comparado con el año 2022 y 61,000 t más sobre el promedio de los 10 años anteriores. Dentro de los principales estados productores están Michoacán, con 401,800 t, seguido de Guanajuato con 100,971 t, Baja California con 100,066 t, y Jalisco con 18,395 t (SIAP, 2024).

En los últimos años la producción de cultivos se ha visto afectada por condiciones climáticas anormales, sin embargo, el crecimiento de la población mundial trae

consigo, aumento en las necesidades alimenticias y el uso de recursos como agua y energía. Por lo que es importante implementar nuevos sistemas de producción agrícola que satisfagan la demanda de alimentos. De acuerdo con Casbis et al. (2020), la obtención de alta calidad en las fresas está influenciada por factores ambientales como la radiación, la concentración de CO<sub>2</sub>, agua, temperatura y el abastecimiento de los nutrientes. Es por ello que la producción de fresas regularmente debe estar situada en ambientes donde la temperatura e iluminación están controlados (Samtani et al., 2019).

Uno de los sistemas de producción más avanzados en ambiente controlado es el de la agricultura de interior; este sistema consiste en la producción de plantas apiladas en niveles de manera vertical con el objetivo de aprovechar al máximo el uso del espacio, logrando producir más plantas y más rendimiento en el mismo espacio (Wallace-Springer, 2021). Los cultivos adaptados a estos sistemas deben ser de porte bajo, ciclo fenológico corto y con un bajo requerimiento de energía fotosintética (O'Sullivan et al., 2020).

Al implementar el sistema de agricultura vertical se ahorra hasta un 98% el consumo de agua en comparación con la agricultura tradicional a campo abierto, además de obtener rendimientos superiores y tasas de crecimiento más aceleradas; protege además contra los efectos del cambio climático, lo que permite mantener una producción constante todo el año, y contribuye a la restauración de ecosistemas degradados (Silva Yat y Meoño Canel, 2018).

Como se mencionó anteriormente, el aumento de población global y los efectos del cambio climático, plantean la exigencia de contar con una agricultura altamente eficaz y eficiente en uso de los recursos y en las técnicas de producir alimentos (Benavides, 2021). Los bioestimulantes son una solución agrícola que mejora el desarrollo, la productividad, la asimilación de nutrientes, aumenta el rendimiento y la resistencia de las plantas al estrés biótico o abiótico (du Jardin, 2015). El silicio funciona como un bioestimulante, fortalece las paredes celulares, aumentando la resistencia, dureza y elasticidad de la planta, lo que disminuye el

daño causado por plagas y enfermedades, reduce el efecto del estrés abiótico como estrés hídrico o altas temperaturas (AEFA, 2019). Asimismo, el ácido glutámico, aplicado al suelo o foliarmente, trabaja como bioestimulante; su efectividad depende de la especie y su fisiología, ayuda al optimizar el metabolismo, fortalece las defensas frente al estrés, facilita la asimilación de nitrógeno, y aumenta los rendimientos a menor costo gracias a su acumulación en hojas, tallos y raíces (Cortes, 2022).

La presente investigación se realizó con el objetivo de determinar el efecto de la interacción entre las aplicaciones foliares de ácido glutámico y el silicio sobre el rendimiento y calidad de los frutos de fresa con plantas establecidas en ambiente controlado en un sistema de agricultura vertical con iluminación artificial a través de lámparas LED.

## **1.1. Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo general**

Analizar el efecto de las aspersiones foliares de ácido glutámico y silicio, para determinar la dosis que afecte positivamente la producción y las características del fruto en fresa.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

Determinar las características de calidad del fruto de fresa de acuerdo con las dosis aplicadas de silicio y ácido glutámico.

Determinar las concentraciones del silicio y ácido glutámico que tengan un impacto en el rendimiento de fruto en plantas de fresa.

## **1.2. Hipótesis**

Las características de calidad y producción de frutos de fresa estarán determinadas por el efecto de las aplicaciones foliares de ácido glutámico y el silicio.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1 Importancia de la fresa

La fresa (*Fragaria* × *ananassa* Duch.) es una fruta valorada mundialmente, reconocida su sabor y aroma exclusivo, además, por su propiedad nutraceútica, genera efectos benéficos para la salud humana, ya que es una fuente rica de vitaminas (A, B2, B3 y C), antioxidantes, minerales, alto contenido de fibra y bajo en calorías, haciéndola ideal para dietas de control de peso (Sánchez Ortiz, 2022). Además, ayuda a reducir los niveles de colesterol en la sangre, prevenir la anemia y mejorar la apariencia de la piel, disminuyendo acné, manchas y arrugas (Sánchez Ortiz, 2022).

Asimismo, las fresas forman parte de las frutas con mayor poder antioxidante, debido al contenido de antocianinas y significativas cantidades de polifenoles (ácido eláxico) y vitamina C. Por lo anterior destaca su importancia dentro de la industria alimenticia, al poder ser consumida en fresco como un postre natural o para preparar mermelada, tartas, mousses, suflés. De igual manera, se usa en diversas aplicaciones como bebidas, colorantes y fragancias (García, 2024).

### 2.2 Origen y distribución

La fresa, también denominada “frutilla” comúnmente, es una planta estolonífera, forma parte del orden Rosales y de la familia Rosaceae, es una especie de origen europeo resultado de un cruce genético entre *Fragaria chiloensis* seleccionada por su gran tamaño y *Fragaria virginiana* por su agradable y suave sabor (Briceño, 2021).

Gracias al mejoramiento genético aplicado en *Fragaria* × *ananassa*, la producción se ha distribuido de Francia a todo el mundo en los últimos 300 años con el uso de distintas variedades de importancia económica (Hardigan et al., 2021).

## **2.3 Descripción botánica**

Botánicamente es una planta herbácea, perenne, de porte bajo no mayor a 50 cm de altura debido a la formación de una corona a ras de suelo, así como tallos cortos y rastreros formadores de rizomas, que dan origen a los foliolos característicos por su margen dentado, limbo trifoliado y estructura arrosetada. Posee raíces primarias y secundarias de aspecto fibroso, asimismo tiene delgadas raicillas capaces de medir 30 cm de profundidad, su reproducción se hace más sencilla por la generación de estructuras llamadas estolones (Proain, 2020).

### **2.3.1 Tallo**

Debido a la naturaleza de su crecimiento, se denomina tallo aéreo, es de tipo herbáceo y perenne (López, 2021). El tallo, también llamado corona, desarrolla estructuras alargadas conocidas como estolones, cuando logran su máximo desarrollo, generan raíces para formar una nueva plántula con las mismas características, capaz de crecer independientemente (Ruiz - Castro, 2022).

### **2.3.2 Hoja**

Están compuestas de tres foliolos, dispuestas en roseta, características por sus márgenes dentados, un limbo brillante y con un intenso color verde en el haz, por otro lado, el envés presenta pubescencia así también los peciolos de longitud alargada (Dias et al., 2015).

### **2.3.3 Flor**

Son hermafroditas y tienen de 5 a 6 pétalos de color blanco con alrededor de 20 a 35 estambres por cada flor. Las flores se originan de una yema terminal o axilar de los foliolos. Por añadidura, cuentan con cientos de pistilos sobre un receptáculo carnoso. Tras la fecundación, cada óvulo se transforma en un fruto (Pérez, 2018).

### 2.3.4 Fruto

Es característico por su color rojo intenso, rico por su dulzura y poseer un aroma único e inconfundible, su formación se origina debido a la unión de muchos carpelos pequeños y secos que se desarrollan sobre un receptáculo pulposo e hipertrofiado (SIAP, 2023).

### 2.3.5 Sistema radicular

Se compone de muchas raíces y raicillas que alcanzan poca profundidad, lo que lo clasifica como un sistema radicular fasciculado. Las raíces poseen un cambium vascular y suberoso, por el contrario, las raicillas no lo tienen, más bien presentan una coloración más clara y su duración de vida es breve (de solo unos días o semanas) (Sulqui, 2021).

## 2.4 Clasificación taxonómica

En el Cuadro 1 se muestra la clasificación taxonómica del cultivo de la fresa.

**Cuadro 1.** Taxonomía de la fresa (Toapanta, 2021).

<b>Taxón</b>	<b>Nombre</b>
Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Manoliopsida
Subclase	Rosidae
Orden	Rosales
Familia	Rosaceae
Genero	<i>Fragaria</i>
Nombre científico	<i>Fragaria × ananassa</i>

## 2.5 Valor nutricional

En el Cuadro 2 se presentan los componentes nutricionales más importantes de los frutos de fresa.

**Cuadro 2.** Propiedades nutritivas en 100 g de fresas.

<b>Nutrientes</b>	<b>Valor en 100 g</b>
Agua (g)	91.570
Energía (kcal)	30.000
Proteína (g)	0.610
Grasa total (g)	0.370
Carbohidratos (g)	7.020
Fibra dietética (g)	2.300
Ceniza (g)	0.430
<b>Minerales (mg)</b>	
Calcio	14.000
Fierro	0.380
Magnesio	10.000
Fósforo	19.000
Potasio	166.000
Sodio	1.000
Zinc	0.130
Cobre	0.049
Manganeso	0.290
Selenio	0.700
<b>Vitaminas</b>	
Vitamina C (mg)	56.700
Tiamina (mg)	0.020
Riboflavina (mg)	0.066
Niacina (mg)	0.230
Ácido (mg)	0.340
Pantoténico	
Vitamina B 6 (mg)	0.059
Ácido Fólico (mcg)	17.700

Fuente: Departamento de Agricultura de Carolina del Norte y Servicios al Consumidor, (2020).

## **2.6 Producción mundial**

De acuerdo con datos de FAOSTAT (2022), la producción mundial de fresa fue de 10,247,395.03 t, cosechadas en alrededor de 423,448 ha, con un rendimiento estimado de 24199.9 kg/ha.

### **2.6.1 Principales países productores**

China es el principal país productor de fresa con un aproximado de 3,981,600 t, en segundo se encuentra Estado Unidos de América con 1,293,650 t, en tercero está Turquía con 728,112 t, le sigue Egipto con 689,013 t y el quinto lugar lo ocupó México con 578,141.89 t. (FAOSTAT, 2022).

### **2.7 Producción nacional**

En año 2023, la producción nacional incrementó un 11% en comparación a la producción del año 2022, alcanzando un volumen de 641,552 t, cifra que se encuentra encima del promedio por 61 mil toneladas en comparación a los últimos 10 años (SIAP, 2024).

La producción de fresas mexicanas aporta un 5.9% de las más de 9.6 millones de toneladas que se producen mundialmente, haciendo que sobresalga la importancia de México como potencial productor (SIAP, 2024).

#### **2.7.1 Principales estados productores**

Entre los 10 principales estados productores de fresa destaca Michoacán, con una producción de 401,800 t, cifra que equivale a un 58.7% de la producción nacional, en 2º lugar está Guanajuato con 100,971 t, Baja California en 3º lugar con 100,066 t, 4º Jalisco con 18,395 t, 5º Baja California Sur con 8,088 t, 6º México 7,446 t, 7º Aguascalientes con 3,190 t, 8º Tlaxcala con 361 t, 9º Sinaloa con 302 t, 10º Oaxaca con 289 t, y el resto del país aporta 646 t (SIAP, 2024).

### **2.8 Cultivos sin suelo**

Consiste en un sistema de producción agrícola en el que las raíces de las plantas crecen y se desarrollan en un espacio diferente al suelo tradicional (AgroExcellence Magazine, 2022). De acuerdo con Gruda (2021), este sistema originalmente era relacionado solo para los cultivos que se instalaran en una solución nutritiva como la hidroponía, acuaponía y aeroponía, sin hacer uso de otro de medio crecimiento que proporcione soporte, tales como los sustratos.

Sin embargo, el uso de sustratos o mezclas de estos, otorgan muchos beneficios al proporcionar mejores condiciones de crecimiento a comparación del suelo agrícola; además son capaces de retener fácilmente la humedad y proporcionan una aireación adecuada a la zona radicular. Otra ventaja es su practicidad, al poder analizar, monitorear y controlar la disponibilidad de nutrientes en tiempo real de manera más eficiente; asimismo, el significativo ahorro de agua por darle un manejo a la solución nutritiva y poder reciclarla, contrario a lo que sucede con la agricultura tradicional. Este sistema hidropónico ayuda a evitar plagas y enfermedades al eliminar el contacto con el suelo, y si los sustratos se esterilizan correctamente, se pueden reutilizar, lo que facilita una producción intensiva y eficiente (Somerville et al., 2022).

### **2.8.1 Sustrato**

El concepto de sustrato de acuerdo con la agricultura urbana hace referencia a cualquier material sólido distinto del suelo, ya sea de origen natural, mineral, orgánico o semi-orgánico. Este material puede emplearse de manera individual, o en mezcla con otros, para mejorar sus propiedades físicas, químicas y biológicas, para ser colocados en contenedores con el propósito de proporcionar anclaje, favorecer el desarrollo radicular, brindar buena retención de humedad, así como niveles óptimos de aireación. En ciertos casos, también aportan nutrientes esenciales para las plantas (SENA, 2024).

### **2.8.2 Clasificación de los sustratos**

Los sustratos pueden dividirse en dos grupos de acuerdo con la participación que tengan en el aporte nutricional de la planta.

**Sustratos inertes:** permiten el anclaje y soporte para las plantas, pero no intervienen directamente en el proceso de nutrición de estas (Agroactivo, 2024).

**Sustratos activos:** permiten el anclaje y soporte para las plantas y además aportan algunos nutrientes esenciales aprovechables en su desarrollo (Agroactivo, 2024).

También pueden clasificarse según el origen de los materiales, ya sean materiales orgánicos o materiales inorgánicos o minerales.

### **Materiales orgánicos.**

De origen natural:

Materiales que pueden descomponerse mediante procesos biológicos, ej. Turbas (Sembralia, 2021).

De síntesis:

Se trata de polímeros orgánicos no biodegradables conseguidos a través de procesos de síntesis química tales como el poliestireno expandido, la espuma de poliuretano, entre otros (Sembralia, 2021).

Subproductos y residuos de diferentes actividades agrícolas, industriales y urbanas:

Todos aquellos materiales que se someten a procesos de compostaje (fibra de coco, cortezas de árboles, cascarillas de arroz, aserrín y virutas de madera, pajas de cereales, residuos sólidos urbanos, etc.) (Sembralia, 2021).

### **Materiales inorgánicos o minerales.**

De origen natural:

Se consiguen por medio de rocas o diferentes minerales de origen variado, tienen la cualidad de no ser biodegradables (grava, tierra volcánica, arena, etc.) (Sembralia, 2021).

Transformados o tratados:

A estos materiales se le cambian sus propiedades originales a través de complejos tratamientos físicos aplicado a rocas o minerales, tales como la vermiculita, perlita, arcilla extendida o lana de roca, por mencionar algunos (Sembralia, 2021).

Residuos y subproductos industriales:

Estériles de carbón o escorias de horno alto son algunos ejemplos de éstos (Sembralia, 2021).

### 2.8.3 Propiedades de los sustratos

En cultivo sin suelo o hidroponía, los sustratos deben tener ciertas características ideales para el óptimo desarrollo de las plantas, las cuales se muestran en el Cuadro 3.

**Cuadro 3.** Propiedades que debe tener un buen sustrato en cultivo sin suelo.

<b>Propiedades de un sustrato</b>	
<b>Generales</b>	1. Facilidad de compra en el mercado y bajo precio. 2. Peso ligero y facilidad de manejo.
<b>Físicas</b>	3. Espacio poroso total (>85%). 4. Capacidad de aireación (20-30%). 5. Alta capacidad de retención del agua. 6. Estructura permanente. 7. Tamaño de partículas homogéneas (0.25-2.5 mm). 8. Baja densidad aparente (<0.4 g/cm <sup>3</sup> ).
<b>Químicas</b>	9. CIC variable (>20 meq/100 g). 10. Disponibilidad de los nutrientes. 11. Baja salinidad. 12. pH (5.5-6.8). 13. Eficiente relación C/N (<=40).
<b>Biológicas</b>	14. Amigable con el medio ambiente. 15. Alta velocidad de descomposición. 16. Actividad reguladora del crecimiento. 17. Libre de plagas y semillas de malas hierbas.

Fuente: Beltrano y Gimenez, 2015.

## **2.9 Nutrición mineral en cultivo sin suelo**

En fisiología vegetal, la nutrición mineral es el área encargada de analizar los procesos vinculados en la absorción de nutrientes minerales y la función que estos desempeñan en el crecimiento y desarrollo de las plantas (Pérez Jiménez, 2020).

De acuerdo con Dabrio (2020), en 1934, Arnon y Stout, en sus criterios de esencialidad, introdujeron el concepto de “elemento mineral esencial o nutriente mineral”, donde también establecieron que un elemento debe cumplir los siguientes criterios para ser considerado “esencial”:

1. El elemento debe ser indispensable en el crecimiento y desarrollo adecuado de la planta, el estar ausente o en niveles deficientes impide que la planta complete su ciclo de vida o logre un desarrollo normal.
2. Ningún otro elemento puede sustituir las funciones que realice dicho elemento dentro de la planta.
3. El elemento debe participar directamente en el metabolismo primario de la planta.

La nutrición mineral en cultivos sin suelo o hidroponía se realiza por medio de una solución nutritiva, en ella los nutrientes necesarios para las plantas son proporcionados en cantidades precisas, esto permite un adecuado aprovechamiento para el desarrollo de los cultivos y un uso más eficiente de los recursos (Jiffy, 2023).

## **2.10 Bioestimulantes**

Se denomina bioestimulante a cualquier sustancia o microorganismo utilizado en las plantas que, más allá de su aporte nutricional, busca optimizar la eficiencia en la nutrición vegetal, aumentar la resistencia al estrés abiótico o mejorar las características de calidad en los órganos de interés comercial. Asimismo, el

término también se emplea para referirse a productos comerciales que combinan dichas sustancias o microorganismos (du Jardin, 2015).

### **2.11 Importancia de los bioestimulantes**

Atender la creciente demanda de alimentos es uno de los retos de mayor importancia en la agricultura contemporánea, en la actualidad se implementan distintas tácticas en la producción agrícola orientadas a generar más alimentos utilizando menor cantidad de recursos (Devi et al., 2022).

La utilización de bioestimulantes agrícolas ofrecen una opción compatible con las prácticas agrícolas tradicionales, haciendo más eficiente la productividad de las plantas y la optimización de los recursos. Su aplicación manifiesta efectos positivos incluso en bajas cantidades, lo que disminuye la necesidad de grandes aplicaciones y contribuye a prevenir la contaminación en los agroecosistemas (Rivera et. al, 2023).

### **2.12 Silicio**

De acuerdo con Souri et al. (2020), el silicio constituye el 2.º elemento más común en la corteza de la tierra y desempeña una función significativa en la fisiología de las plantas; no obstante, hasta la fecha, no ha sido incorporado como un elemento esencial, sino que se considera como un elemento benéfico.

Las plantas obtienen el silicio disponible en el suelo por medio del sistema radicular en la forma de  $H_4SiO_4$  (Currie y Perry, 2007), después es movido por el xilema a distintas zonas de crecimiento como los tallos, hojas, frutos y raíz en forma de gel de sílice amorfo (Savvas y Ntatsi, 2015).

El silicio contribuye mediante diversos mecanismos que modulan el metabolismo fisiológico, bioquímico y antioxidante de las plantas, permitiéndoles mitigar el estrés causado por factores bióticos y abióticos. Además, fortalece las defensas de las plantas frente a enfermedades, plagas y condiciones ambientales adversas (Fernández, 2018).

### **2.13 Ácido glutámico**

El ácido glutámico aplicado vía foliar o en el suelo, actúa como un bioestimulante, su efecto está condicionado a la especie vegetal y fisiología, aumenta la productividad de la planta optimizando el metabolismo, mejora las defensas ante condiciones de estrés y asimila de manera más eficiente el nitrógeno, resultando rendimientos más altos a mejores costos debido a la acumulación en hojas, tallos y raíces (Cortes, 2022).

### **2.14 Solución nutritiva**

La solución nutritiva es el medio acuoso en el que se encuentran mezclados y disueltos los elementos minerales necesarios para el crecimiento de las plantas, en la que tanto la concentración como las proporciones entre estos elementos están cuidadosamente equilibradas para optimizar la absorción y asimilación de nutrientes (AEFA, 2022).

#### **2.14.1 pH**

El pH indica la cantidad de iones de hidrógeno ( $H^+$ ) presentes en una solución, esta concentración de iones define si la solución es ácida o, por el contrario, alcalina (también llamada básica). Para determinarlo, se utiliza la escala de pH que va desde 0 a 14, un valor de 7 en pH se denomina neutro, valores inferiores a 7 son ácidos y valores superiores a 7 son alcalinos (Orozco Lab, 2023).

La importancia del pH en las soluciones nutritivas radica en solubilidad de los nutrientes esenciales, de igual manera la concentración baja o alta de los macro y micro nutrientes está fuertemente ligada dependiendo el valor de pH (HANNA Instruments, 2019).

#### **2.14.2 Conductividad eléctrica**

Se define conductividad eléctrica a la capacidad que tiene una solución para conducir una corriente eléctrica, regularmente se suele medir en deciSiemens por

metro (dS/m) y guarda relación con la cantidad de sales disueltas presentes en el agua (Maher, 2021).

En hidroponía o cultivo sin suelo, la conductividad eléctrica es fundamental para la absorción de nutrientes en las plantas, los rangos óptimos para asegurar que los nutrientes estén disponibles va de 1.5 a 3 dS/m o de 750 a 1500 ppm; lecturas elevadas pueden ocasionar fitotoxicidad en las plantas, por el contrario, lecturas bajas indican deficiencias nutricionales (Hernández, 2024). Sin embargo, esto varía de acuerdo según la especie, en el caso de la fresa los valores óptimos son de 1.0 y 1.8 dS/m (Abdallah, 2015).

### **2.14.3 Concentración de nutrientes**

En el cultivo hidropónico, la nutrición de las plantas se administra exclusivamente a través de una solución nutritiva, lo que permite ajustar de manera precisa los niveles de nutrientes minerales. Para formular la solución nutritiva inicial se deben considerar factores como el análisis del agua de riego, la especie cultivada y el clima, a partir de ahí, el cultivo en sí mismo determinará las adaptaciones necesarias en las siguientes soluciones nutritivas, permitiendo ajustar los nutrientes de acuerdo con sus requerimientos específicos en cada etapa de crecimiento (InfoAgro, 2018). La solución nutritiva puede adaptarse en base a la necesidad nutricional del cultivo por medio de análisis químicos periódicos, especialmente de la solución de drenaje o de la absorbida en el sustrato (InfoAgro, 2018).

La fresa es un cultivo demandante en cuanto a sus requerimientos nutricionales, especialmente durante las etapas cruciales de diferenciación floral, floración y maduración, entre los elementos indispensables, sobresalen los macronutrientes como el nitrógeno, fósforo, potasio y calcio para garantizar una buena producción y calidad de frutos (Khalil y Hammoodi, 2020).

De acuerdo con Hirzel (2013) la cantidad aproximada de nutrientes para producir una tonelada de fresa varía entre 1.8 a 2.2 kg de N, 0.8 a 1.2 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, y 2.5 a 3.5 kg de K<sub>2</sub>O.

#### **2.14.4 Función de los elementos**

Las plantas requieren de 16 elementos esenciales a lo largo de su ciclo fenológico para poder desarrollarse correctamente (Sela, 2019), algunos como el Carbono (C), Hidrógeno (H) y Oxígeno (O), se obtienen del agua y el aire mediante el proceso de fotosíntesis ejercido por las plantas, el resto son denominados nutrientes minerales y se dividen en macronutrientes y micronutrientes con base a la cantidad que la planta absorba (AEFA, 2022).

De acuerdo con Sela (2019), las plantas absorben los siguientes nutrientes minerales esenciales, por medio del sistema de raíces:

Macronutrientes primarios: Nitrógeno (N), Fósforo (P), Potasio (K)

Macronutrientes secundarios: Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Azufre (S)

Micronutrientes: Hierro (Fe), Manganeseo (Mn), Zinc (Zn), Cobre (Cu), Boro (B), Molibdeno (Mo) y Cloro (Cl).

En el Cuadro 4 se muestran las principales funciones de los macronutrientes y micronutrientes en las plantas, así como su movilidad y sus síntomas de deficiencia.

**Cuadro 4.** Función de los macro y micronutrientes esenciales para las plantas.

Nutriente	Función	Movilidad	Síntoma de deficiencia
<b>Nitrógeno</b>	Constituye a la molécula de clorofila, ácidos nucleicos y proteínas.	Muy móvil	Clorosis y verde pálido de las hojas viejas.
<b>Fosforo</b>	Forma parte de la molécula de ATP, ADP, enzimas y proteínas.	Muy móvil	Follaje verde oscuro, purpura o rojo.
<b>Potasio</b>	Aumenta el contenido de azúcar en los frutos, proteína en cereales y resistencia a sequías.	Móvil	Necrosis del borde de las hojas.
<b>Azufre</b>	síntesis de proteínas y aminoácidos.	Variable	Clorosis en hojas jóvenes
<b>Calcio</b>	División y elongación celular, osmoregulador en las células.	Inmóvil	Puntas quemadas de las hojas, pudrición apical del fruto.
<b>Magnesio</b>	Constituye principalmente la clorofila	Móvil	Clorosis intervenal en las hojas viejas
<b>Boro</b>	Metabolismo del RNA Y DNA.	Inmóvil	Frutos deformes y peciolo débiles
<b>Hierro</b>	Producción de clorofila.	Inmóvil	Clorosis intervenal y hojas jóvenes
<b>Manganeso</b>	Constituye el cloroplasto.	Inmóvil	Clorosis intervenal y necrosis en hojas jóvenes.
<b>Cobre</b>	Síntesis de lignina, formación de polen y fecundación.	Lenta movilidad	Polinización y lignificación irregular.
<b>Zinc</b>	Metabolismo de axinas	Lenta movilidad	Poco follaje y clorosis
<b>Molibdeno</b>	Fijación de nitrógeno	Lenta movilidad	Clorosis
<b>Cloro</b>	Regulación osmótica	Móvil	

Fuente: (Vidal, 2019, pp. 19-20).

### **2.15 Sistemas abiertos**

Se considera sistema hidropónico abierto cuando el excedente de la solución nutritiva con el que se alimentan las plantas es drenado y conducida al suelo, se infiltra en el área de cultivo u otra mejor opción cuando se recoge para utilizarse fuera del invernadero en un cultivo alternativo (Sánchez-Del Castillo et al., 2014).

De acuerdo con Medrano et al. (2005), el sistema hidropónico abierto presenta dos principales ventajas: 1) suprime la obligación de mantener la solución nutritiva y 2) disminuye el riesgo de infecciones por enfermedades, debido a que

siempre se elabora solución nutritiva nueva y fresca para las plantas; no obstante, también poseen una desventaja significativa: generan un considerable desperdicio de agua y nutrientes.

### **2.15.1 Inmersión de raíces**

Técnica donde el sistema radicular de las plantas está medio o completamente sumergido en una solución nutritiva. Sus principales beneficios son el ahorro de agua y fertilizantes, sin embargo, presenta desventajas debido a la necesidad de un manejo preciso de la solución nutritiva. Aunque permite el uso de diversas soluciones con éxito, es un sistema sin capacidad de amortiguación (Buffer), por lo que requiere un control preciso de los niveles de pH, fosfatos y hierro, principalmente (FÓR-MATE, 2022).

### **2.15.2 Flotante**

Básicamente, las plantas se colocan en recipientes pequeños anclados sobre una placa ligera (puede ser una lámina de poliestireno) la cual flotará sobre la solución nutritiva de un contenedor al que se le aplica aireación de manera artificial (Goswami y Yadav, 2022).

### **2.15.3 Acción capilar**

Se emplean macetas de distintos tamaños y formas, las mismas presentan orificios en su base y son rellenas con un sustrato inerte, y las plántulas o semillas se siembran en dicho medio, además se disponen en contenedores con poca profundidad que contienen soluciones nutritivas, éstas ascienden hasta el sustrato inerte mediante acción capilar, en esta técnica la aireación es fundamental, el uso de fibra de coco envejecida más arena o grava puede ser útil (Goswami y Yadav, 2022).

## **2.16 Sistemas cerrados**

Se denomina sistema hidropónico cerrado cuando la solución nutritiva drenada que utilizaron anteriormente las plantas es recolectada para reutilizarse

repetidamente (Rodríguez et al., 2018), sin embargo, es necesario primero esterilizar la solución nutritiva y realizar ajustes en valores de pH, conductividad eléctrica (CE) y en la concentración de nutrientes (Alarcón, 2006).

### **2.16.1 NFT (Nutrient film technique, Técnica de la película nutritiva)**

Consiste en exponer las raíces de las plantas a un flujo constante de una fina capa de solución nutritiva, las plantas se sitúan en orificios de plantación distribuidos a lo largo de canales, éstos están dispuestos con una ligera inclinación longitudinal que permite que el agua fluya por gravedad hacia una tubería de drenaje, mientras la delgada capa de solución nutritiva se recircula de manera continua (Sela, 2021).

### **2.16.2 DFT (Deep flow technique, Técnica de flujo profundo)**

Esta técnica implica la inmersión completa de las raíces en la solución nutritiva, es indispensable la incorporación de una bomba de aire o la recirculación continua de la solución para asegurar que las raíces reciban el oxígeno necesario; este método requiere utilizar bandejas para inundar todo el sistema, así como estructuras de soporte para las plantas, las placas de poliestireno son los elementos de soporte más comúnmente empleados (CITY OF GREENS, 2021).

### **2.16.3 Sistema de raíz flotante**

Este método se basa en el establecimiento de plantas en una solución nutritiva con todos los elementos necesarios para su desarrollo utilizando como soporte poliestireno expandido o también llamado unicel, sin emplear ningún tipo de sustrato convencional. En este sistema los cultivos pueden ahorrar de un 60% a 70% de agua y espacio de plantación de 70% a 80%, incluso ofrece condiciones superiores de sanidad vegetal e inocuidad, logrando mayor rentabilidad en regiones con problemas de calidad de suelo y disponibilidad de agua (Pizarro et al., 2019).

#### **2.16.4 Sistema de subirrigación**

El método de subirrigación consiste en suministrar la solución nutritiva o agua en el fondo del contenedor, donde es absorbida por el sustrato donde están establecidas las plantas mediante el proceso de capilaridad (Currey, 2021).

#### **2.16.5 Aeroponía**

Término que proviene del griego "aire" y "trabajo," consiste en el que las raíces de las plantas quedan suspendidas en el aire, absorbiendo nutrientes de una solución acuosa en forma de fina neblina o rocío. En estos sistemas, una niebla de pequeñas gotas de agua nutre a las plantas, y el aire o la atmósfera brumosa actúa como medio de crecimiento. La solución con nutrientes es bombeada desde un contenedor por medio de pulverizadores en intervalos establecidos, asegurando que las raíces reciban alimento y se mantengan húmedas (Centro Tecnológico del Metal, 2020).

### **2.17 Agricultura vertical**

La idea principal consiste en aprovechar al máximo el área de producción colocando capas o niveles dispuestos de manera vertical, donde se desarrollarán los cultivos, este enfoque consigue una mayor producción de plantas y rendimiento utilizando el mismo espacio, incluso puede integrarse a prácticas hortícolas modernas a gran escala con ambiente controlado y la ventaja de cultivar durante todo el año en cualquier ubicación siempre que se utilicen las técnicas correctas (Wallace-Springer, 2021).

#### **2.17.1 Origen**

El caso más antiguo de agricultura vertical se remonta entre el año 605-562 a. C., en los llamados Jardines Colgantes de Babilonia, mandados a construir por el rey Nabucodonosor II; consistían en terrazas apiladas con variedad de árboles y flores, llegaron alcanzar una altura de 20 m y para el sistema de riego hicieron uso de la ingeniería utilizando la bomba de cadena (Piechowiak, 2024).

Por otro lado, cerca de 1150 D.C., los aztecas crearon las “chinampas” como un sistema de hidroponía, básicamente eran huertas flotantes situadas en el agua de lagos y canales debido a la falta de suelo firme, pero aun así lograron producir alimentos de forma sostenible (Pohl et al., 2016).

La Revista “Life” en 1909 fue la primera en publicar una ilustración de una granja vertical moderna, este diseño representa una serie de viviendas apiladas en capas de manera vertical, integradas en un paisaje agrícola al aire libre, todas enfocadas a la producción de alimentos para el consumo (NAAS 2019).

El geólogo estadounidense Gilbert Ellis Bailey introduce el concepto de “agricultura vertical” en su libro del mismo nombre, sin embargo, Bailey se enfoca en una agricultura hacia el subsuelo en la que los agricultores usaran explosivos para cultivar a mayores profundidades, resultando más superficie útil y posibilitando el crecimiento de plantas de mayor tamaño (Crumpacker, 2018).

En diciembre de 1929, William F. Gericke, publica su artículo titulado "Aquaculture: A means of Crop-production", por lo que es reconocido como el pionero de la hidroponía moderna, ahí detalla el método de cultivo de plantas sin uso de suelo, utilizando sustratos como arena, grava o soluciones líquidas enriquecidas con nutrientes (NAAS, 2019).

De 1991 a 1999 el Dr. Dickson Despommier retó a sus estudiantes a encontrar una solución eficiente para satisfacer la demanda alimenticia de Nueva York, utilizando únicamente la agricultura en las azoteas. Pasado casi una década de investigación consiguieron establecer la idea de cultivo en edificios de varios pisos. Actualmente, Despommier es considerado el experto no.1 en el ámbito de agricultura vertical (AdeptAg, 2023).

Para el año 2004, AeroFarms se estableció como una de las principales granjas verticales a gran escala, actualmente existen algunas más que han prosperado con el paso del tiempo, tales como Bowery Farming, Freight Farms, Upward Farms, Plenty, y Cubic Farms (AdeptAg, 2023).

### **2.17.2 Agricultura vertical a nivel mundial**

Se calcula que, en 2024, el valor del mercado de la agricultura vertical alcance los 14.23 mil millones de dólares, y para 2029 podría incrementarse hasta los 23.23 mil millones de dólares. Esto representa un crecimiento anual compuesto del 10.3% durante el periodo proyectado (2024-2029) (Mordor Intelligence, 2023).

Para 2050 se prevé que la población global se aproxime a 9.7 mil millones de personas a causa de su incremento continuo, esto significaría un incremento en la demanda alimentaria y mayor presión a los recursos agrícolas y el entorno ambiental. En este escenario, la agricultura vertical se presenta como una alternativa eficaz y sostenible para producir alimentos, minimizando la dependencia de las condiciones climáticas y reduciendo el uso intensivo de agua y suelo (Chavez, 2024).

El cambio climático es una de las principales razones por las que la agricultura vertical ha ganado popularidad a nivel mundial, representada como una solución adecuada para enfrentar la limitación de espacios y asegurar la producción de alimentos libres de contaminantes en naciones como Japón, Taiwán, Singapur, Estados Unidos, Países Bajos, Francia y recientemente México (JACTO, 2023).

El mercado de la agricultura vertical está dividido, con empresas líderes como Aerofarms, InFarm y Jones Food Company controlando solo una parte, el resto del mercado se distribuye entre varios actores como Sky Greens, Agricoool y V-Farm (Mordor Intelligence, 2023).

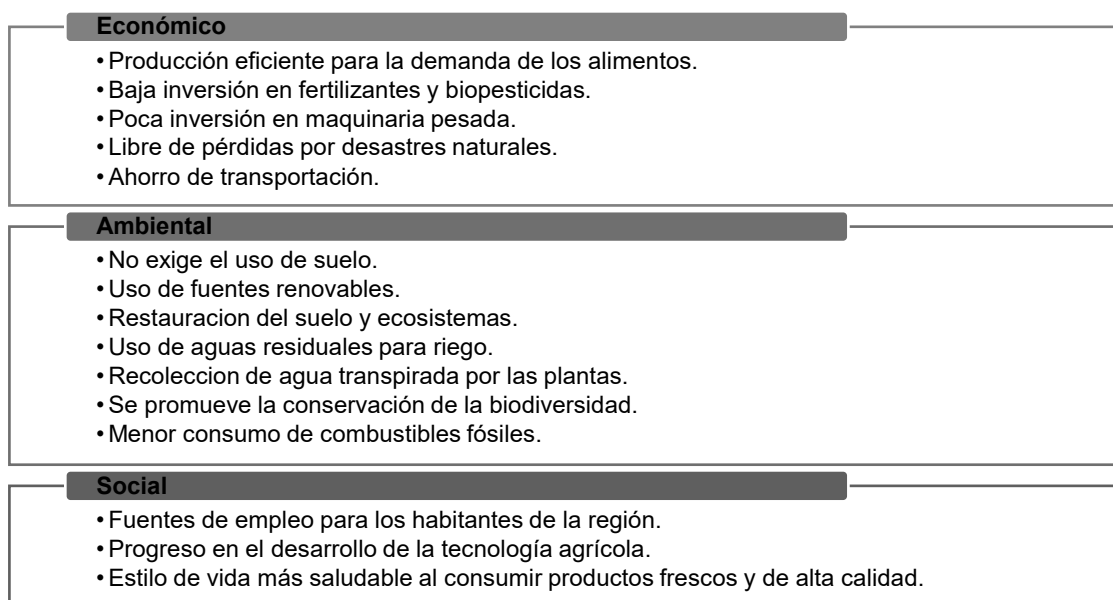
### **2.17.3 Agricultura vertical a nivel nacional**

En México, el mercado de agricultura vertical está fuertemente establecido liderado por empresas como Signify Holding, Heliospectra AB, Inverfarms México, Karma Verde Fresh, y Verde Compacto (Mordor Intelligence, 2023). De éstas, Verde Compacto se establece como la empresa pionera encargada de desarrollar tecnología de agricultura vertical en México y Latinoamérica en el año 2016 (Verde Compacto, 2024). De igual manera, en 2016 se crea la empresa

Karma Verde Fresh por Leo Lobato y Rafael Cuellar, quisieron conquistar el sector de agricultura vertical antes de crear su propio sistema; pronto identificaron que el éxito de este sistema en México y demás naciones en desarrollo, dependía de ofrecer tecnología eficiente y económicamente accesible para productores de todas las escalas (Boekhout, 2021). Aunque la agricultura vertical en México se encuentra en expansión, aún no alcanza su máximo potencial, factores como la sequía, el impacto ambiental y la demanda alimentaria en crecimiento, han impulsado su avance a un ritmo más acelerado (Maldonado, 2023).

#### 2.17.4 Impactos

Benke y Tomkins (2017), describen los potenciales impactos del uso de la agricultura vertical para producir alimentos en tres principales categorías, lo cual se muestra en la Figura 1.



**Figura 1.** Impactos de la agricultura vertical en el ámbito económico, ambiental y social.

### 2.17.5 Beneficios

El uso de la agricultura vertical como medio para la producción de alimentos, trae consigo beneficios relevantes en áreas importantes, lo que se muestra en el Cuadro 5.

**Cuadro 5.** Beneficios de la agricultura vertical en el ámbito económico, ambiental y social.

<b>Beneficio</b>	<b>Económico</b>	<b>Ambiental</b>	<b>Social</b>
Menor distancia de transporte.	Ahorro de combustibles.	Menor contaminación del aire.	Mejor salud humana.
Uso de aguas residuales.	Menor costo del agua.	Menor cantidad de agua utilizada.	Disponibilidad de agua.
Ejecución de restos orgánicos.	Darles utilidad a los restos.	Restricción de escombros.	Alimentos nutritivos.
Fuentes de empleo.	Mayores ingresos locales.	Menor huella ecológica.	Trabajo para los habitantes.
Menor uso de plaguicidas.	Menor compra de plaguicidas.	Menor contaminación del medio ambiente.	Alimentos libres de pesticidas y químicos.
Buena productividad.	Producción segura todo el año.	Uso de espacios pequeños o edificios.	Trabajo eficiente en menor tiempo.
Producción todo el año.	Inversiones seguras.	Menor daño al medio ambiente.	Seguridad alimenticia.
Empleo de energías limpias.	Menor inversión monetaria.	Menor consumo de combustibles.	Aire fresco y puro.
Producción de alimentos sanos.	Costos bajos por daños al medio ambiente.	Conservar la biodiversidad de nuestro planeta.	Mejor estilo de vida.
Uso de espacios deshabitados	Recuperación económica.	Evita el desalojo de flora/fauna.	Mejor presentación del sitio.

Fuente: Mir et al. (2022); Eigenbrod y Gruda (2015).

### **2.17.6 Lámparas LED (Light emitting diodes)**

Los cultivos que se establecen en interiores necesitan exclusivamente de iluminación artificial para desarrollarse correctamente, en comparación de los cultivos en invernadero. Las lámparas LED son recursos indispensables por su función de luz artificial cuando se trata de agricultura protegida en sistemas controlados (De Loera, 2022).

Las plantas son capaces de percibir la luz y ajustarse a diferentes cantidades de esta, ya que influye significativamente en su morfogénesis, el control de la fotosíntesis y en la protección contra daños ocasionados por radiaciones perjudiciales. Generalmente las especies de plantas pueden expresarse de manera distinta según la calidad de la luz, conocida como el color o la longitud de onda, y a su intensidad (Blanco-Valdés, 2019).

El rango de longitud de onda que puede estimular la actividad fotosintética de las plantas va de 400 a 700 nm, mejor conocido como radiación fotosintéticamente activa (RFA); el ojo humano observa longitudes de onda de 380 a 770 nm, este rango es llamado “luz visible” y se clasifica en: violeta (380-430 nm), azul (430-500 nm), verde (500-570 nm), amarillo (570-590 nm), naranja (590-630 nm) y rojo (630-770) (Chen, 2016).

### **2.17.7 Humedad relativa**

Se refiere a la proporción entre la cantidad de vapor de agua presente en el aire, conocida como humedad absoluta, y la cantidad máxima de vapor de agua que ese mismo aire puede contener a una temperatura específica, denominada humedad absoluta de saturación (S&P, 2024).

Para las plantas de fresa, el rango óptimo de humedad relativa se sitúa del 60-70%, cuando se tiene una HR mayor al 70% debido a las condiciones ambientales, se crea un entorno propicio para el desarrollo y proliferación de organismos fitopatógenos; por otro lado, la insuficiencia de riego puede ocasionar

daños significativos en el fruto, afectando su calidad (Santoyo et al., 2010; Dávalos et al., 2011).

### **2.17.8 Temperatura**

El desarrollo óptimo del cultivo de fresa se logra en temperaturas promedio entre 15 y 20 °C. Durante el día, temperaturas de 15-18°C hasta 25°C son ideales y en la noche de 8 a 10°C. Este rango térmico resulta crucial en las etapas de floración y fructificación, por su influencia en la formación y calidad de los frutos (Dario, 2020). De acuerdo con Ledesma et al. (2008), si la temperatura es mayor a 25 °C, se produce una disminución en la cantidad de inflorescencias, flores y frutos, afectando negativamente la productividad del cultivo.

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 Sitio de estudio

El experimento se llevó a cabo en el Laboratorio de Agricultura Vertical De Ambiente Controlado del Departamento de Ciencias del Suelo, en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, con coordenadas geográficas  $25^{\circ}21'13.6''\text{N}$  y  $101^{\circ}02'01.6''\text{W}$ , sobre una altitud de 1,781 msnm (Figura 2).



**Figura 2.** Ubicación del Laboratorio de Agricultura Vertical en el Departamento de Ciencias del Suelo de la UAAAN. *Fuente: Google Earth, 2024.*

#### 3.2 Material vegetativo

Para el proyecto de investigación fueron empleadas 45 plantas de fresa variedad San Andreas, esta variedad es clasificada como de día neutro, por lo que la duración del fotoperiodo no tiene efecto significativo sobre la floración ni producción de frutos.

#### 3.3 Preparación del sustrato

Los medios de crecimiento fueron los sustratos peat moss, perlita y fibra de coco, a una proporción de 60% peat moss y 30% perlita y otro a 10% de fibra de coco, ajustados a un pH de 5.5 y conductividad eléctrica de 1.0 dS/m.

Se realizó la mezcla de los sustratos correspondientes, enseguida se roció agua sobre las mezclas para que alcanzaran una humedad homogénea cerca del

punto de capacidad de contenedor, y posteriormente con ayuda de unas tijeras se realizaron 4 orificios en la base de las bolsas negras de polietileno, con el objetivo permitir el drenaje del agua durante el riego; después se rellenaron con los sustratos anteriormente tratados y se les aplicó el primer riego pesado sólo con agua para disminuir la cantidad de sales en exceso que llegan acumularse en los sustratos.

### **3.4 Trasplante**

En las bolsas de polietileno, con capacidad de 5 L anteriormente llenadas de sustrato, se llevó a cabo el trasplante de las plantas de fresa haciendo un pequeño orificio para que entrara perfectamente el cepellón, colocando la planta en el centro del contenedor. Para darle firmeza, se hizo un aporque en la base del tallo o corona para evitar posibles pudriciones.

### **3.5 Sistema de cultivo vertical de interior**

Para esta investigación se empleó un rack con dimensiones de 2.53 m de altura, 1.72 m de longitud y 80 cm de ancho. El diseño incluía cinco niveles separados por 35.5 cm, cada uno equipado con una charola de aluminio que contenía una bandeja de plástico ABS (acrilonitrilo butadieno estireno) color negro, cuyas dimensiones eran 1.71 m de largo, 73.5 cm de ancho y 10 cm de profundidad. En cada nivel del rack, se perforó un orificio circular al inicio de la charola, en el lado izquierdo, para instalar un tubo de PVC que recolectaba el lixiviado del riego y lo conducía a la última bandeja. Para este estudio, se utilizaron tres niveles del rack, donde cada charola contenía tres filas con 5 plantas cada una, sumando un total de 15 plantas por nivel.

### **3.6 Control de temperatura y humedad relativa**

La temperatura se ajustó diariamente a 25 °C utilizando un minisplit de dos toneladas para su regulación. La humedad relativa se mantuvo en 60% mediante un humidificador de 0.5 L/h y un extractor de 25 cm de diámetro, controlados por un dispositivo digital programable.

En cada nivel se colocaron lámparas LED con una intensidad de 250  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ .

### 3.7 Solución nutritiva y fertilización

Para el fertirriego se utilizó la solución nutritiva de Steiner, misma que se iba modificando de acuerdo con la etapa fenológica del cultivo, haciendo uso de estos fertilizantes:  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ,  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{KNO}_3$ ,  $\text{K}_2\text{SO}_4$  y  $\text{MgSO}_4$ . Por otro lado, para bajar el pH y neutralizar la solución nutritiva, se hizo uso de los siguientes ácidos: ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ), ácido fosfórico ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) y ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). Las aplicaciones de riego se manejaron vía drench de acuerdo con las necesidades hídricas del cultivo, manteniendo la humedad de los sustratos, utilizando la solución nutritiva en base Steiner preparada a una CE de  $0.5 \text{ dS/m}^2$  con un rango de pH de 5.5 a 6.0 como valor máximo.

### 3.8 Forma de aplicación de los tratamientos

Los tratamientos fueron aplicados vía foliar. Estos se aplicaron dos veces por mes. Para esto, primero era necesario bajar el pH del agua a 6.0 y llenar los atomizadores junto con los tratamientos para agitarlos y lograr que se diluyeran homogéneamente para aplicarlos en el haz de la hoja de manera adecuada. En el cuadro 6 se muestran los tratamientos aplicados.

**Cuadro 6.** Tratamientos evaluados en el estudio aplicados vía foliar a plantas de fresa.

Tratamiento	Ácido glutámico mg/L	Silicio mg/L
1	0	0
2	75	0
3	75	150
4	150	0
5	150	150
6	225	0
7	225	150

### **3.9 Manejo agronómico del cultivo**

#### **3.9.1 Podas**

##### **Poda de estolones**

Después del trasplante, se inspeccionaba semanalmente la posible aparición de estolones, estos eran eliminados de manera manual para que no consumieran nutrientes y afectaran el desarrollo de la planta principal.

##### **Poda de hojas**

La poda de hojas se centró en eliminar las hojas más antiguas y aquellas afectadas por plagas o enfermedades, con el objetivo de prevenir la propagación de infecciones y minimizar la presencia de agentes de daño como plagas o enfermedades fitopatógenas.

##### **Podas de flores**

Tras el trasplante, se eliminaron las primeras flores desarrolladas para fomentar un mayor vigor en la planta y evitar que las plantas jóvenes iniciaran la producción de forma prematura.

##### **Poda de frutos**

Una vez que la planta comenzó a producir frutos, se realizaba una revisión semanal, eliminando aquellos que mostraban malformaciones o deficiencias nutricionales.

#### **3.9.2 Control de plagas y enfermedades**

En el transcurso del ciclo fenológico del cultivo de fresa, mostró apariciones constantes de la plaga de araña roja (*Tetranychus urticae*), aunque las plantas estuvieran en un ambiente controlado.

En base al diagnóstico los primeros síntomas de daño eran apariciones de puntos diminutos de color blanco sobre el haz de los folíolos, en la parte del envés era posible notar los estadios de desarrollo de la plaga.

Por lo que se tomó la decisión de fumigar en periodos de 1 vez por semana rotando tres acaricidas distintos para evitar generar resistencia en la plaga, lo cual se ilustra en el Cuadro 7.

**Cuadro 7.** Acaricidas para el control de la plaga Araña roja (*Tetranychus urticae*).

<b>Insecticida</b>	<b>Ingrediente activo</b>	<b>Dosis</b>	<b>Forma de aplicación</b>
Acramite	Bifenazato	0.1 g/L	Foliar
KANEMITE 15 SC	Acequinocyl	0.75 ml/L	Foliar
Magister 200SC	Fenazaquin	0.4 ml/L	Foliar

### **3.10 Cosecha**

La cosecha de los frutos se llevó a cabo manualmente, seleccionando sólo aquellos que presentaban un estado de maduración de consumo homogéneo.

Al momento de la cosecha, cada fruto fue sometido a diversas evaluaciones en el Laboratorio de Agricultura Vertical. Aquellos que cumplían con los criterios de calidad y buen estado fueron almacenados en bolsas plásticas transparentes con cierre hermético tipo Zip Lock. A cada bolsa se le colocó una etiqueta con el número de tratamiento, la repetición correspondiente de la planta y el nivel del rack al que pertenecía. Finalmente, las bolsas fueron almacenadas en un congelador para su posterior análisis nutrimental.

### **3.11 Variables evaluadas**

#### **3.11.1 Variables de rendimiento**

##### **Rendimiento del cultivo**

El peso de cada fruto correspondiente a cada tratamiento fue registrado en gramos utilizando una báscula digital de la marca MESVIER, de color plata y de acero inoxidable. Al finalizar el estudio, se sumaron los pesos de todos los frutos para determinar el rendimiento total considerando una densidad de 13 plantas por m<sup>2</sup>.

### **Número de frutos y coronas**

Durante todo el ciclo de cultivo se realizó un registro sistemático con el propósito de cuantificar diariamente el número de frutos cosechados por tratamiento, a fin de determinar el total de frutos obtenidos al finalizar el ciclo. Por otro lado, al concluir el ciclo del cultivo, de igual manera se realizó un conteo de coronas por planta y tratamiento, éstas, fueron removidas del contenedor para almacenarlas en bolsas de papel estraza del número tres previamente identificadas con un marcador, para su fácil manejo en mediciones posteriores.

#### **3.11.2 Variables agronómicas**

##### **Longitud y diámetro del fruto y coronas**

Estas variables se midieron utilizando un vernier digital, registrando las dimensiones en milímetros. Para ello, se sostuvo el fruto y se tomaron las mediciones de su longitud y diámetro ecuatorial, anotándolas respectivamente, (del mismo modo, se realizaron las mediciones de las coronas de la planta).

##### **Peso fresco**

Con el uso de una báscula digital, se pesaron frutos, hojas, coronas y raíces una vez retirados de la planta, éstas muestras fueron introducidas en una bolsa de papel estraza del número tres, con su respectiva identificación para pronto almacenamiento.

#### **3.11.3 Variables de calidad**

##### **Firmeza del fruto**

Cada medición se efectuó con un penetrómetro manual (marca WAGNER), registrando los valores en gramo-fuerza (gf). Previamente, se retiró una porción de la epidermis del fruto con un pelador, se sostuvo en posición vertical y se aplicó la sonda del instrumento de manera firme sobre la zona expuesta. La lectura se obtuvo al presionar el botón ubicado en la parte superior izquierda del dispositivo.

### **Sólidos solubles totales**

La cuantificación de los sólidos solubles totales se llevó a cabo utilizando un refractómetro manual (marca ATAGO), expresando los resultados en grados Brix (°Brix). Para la medición, se preparó el equipo limpiando cuidadosamente la superficie de lectura con un paño suave. Luego, se aplicaron entre 2 y 3 gotas de la pulpa del fruto sobre el prisma, se cerró la cubierta y se realizó la lectura a través del visor óptico del instrumento.

#### **3.11.4 Variables nutrimentales**

##### **Concentración nutrimental de nitrato, potasio y calcio en frutos**

La concentración de nitrato, potasio y calcio se determinó utilizando medidores portátiles (marca HORIBA). Para ello, los frutos identificados se trituraron manualmente con un mortero, y el extracto se obtuvo mediante filtración con gasa. Una gota del filtrado se colocó sobre cada sensor, registrándose la lectura tras unos segundos. Posteriormente, los sensores se limpiaron con agua destilada y se secaron con un paño suave y seco.

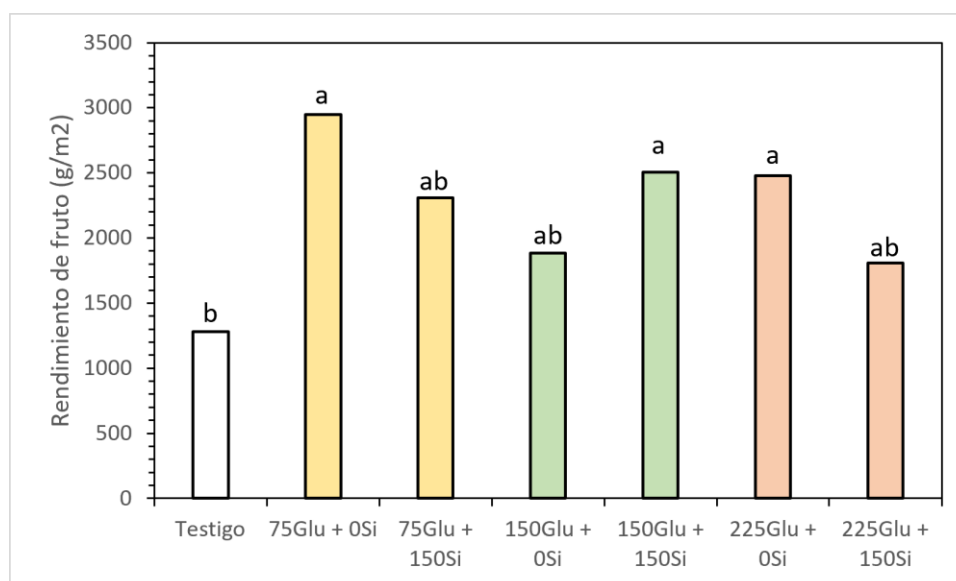
#### **3.12 Diseño experimental**

Cada tratamiento de dosis de ácido glutámico más silicio contó con 6 repeticiones en el cual cada repetición fue de una planta. Estas se establecieron en un diseño de bloques completamente al azar. Los datos obtenidos se sometieron a un análisis de varianza y en caso de significancia estadística se procedió a aplicar una comparación de promedios mediante la prueba de Duncan con  $p < 0.05$ .

## IV. RESULTADOS Y DISCUSION

### 4.1 Rendimiento

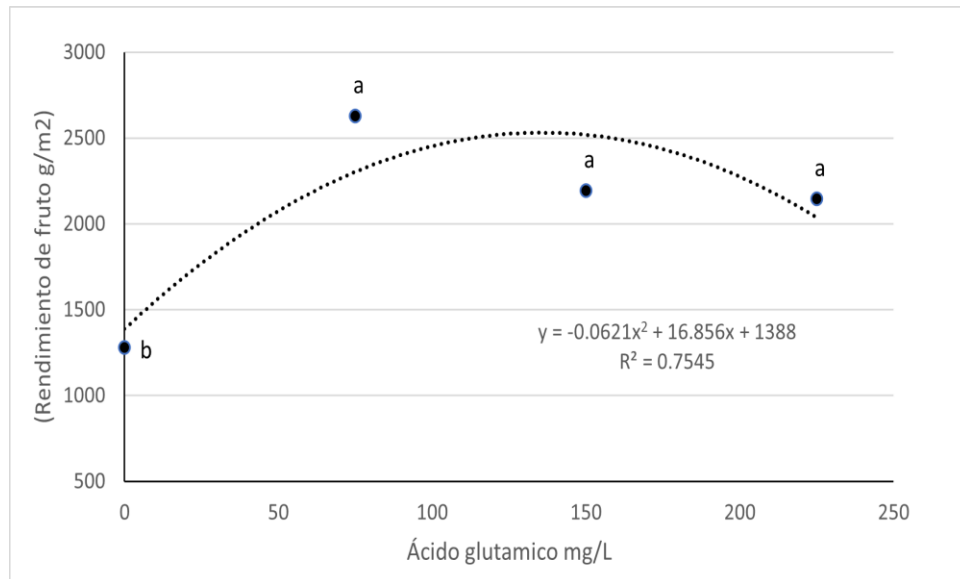
En la Figura 3 se observa el efecto de las aplicaciones foliares con ácido glutámico y silicio en el rendimiento de fruto en fresa. En general, las plantas que recibieron la aplicación de ácido glutámico mostraron un rendimiento mayor que el de las plantas del tratamiento testigo. Las plantas tratadas con 75 mg/L de ácido glutámico tuvieron un rendimiento 130% superior al de las plantas testigo, mientras que con 150 y 225 mg/L del producto, el incremento fue del 47% y 94%. La incorporación de silicio a las aplicaciones con ácido glutámico no tuvo un efecto sobre el rendimiento ya que este no fue significativamente diferente al de las plantas testigo, excepto cuando se aplicó combinado con 150 mg/L de ácido glutámico.



**Figura 3.** Rendimiento de fresa (*Fragaria × ananassa* Duch) establecidas en un sistema de agricultura vertical con uso de iluminación LED en condiciones de ambiente controlado bajo distintas aplicaciones foliares de ácido glutámico y silicio.

Los rendimientos de fruto de fresa más sobresalientes se obtuvieron con los tratamientos de 75 ppm de ácido glutámico (2947.1 g/m<sup>2</sup>) y 225 ppm de ácido

glutámico (2479.8 g/m<sup>2</sup>), ambos sin usar silicio, mientras que el testigo, apenas obtuvo un rendimiento de 1279.6 g/m<sup>2</sup>. Debido al efecto no significativo de la aplicación de silicio, los datos se promediaron por tratamiento de concentración de ácido glutámico, lo cual se muestra en la Figura 4. La tendencia observada es cuadrática y resalta que todos los tratamientos con ácido glutámico permiten obtener mayor rendimiento en el cultivo de fresa en ambientes de agricultura vertical de interior.



**Figura 4.** Efecto de aplicaciones foliares a distintas concentraciones de ácido glutámico y silicio sobre el rendimiento de fruto de fresa (*Fragaria × ananassa* Duch) establecidas en un sistema de agricultura vertical con uso de iluminación LED en condiciones de ambiente controlado.

El ácido glutámico se considera un precursor de la síntesis de todos los aminoácidos que conforman todas las enzimas y proteínas de las plantas, con lo cual afectan todo el metabolismo vegetal y los procesos de desarrollo (Qiu et al., 2020; Alfosea-Simón et al., 2021). El uso externo del ácido glutámico refleja efectos favorables en lo que destaca el rendimiento, mayor concentración de clorofila en las hojas, así como mejoras en características físicas y químicas de los frutos (Ramírez, 2021).

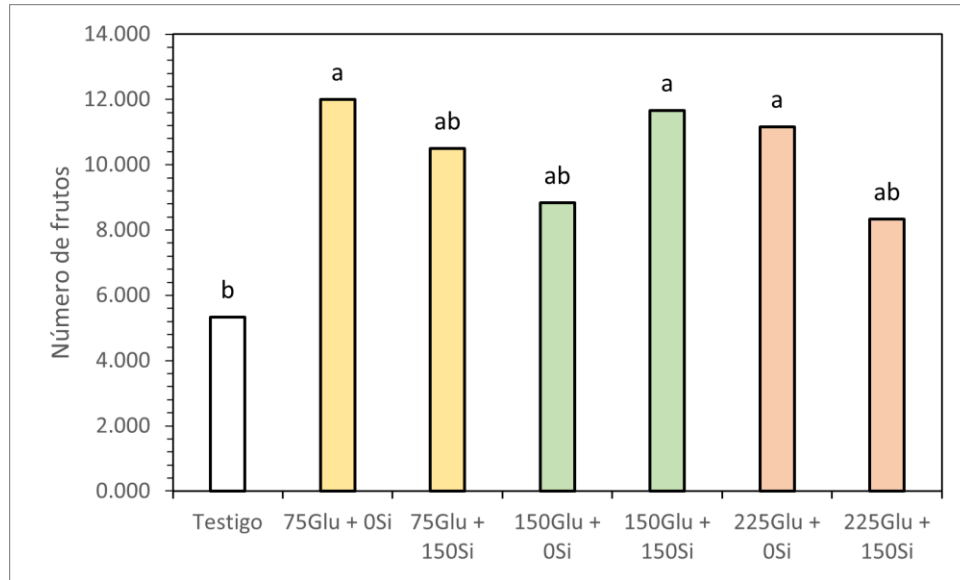
Por otro lado, aunque el silicio contribuye al crecimiento vegetal bajo condiciones edafoclimáticas adversas, no genera incrementos significativos en el rendimiento del cultivo de fresa, incluso cuando su aplicación se combina con ácidos orgánicos (Hernández Valencia et al., 2022).

En el estudio sobre fresas de Hernández Valencia et al. (2022), señalan que no se encontraron resultados favorables o significativos con dosis de 0, 15 y 20 ppm de silicio en parámetros fisiológicos, de rendimiento, y calidad nutraceútica, lo cual coincide con los resultados del presente estudio.

Asimismo, Cooke y Leishman. (2016) mencionan que los beneficios del silicio son expresados de manera más evidente, en plantas sometidas a condiciones de estrés en comparación con las que no lo presentan, lo que podría explicar el no efecto observado en el presente estudio

#### **4.2 Número de frutos**

Se registraron diferencias significativas entre los tratamientos con ácido glutámico con y sin silicio en comparación con el testigo; el mayor número de frutos se obtuvo del tratamiento 75 ppm de ácido glutámico + 0 ppm de silicio, con 12 frutos, seguido de 150 ppm de ácido glutámico + 150 ppm de silicio con 11.667 frutos, similar a los 11.167 frutos del tratamiento de 225 ppm de ácido glutámico + 0 ppm de silicio, lo que corresponde a una producción mayor del 225.14%, 218.76% y 209.39% respectivamente, comparado con el testigo que apenas obtuvo un promedio de 5.33 frutos (Figura 5).

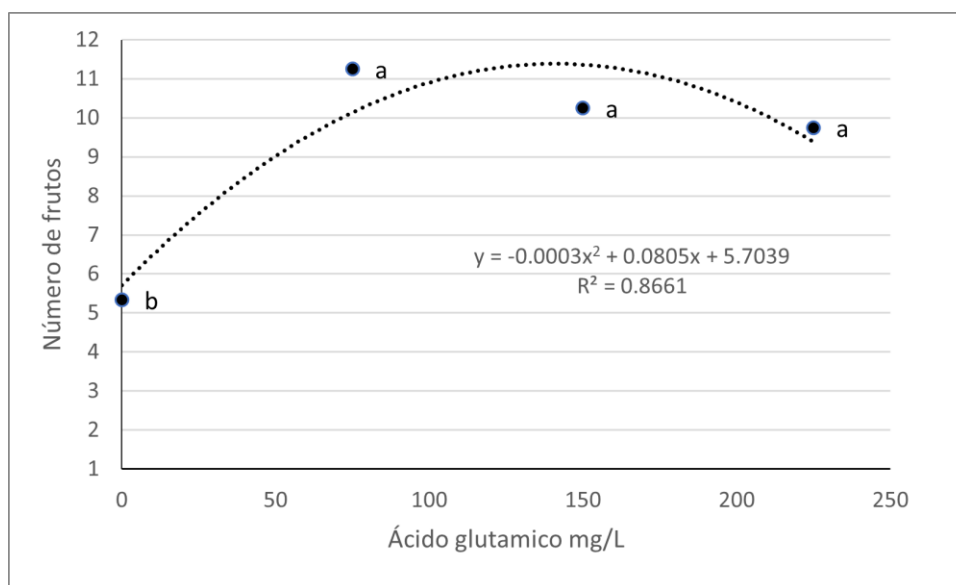


**Figura 5.** Número de frutos en fresa (*Fragaria × ananassa* Duch) establecidas en un sistema de agricultura vertical con uso de iluminación LED en condiciones de ambiente controlado bajo distintas aplicaciones foliares de ácido glutámico y silicio.

De igual manera, se puede observar en la Figura 5, que todos los tratamientos con y sin la aplicación de silicio vía foliar tuvieron resultados similares entre sí, y cuando se aplicó a 150 mg/L en combinación con 150 mg/L de ácido glutámico se produjo un número de frutos superior al del testigo.

De acuerdo con Serna (2011), aplicar ácido glutámico vía foliar incrementa la producción de clorofila b y, al estimular la actividad de la glutamina sintetasa con aplicaciones continuas, lo que es posible se refleje en una mayor generación de frutos. El ácido glutámico puede aumentar la producción de frutos mediante su función en la asimilación de nitrógeno (Alfosea-Simón et al., 2021), nutriente relacionado con el número de frutos producidos (Cvelbar et al., 2021). El aumento de frutos se atribuye a que el ácido glutámico promueve la transición de ciertas especies de la fase vegetativa a la generativa (Almutairi et al., 2022) lo cual fue observado en el presente estudio (Figura 6). En gerbera y arándano, el ácido glutámico mejoró la producción de flores en un 69% (Farahmandi et al., 2022), y se observó un aumento en los botones florales con 500 mg L<sup>-1</sup> (Pérez-León et al., 2023). Talukder et al. (2018) demostraron que las plantas de fresa expuestas

a luces LED con diferentes proporciones de luz roja a azul aumentaron la producción de frutos y flores al tratarse con ácido glutámico.



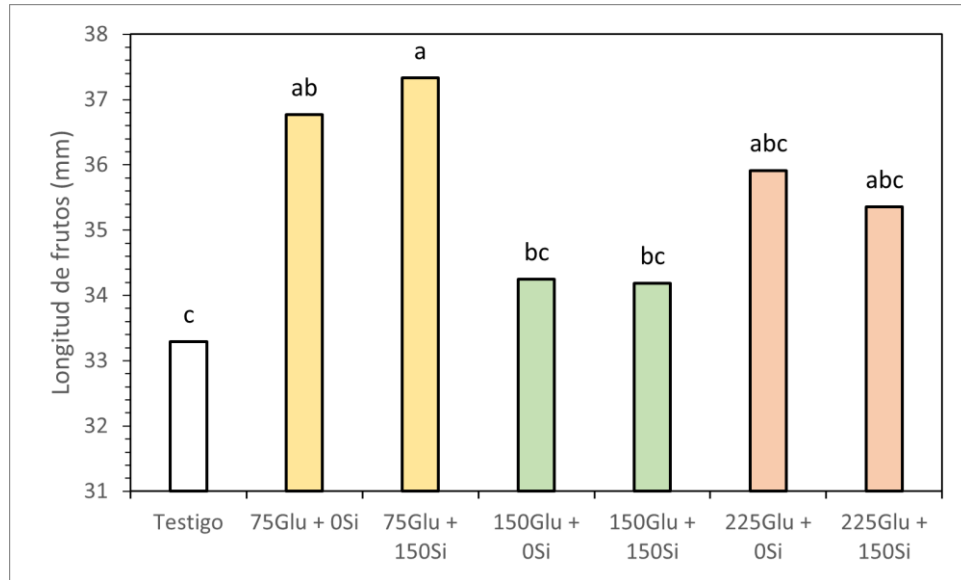
**Figura 6.** Efecto de aplicaciones foliares a distintas concentraciones de ácido glutámico y silicio sobre el número de frutos de fresa (*Fragaria × ananassa* Duch) establecidas en un sistema de agricultura vertical con uso de iluminación LED en condiciones de ambiente controlado.

#### 4.3 Longitud y diámetro de fruto

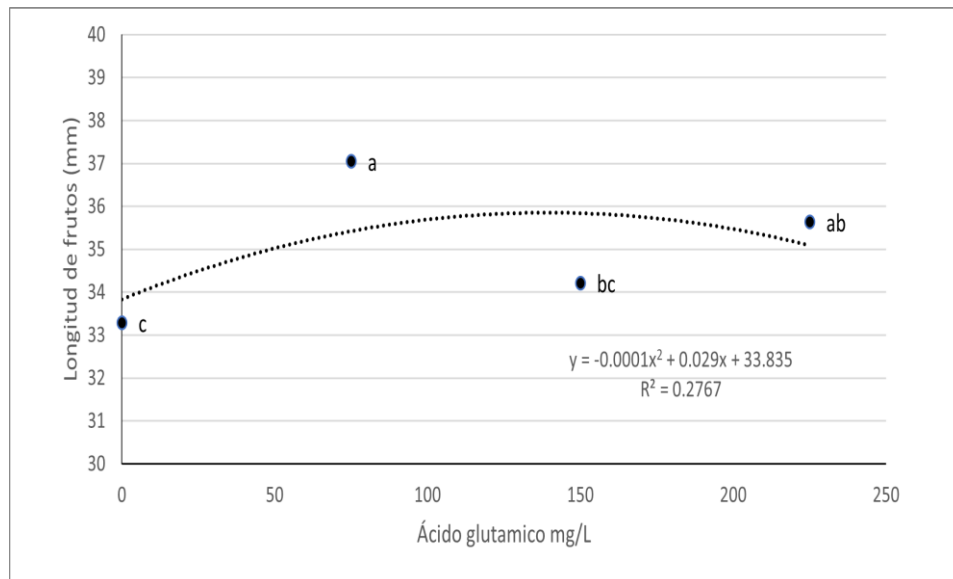
En la Figura 7 se ilustra un efecto significativo entre algunos tratamientos, particularmente cuando se aplicó el ácido glutámico a 75 mg/L, con o sin la aplicación de silicio, por lo que la implementación de silicio a los tratamientos de ácido glutámico demostró no tener efecto, debido a que los valores de longitud de fruto son parecidos.

Por ejemplo, los tratamientos con 75 ppm de ácido glutámico + 150 ppm de silicio y 75 ppm de ácido glutámico + 0 ppm de silicio, arrojaron valores de 37.3 y 36.8 mm, lo que representa un aumento en la longitud del fruto de más del 112 y 110%, respectivamente, además de ser los valores más altos frente al testigo.

La Figura 8 muestra el efecto cuadrático del ácido glutámico, observándose que con 75 mg/L en aplicación foliar se obtiene una mayor longitud del fruto.

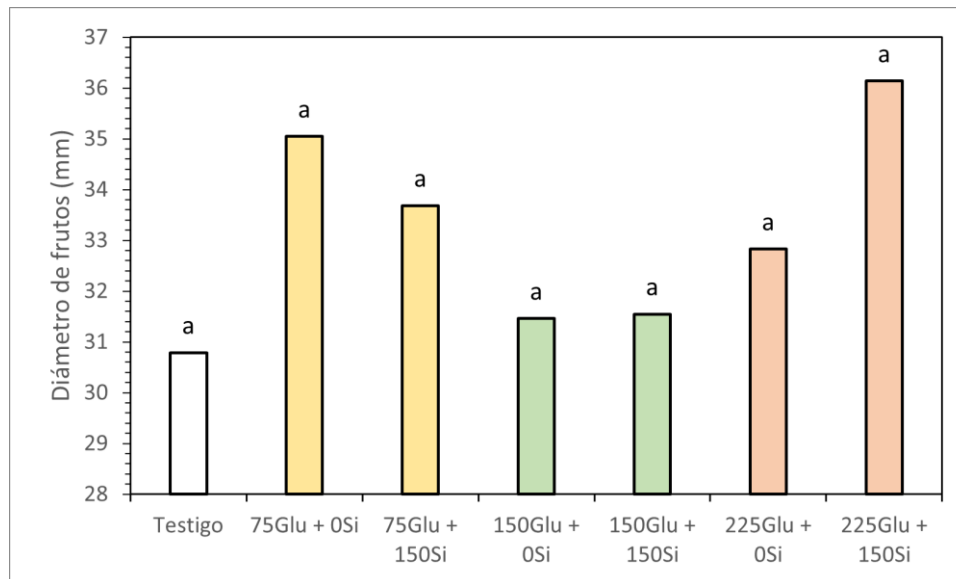


**Figura 7.** Longitud de frutos de fresa (*Fragaria × ananassa* Duch) establecidas en un sistema de agricultura vertical con uso de iluminación LED en condiciones de ambiente controlado bajo distintas aplicaciones foliares de ácido glutámico y silicio.

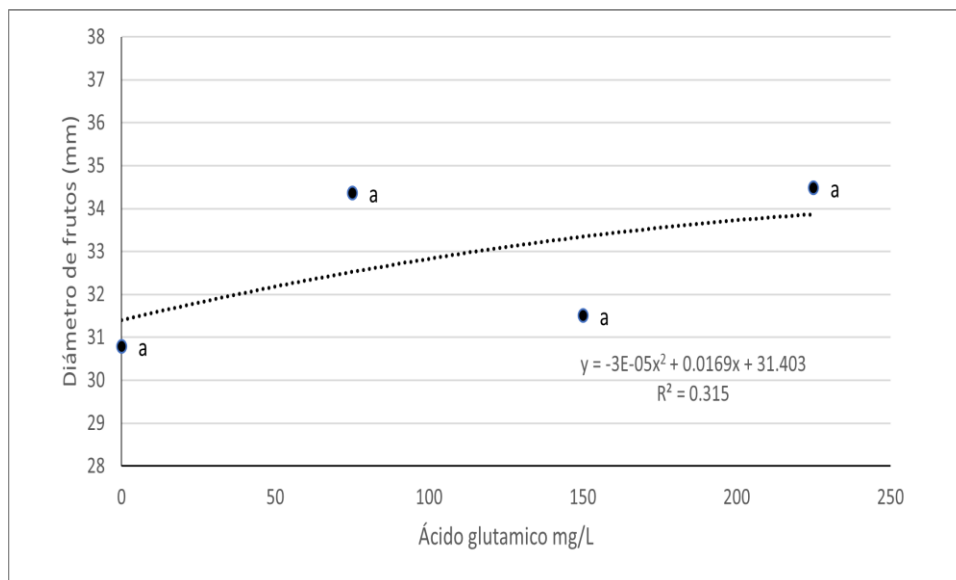


**Figura 8.** Efecto de aplicaciones foliares a distintas concentraciones de ácido glutámico y silicio sobre la longitud de frutos de fresa (*Fragaria × ananassa* Duch) establecidas en un sistema de agricultura vertical con uso de iluminación LED en condiciones de ambiente controlado.

En cuanto a diámetro de fruto, no se detectaron efectos significativos entre los tratamientos (Figura 9 y 10), aunque los frutos de plantas que recibieron los tratamientos expresaron un mayor diámetro que las plantas del grupo testigo.



**Figura 9.** Diámetro de frutos de fresa (*Fragaria × ananassa* Duch) establecidas en un sistema de agricultura vertical con uso de iluminación LED en condiciones de ambiente controlado bajo distintas aplicaciones foliares de ácido glutámico y silicio.



**Figura 10.** Efecto de aplicaciones foliares a distintas concentraciones de ácido glutámico y silicio sobre el diámetro de frutos de fresa (*Fragaria × ananassa*

Duch) establecidas en un sistema de agricultura vertical con uso de iluminación LED en condiciones de ambiente controlado.

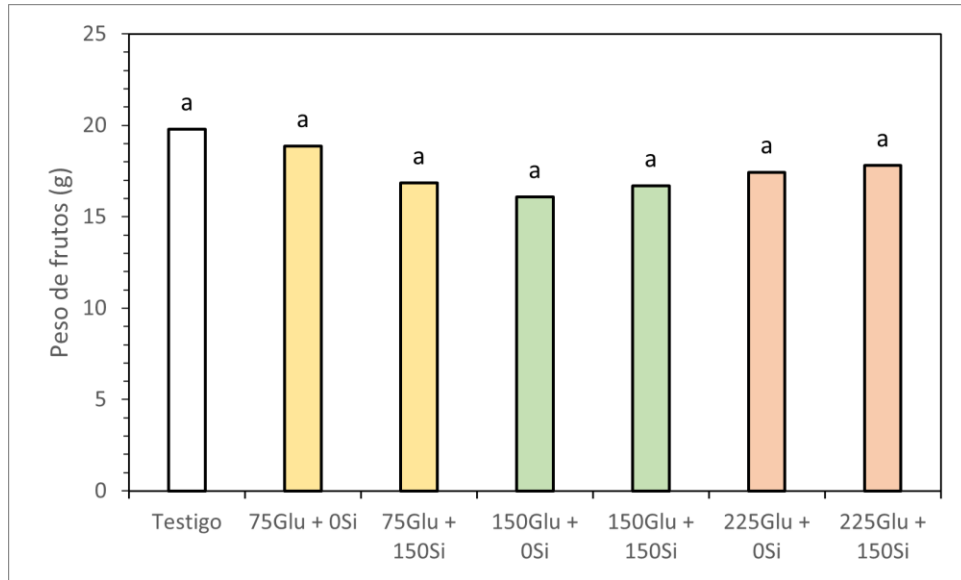
Cabe mencionar que nuestros resultados obtenidos son superiores a los 2.1 mm de diámetro reportados por Briones (2023) obtenidos con aplicaciones de ácido glutámico con una concentración de 5 g/L (5000 mg/L) en su experimento con fresas bajo tecnología de invernadero.

#### **4.4 Peso de frutos**

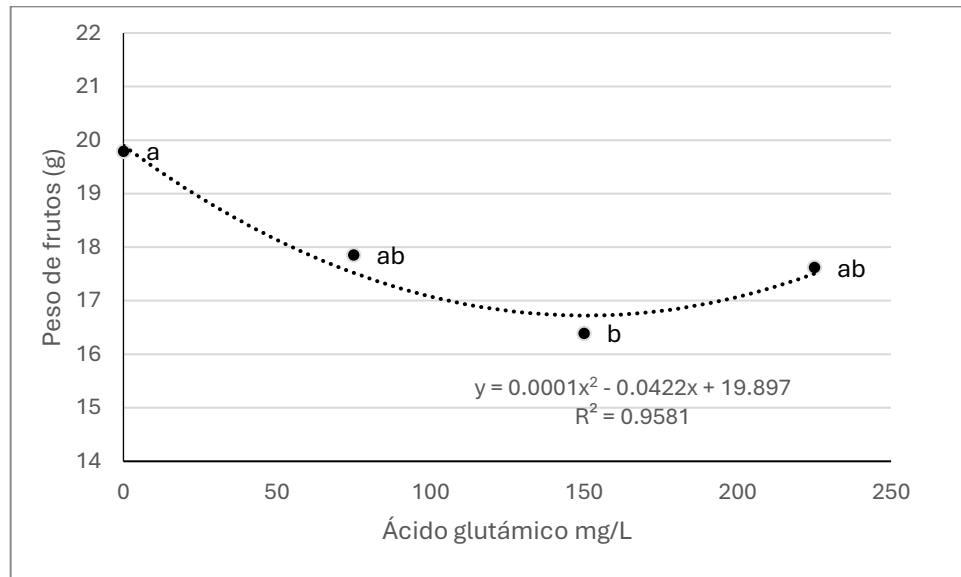
En la Figura 11, se puede observar que todos los tratamientos se expresaron de manera similar en esta variable, por lo que no se reflejó una diferencia significativa con el grupo de plantas testigo.

El valor más alto en peso fresco de fruto lo obtuvieron las plantas testigo con 19.786 g, seguido del tratamiento 75 ppm de ácido glutámico + 0 ppm Silicio (18.865 g) y el tratamiento de 225 ppm de ácido glutámico + 150 ppm de Silicio con 17.805 g, por lo que nuestros resultados son parecidos a los 17.05 g y 17.95 g reportados por (Cruz, 2018) con aplicaciones de 0.3 y 0.4 mM de Silicio aplicado vía foliar en fresas bajo invernadero.

No obstante, en el experimento de fresas establecido en un sistema de agricultura vertical con iluminación LED de (Jiménez, 2024), reporta haber producido frutos con peso mayor a 20g al implementar combinaciones de Silicio vía drench y vía foliar (0.1/0.15 g L<sup>-1</sup>) respectivamente, entre otros tratamientos.



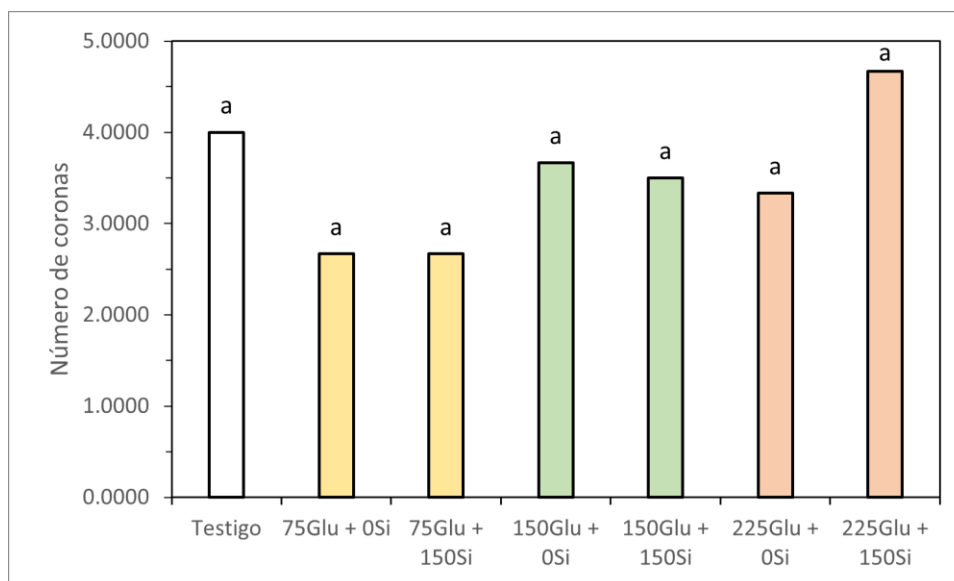
**Figura 11.** Peso de frutos de fresa (*Fragaria × ananassa* Duch) establecidas en un sistema de agricultura vertical con uso de iluminación LED en condiciones de ambiente controlado bajo distintas aplicaciones foliares de ácido glutámico y silicio.



**Figura 12.** Efecto de aplicaciones foliares a distintas concentraciones de ácido glutámico y silicio sobre el peso de frutos de fresa (*Fragaria × ananassa* Duch) establecidas en un sistema de agricultura vertical con uso de iluminación LED en condiciones de ambiente controlado.

#### 4.5 Número de coronas

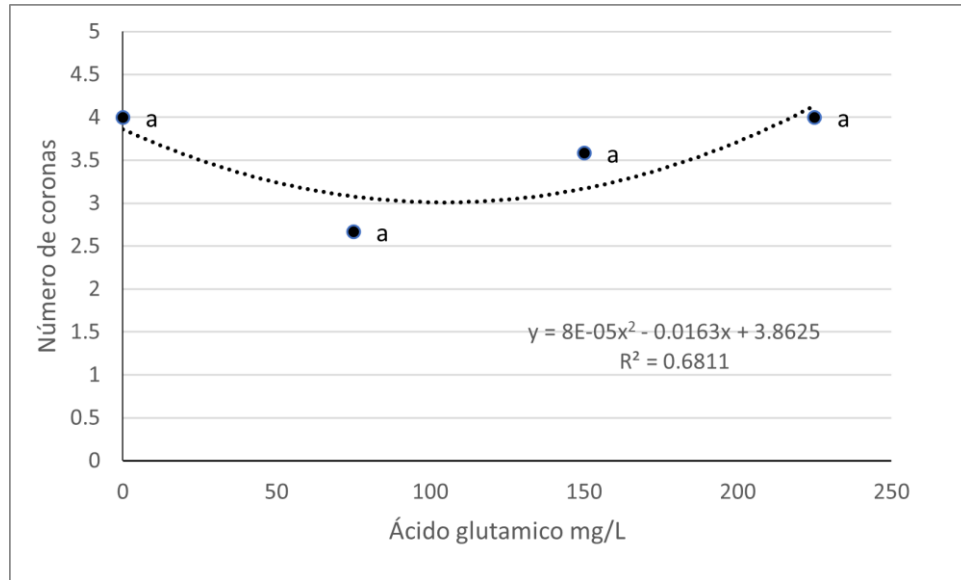
De acuerdo con los hallazgos del presente estudio (Figura 13 y 14), se encontró que entre tratamientos de ácido glutámico más silicio y ácido glutámico sin silicio reflejan similitud entre ellos, aunado a que no se encontraron diferencias significativas en el número de coronas al comparar promedios con el testigo.



**Figura 13.** Número de coronas en fresa (*Fragaria × ananassa* Duch) establecidas en un sistema de agricultura vertical con uso de iluminación LED en condiciones de ambiente controlado bajo distintas aplicaciones foliares de ácido glutámico y silicio.

Entre los valores mayores resultó el tratamiento de 225 ppm de ácido glutámico + 150 ppm de silicio con 4.66 coronas, le sigue el testigo con 4.0 coronas y el tratamiento de 150 ppm de ácido glutámico sin silicio con 3.66 coronas, lo que demuestra que en nuestro experimento las plantas obtuvieron resultados superiores a las 2.43 coronas que reportan Prasad et al. (2022) en su estudio de fresas sobre distintas combinaciones de sustrato establecidas bajo túnel.

Por otro lado, (Gagne et al., 2021) recomiendan mantener máximo tres coronas por planta en la producción de fresas de interior y realizar otras labores culturales como raleos a las inflorescencias, con el fin de desarrollar frutos de mayor tamaño y mantener un equilibrio entre lo vegetativo y reproductivo.

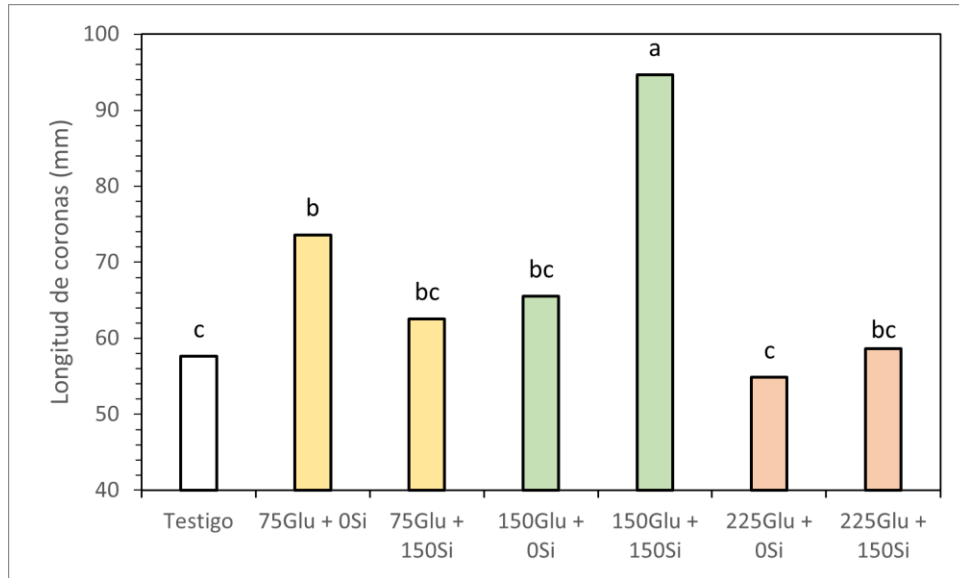


**Figura 14.** Efecto de aplicaciones foliares a distintas concentraciones de ácido glutámico y silicio sobre el número de coronas de fresa (*Fragaria × ananassa* Duch) establecidas en un sistema de agricultura vertical con uso de iluminación LED en condiciones de ambiente controlado.

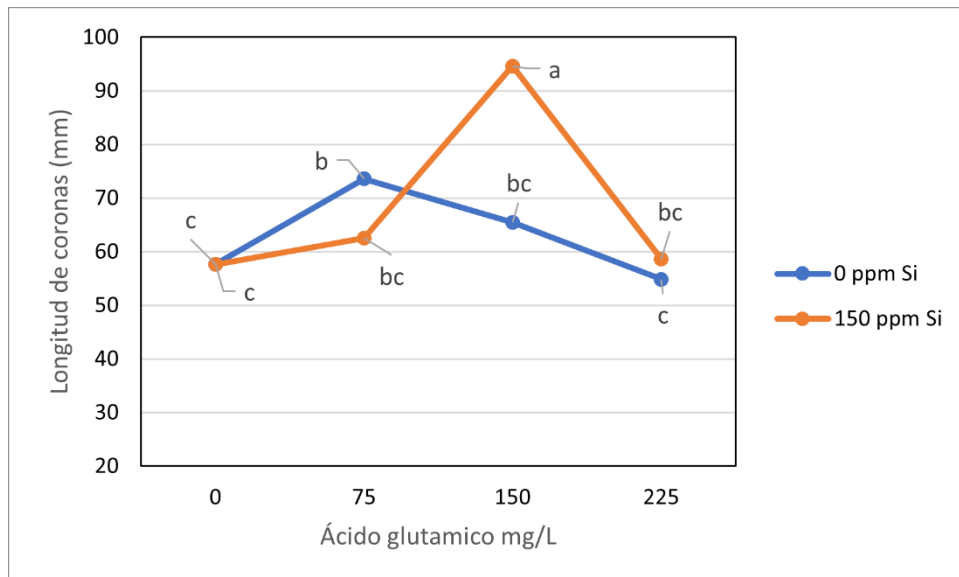
#### 4.6 Longitud y diámetro de coronas

En la presente variable el tratamiento de 150 ppm de ácido glutámico + 150 ppm de Silicio expresó una diferencia altamente significativa en comparación con el testigo y los demás tratamientos, ya que alcanzó una longitud de corona de 94.6 mm, esto representa una elongación mayor del 164% en contraste con el testigo 57.6 mm (Figura 15 y 16).

La combinación de ácido glutámico (150 ppm) y silicio (150 ppm) demostró tener un efecto superior a lo reportado por Jiménez (2024), ya que éste obtuvo longitudes entre 70 y 80 mm, aún con aplicaciones de 0.15 y 0.2 g/L de silicio vía foliar.



**Figura 15.** Longitud de coronas de fresa (*Fragaria × ananassa* Duch) establecidas en un sistema de agricultura vertical con uso de iluminación LED en condiciones de ambiente controlado bajo distintas aplicaciones foliares de ácido glutámico y silicio.



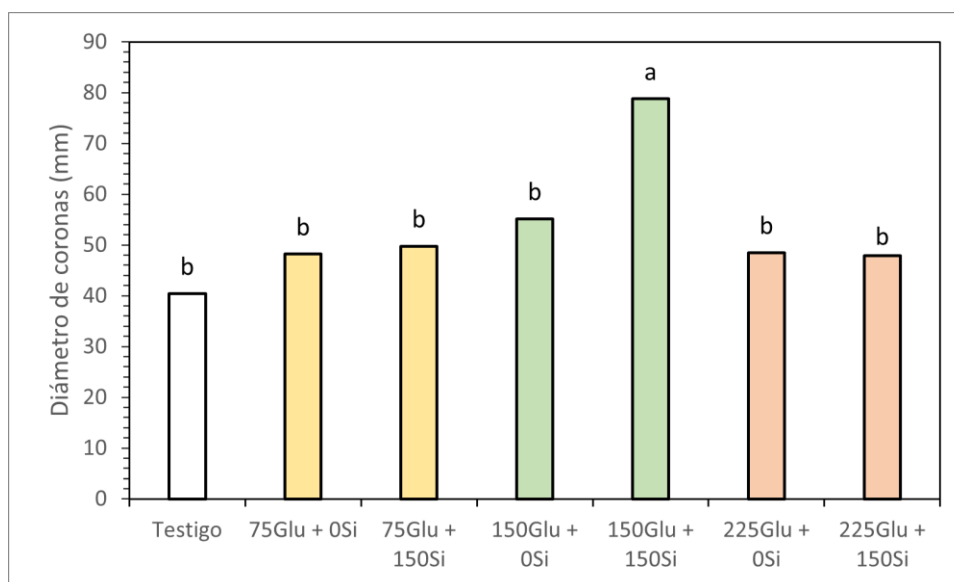
**Figura 16.** Efecto de aplicaciones foliares a distintas concentraciones de ácido glutámico y silicio sobre la longitud de coronas de fresa (*Fragaria × ananassa* Duch) establecidas en un sistema de agricultura vertical con uso de iluminación LED en condiciones de ambiente controlado.

En el diámetro de corona, todos los tratamientos mostraron valores superiores al testigo, aunque cabe resaltar que el tratamiento de 150 ppm de ácido glutámico

+ 150 ppm de silicio tuvo diferencias altamente significativas con el testigo como igual pasó con la variable de longitud de corona (Figura 17), lo cual coincide con las tendencias observadas en la longitud de las coronas (Figura 15).

El dato más representativo de esta variable alcanzó un valor de 78.8 mm (150 ppm de ácido glutámico + 150 ppm de silicio) frente a los 40.4 mm de diámetro de las plantas testigo, esto significa un crecimiento de más del 195%.

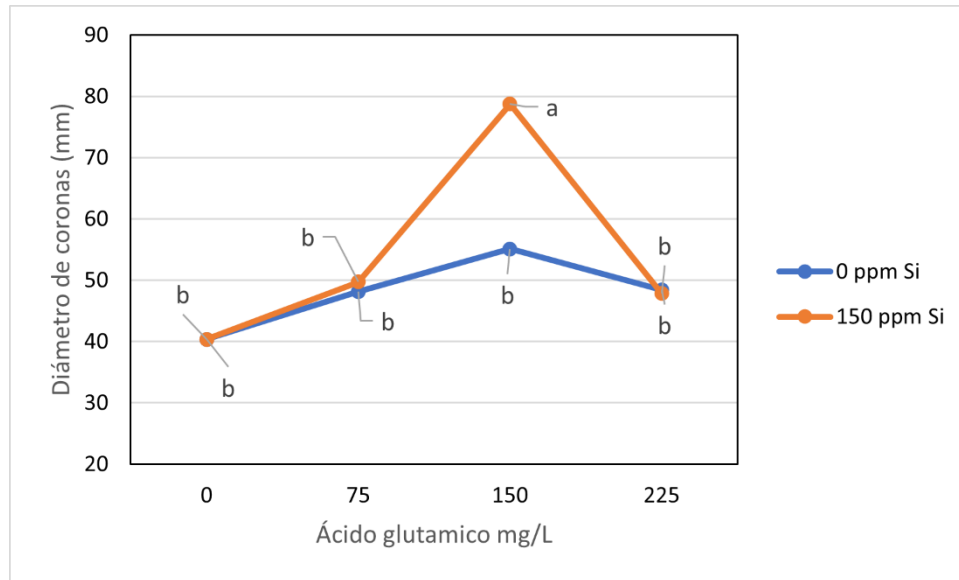
Cabe mencionar que todos los resultados de esta variable son más altos a los registrados por Mondal et al. (2013) en su estudio de fresas en agricultura protegida bajo invernadero, donde señalan haber obtenido 38.5 mm de diámetro en la corona realizando aplicaciones de ácido glutámico a una concentración de 200 mg/L.



**Figura 17.** Diámetro de coronas de fresa (*Fragaria × ananassa* Duch) establecidas en un sistema de agricultura vertical con uso de iluminación LED en condiciones de ambiente controlado bajo distintas aplicaciones foliares de ácido glutámico y silicio.

Como se demuestra en la Figura 18, existe una correlación entre la medida de diámetro de corona y la dosis de ácido glutámico; este comportamiento ilustra que a medida que se le aplica más ácido glutámico el diámetro de corona se

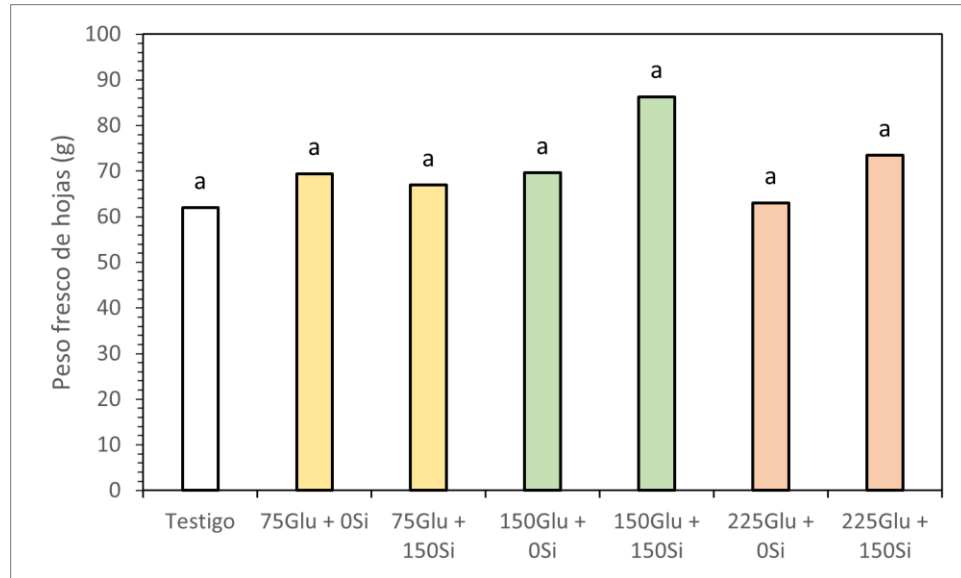
expande, sin embargo, este disminuye también cuando la concentración sube a 225 mg/L.



**Figura 18.** Efecto de aplicaciones foliares a distintas concentraciones de ácido glutámico y silicio sobre el diámetro de coronas de fresa (*Fragaria × ananassa* Duch) establecidas en un sistema de agricultura vertical con uso de iluminación LED en condiciones de ambiente controlado.

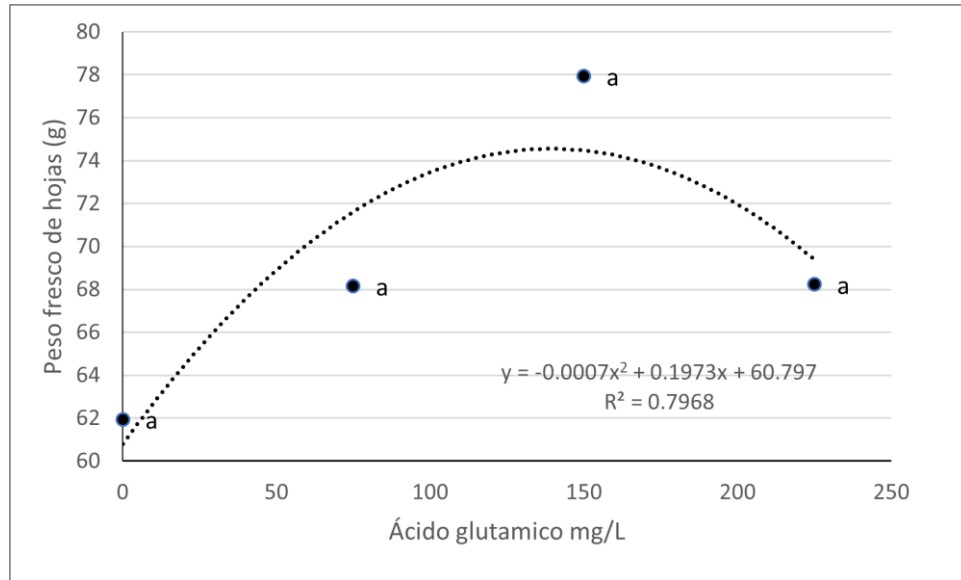
#### 4.7 Peso fresco de hojas

Se obtuvieron resultados no significativos en todos los tratamientos ya que no superaron al mismo en el peso fresco de hojas (Figura 19 y 20). Como se puede apreciar, el grupo de plantas con tratamiento de ácido glutámico (150 mg/L) + silicio (150 mg/L) mostraron un 139% mayor peso foliar, pero sin superar significativamente el obtenido por las plantas del grupo testigo.



**Figura 19.** Peso fresco de hojas de fresa (*Fragaria × ananassa* Duch) establecidas en un sistema de agricultura vertical con uso de iluminación LED en condiciones de ambiente controlado bajo distintas aplicaciones foliares de ácido glutámico y silicio.

Otro tratamiento con valores superiores al testigo es el de 225 ppm de ácido glutámico + 150 ppm de Silicio, con un peso fresco de hojas de 73.44 g, esto demuestra que nuestros valores en la presente variable fueron superiores a los registrados por (Jiménez, 2024), debido a que éste obtuvo valores entre 60 y 70 g con aplicaciones de 0.1 + 0.15 g L<sup>-1</sup> de Silicio vía drench y vía foliar respectivamente, en su estudio de fresas en ambiente controlado con iluminación suplementaria LED.

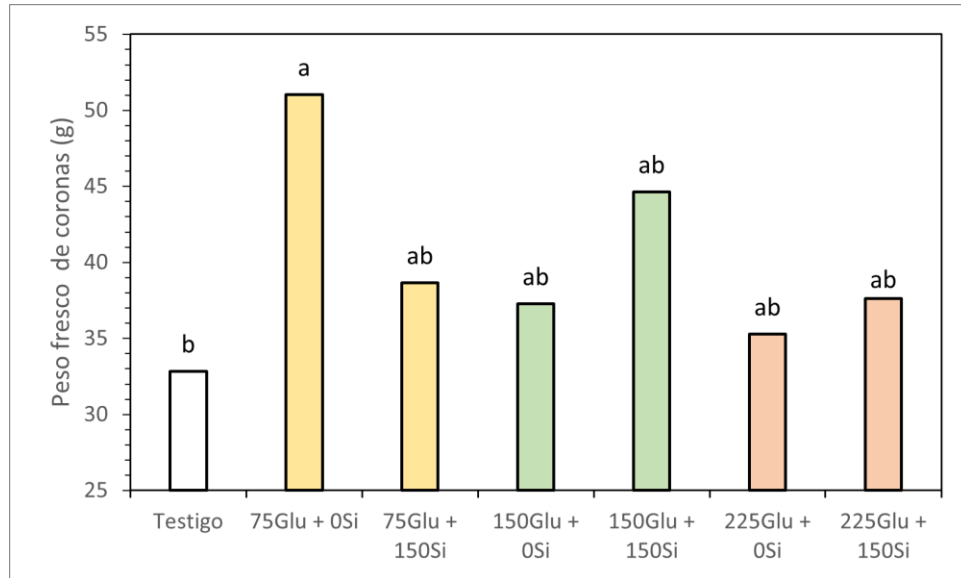


**Figura 20.** Efecto de aplicaciones foliares a distintas concentraciones de ácido glutámico y silicio sobre el peso fresco de hojas de fresa (*Fragaria × ananassa* Duch) establecidas en un sistema de agricultura vertical con uso de iluminación LED en condiciones de ambiente controlado.

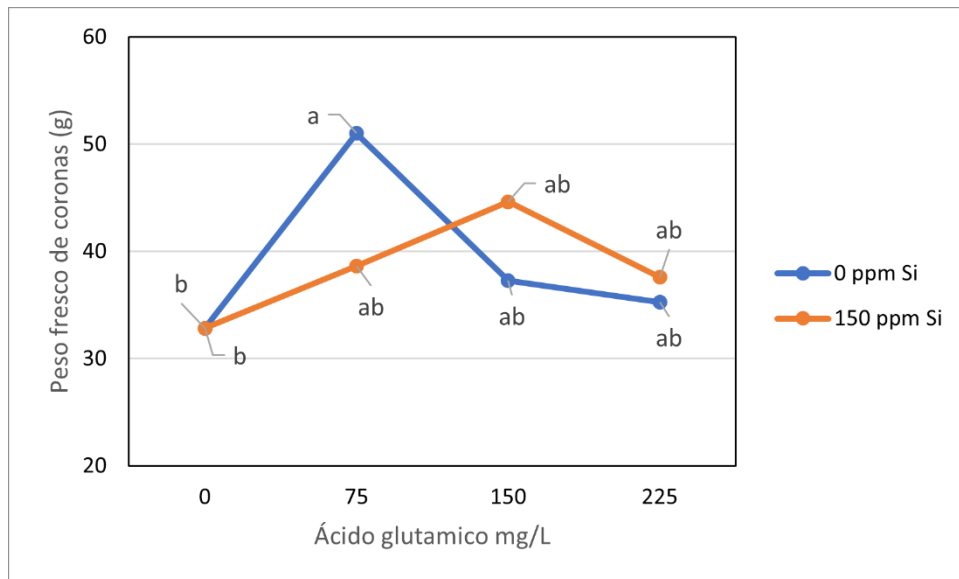
#### 4.8 Peso fresco de coronas

En la Figura 21 y 22 se demuestra que las aplicaciones de los distintos tratamientos tuvieron un efecto positivo en la variable peso fresco de coronas, ya que todos arrojaron valores por encima del testigo.

Sin embargo, el tratamiento con resultado más destacable fue el de ácido glutámico a 75 ppm + 0 ppm de silicio, ya que tuvieron una mayor biomasa de las coronas, superando a la del testigo en un 155.40%. Esta dosis supera a lo reportado por Mondal et al. (2013), quienes consiguieron un peso fresco de corona de 45.9 g con una dosis de 200 mg/L de ácido glutámico aplicado vía foliar a sus fresas bajo tecnología de invernadero.



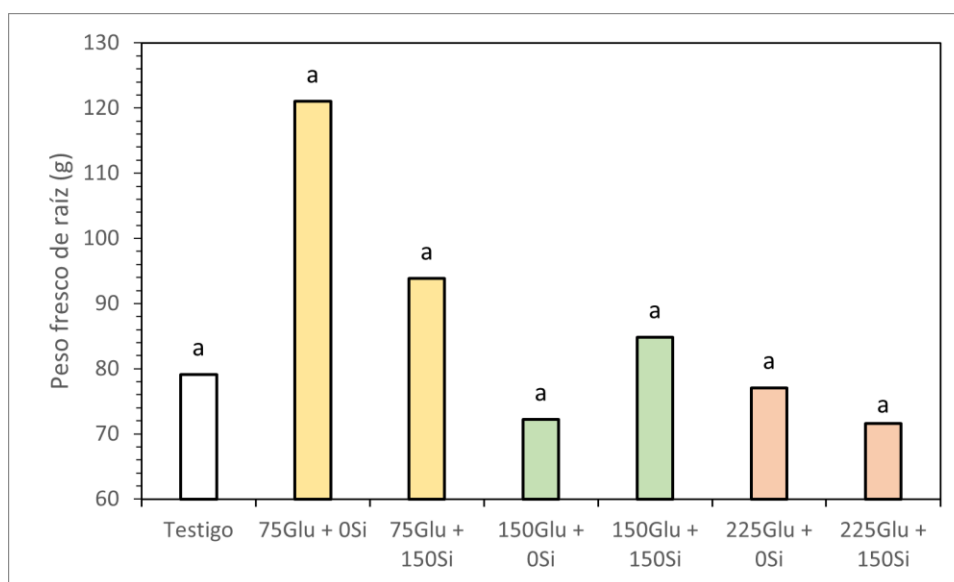
**Figura 21.** Peso fresco de coronas de fresa (*Fragaria × ananassa* Duch) establecidas en un sistema de agricultura vertical con uso de iluminación LED en condiciones de ambiente controlado bajo distintas aplicaciones foliares de ácido glutámico y silicio.



**Figura 22.** Efecto de aplicaciones foliares a distintas concentraciones de ácido glutámico y silicio sobre el peso fresco de coronas de fresa (*Fragaria × ananassa* Duch) establecidas en un sistema de agricultura vertical con uso de iluminación LED en condiciones de ambiente controlado.

#### 4.9 Peso fresco de raíz

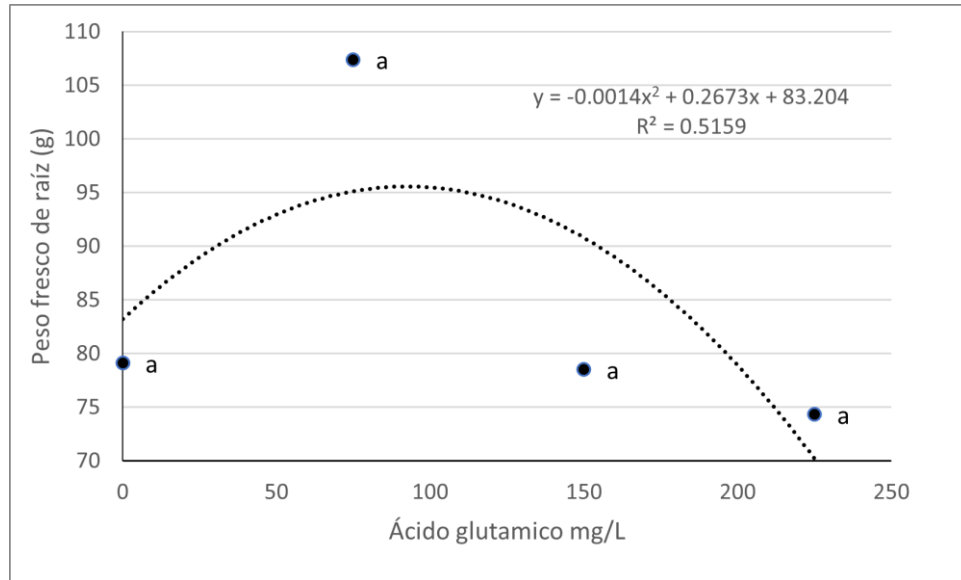
En esta variable no se presentó una diferencia significativa entre tratamientos (Figura 23). Sin embargo, los tres valores más altos corresponden a los siguientes tratamientos: 120.99 g a 75 mg/L de ácido glutámico + 0 ppm de silicio, 93.83 g a 75 mg/L de ácido glutámico + 150 mg/L de silicio, 84.85 g a 150 mg/L de ácido glutámico + 150 mg/L de silicio y, por otro lado, el testigo obtuvo un peso fresco de raíz de 79.1 gramos.



**Figura 23.** Peso fresco de raíz de fresa (*Fragaria × ananassa* Duch) establecidas en un sistema de agricultura vertical con uso de iluminación LED en condiciones de ambiente controlado bajo distintas aplicaciones foliares de ácido glutámico y silicio.

De acuerdo con la Figura 23 y 24 se puede observar que el peso fresco de raíz disminuye conforme la cantidad de ácido glutámico aumenta, esto sugiere que las concentraciones menores de este bioestimulante pueden tener un efecto mayor en esta variable.

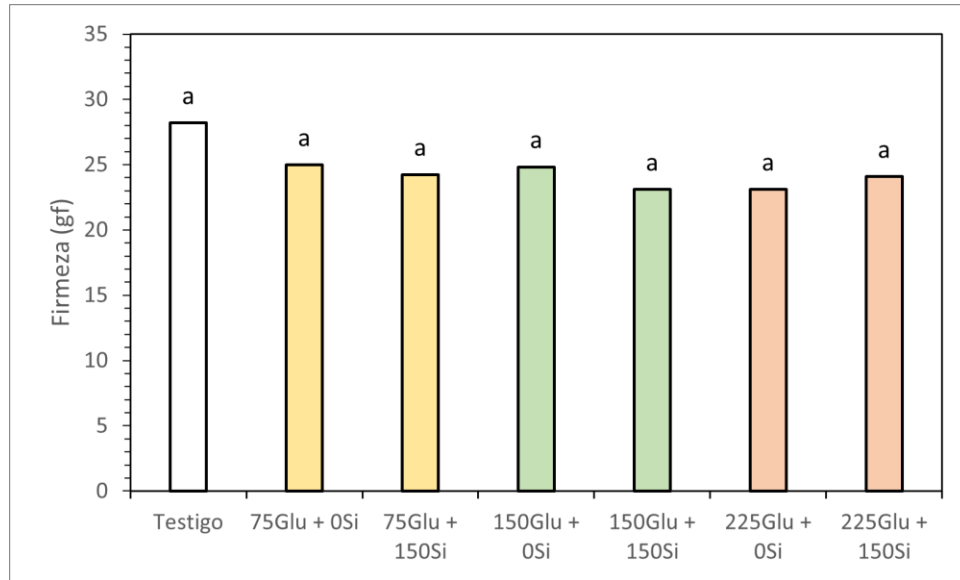
Dentro de sus beneficios, el ácido glutámico estimula la generación de un sistema radicular más vigoroso y sano, lo que permite una mayor eficiencia en la absorción de agua y fertilizantes (BIOPROI, 2025), esto se traduce a un mayor peso de raíz.



**Figura 24.** Efecto de aplicaciones foliares a distintas concentraciones de ácido glutámico y silicio sobre el peso fresco de raíz de fresa (*Fragaria × ananassa* Duch) establecidas en un sistema de agricultura vertical con uso de iluminación LED en condiciones de ambiente controlado.

#### 4.10 Firmeza y sólidos solubles totales

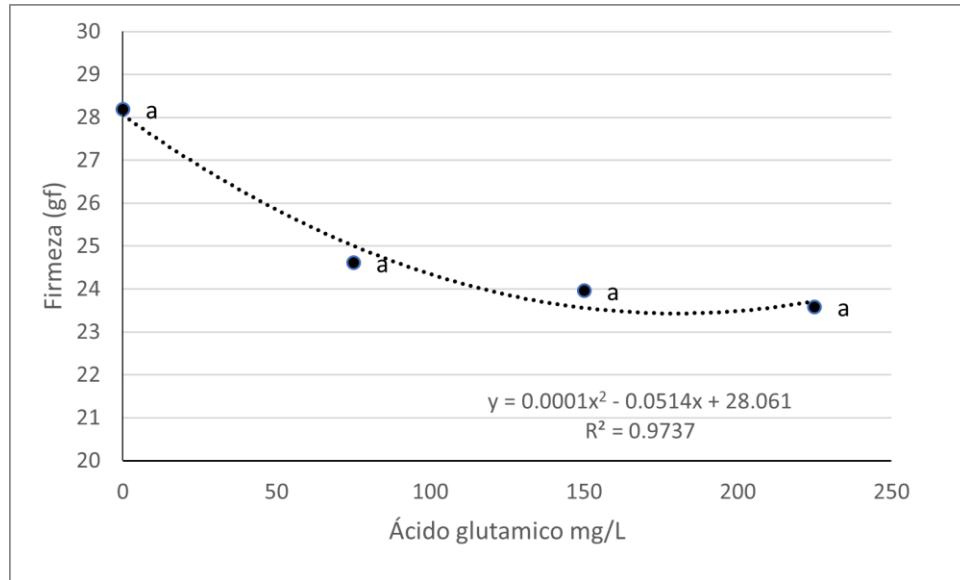
De acuerdo con los datos obtenidos y al igual como se puede apreciar en la Figura 25 y 26, las combinaciones y distintas concentraciones de ácido glutámico y silicio respondieron con valores similares entre sí al igual que con el grupo testigo, por lo tanto, no se encontraron diferencias significativas en la variable de firmeza de fruto.



**Figura 25.** Firmeza de frutos de fresa (*Fragaria × ananassa* Duch) establecidas en un sistema de agricultura vertical con uso de iluminación LED en condiciones de ambiente controlado bajo distintas aplicaciones foliares de ácido glutámico y silicio.

Sin embargo, el valor más alto en firmeza de fruto se consiguió de las plantas testigo, el tratamiento con el segundo valor más alto fue el de 75 ppm de ácido glutámico + 0 ppm silicio. Cabe mencionar que los demás tratamientos igual reflejaron resultados parecidos, entre 23-24 gf (Figura 25). A pesar de que las aplicaciones de silicio pueden tener un efecto en las cualidades organolépticas del fruto como lo es la firmeza (Cruz, 2018), debido a que este elemento mejora la rigidez de los frutos al acumularse en la epidermis (Pinedo - Guerrero (2020), nuestros resultados con el uso de silicio fueron inferiores al grupo testigo al igual que el estudio realizado por (Cruz, 2018) con plantas de fresa establecidas dentro de invernadero. Caso similar al estudio de Briones (2023), en el que la aplicación de ácido glutámico a una concentración de 5000 mg/L resultó con menor valor en firmeza comparado con el testigo.

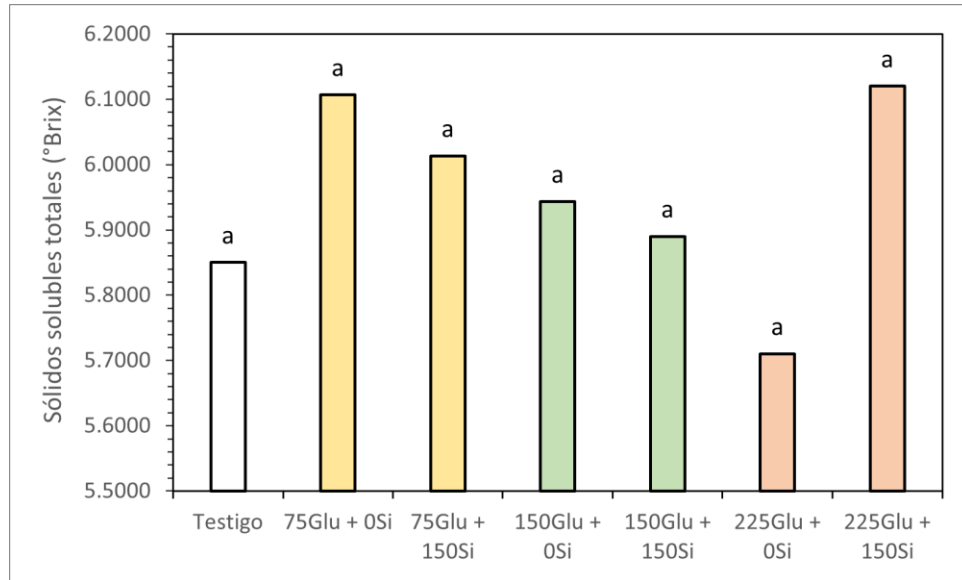
En cuanto a las aplicaciones con ácido glutámico en los tratamientos del presente experimento de fresas se puede determinar que la firmeza del fruto disminuye al aumentar la concentración de ácido glutámico, como se observa en la Figura 26.



**Figura 26.** Efecto de aplicaciones foliares a distintas concentraciones de ácido glutámico y silicio sobre la firmeza de frutos de fresa (*Fragaria × ananassa* Duch) establecidas en un sistema de agricultura vertical con uso de iluminación LED en condiciones de ambiente controlado.

Estadísticamente, los sólidos solubles totales no presentaron diferencias significativas (Figura 27 y 28). Sin embargo, algunos tratamientos arrojaron datos más elevados al compararse con el testigo. El tratamiento con el valor más alto fue el que tenía la concentración de 225 mg/L de ácido glutámico + 150 mg/L de silicio, le sigue 75 mg/L de ácido glutámico + 0 mg/L de silicio y el tercer tratamiento más sobresaliente fue el de 75 mg/L de ácido glutámico + 150 mg/L de silicio los cuáles obtuvieron 6.1 a 6.0 grados de sólidos solubles totales respectivamente.

Los resultados de la implementación de ácido glutámico con y sin silicio en el presente experimento de fresas en hidroponía son inferiores y no coinciden a valores cercanos entre 7.1 a 7.9 reportados por Mondal et al. (2013) en su trabajo de fresas en hidroponía bajo agricultura protegida de invernadero.



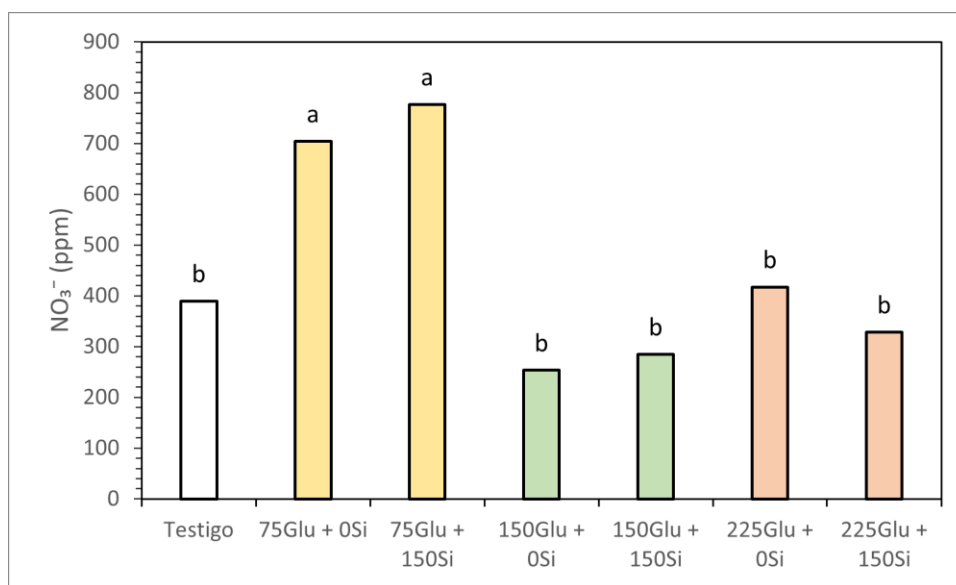
**Figura 27.** Sólidos solubles totales en frutos de fresa (*Fragaria × ananassa* Duch) establecidas en un sistema de agricultura vertical con uso de iluminación LED en condiciones de ambiente controlado bajo distintas aplicaciones foliares de ácido glutámico y silicio.



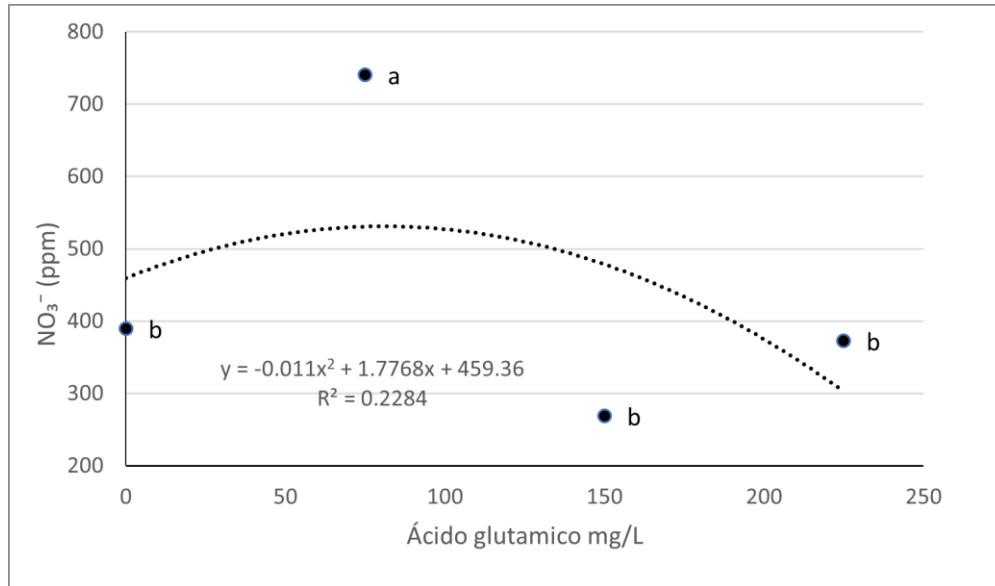
**Figura 28.** Efecto de aplicaciones foliares a distintas concentraciones de ácido glutámico y silicio sobre los sólidos solubles totales de frutos de fresa (*Fragaria × ananassa* Duch) establecidas en un sistema de agricultura vertical con uso de iluminación LED en condiciones de ambiente controlado.

#### 4.11 Concentración de nitrato, potasio y calcio en el fruto

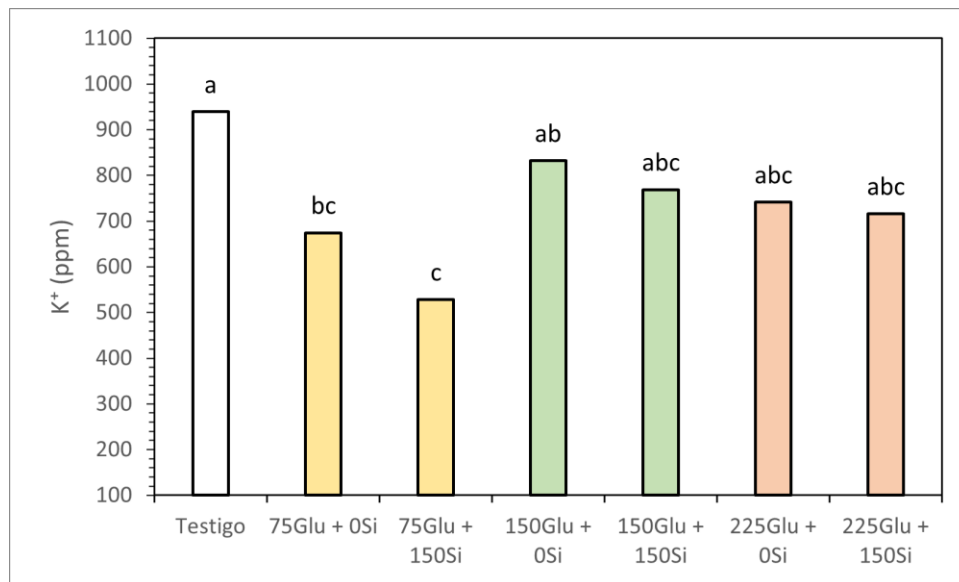
La aplicación de ácido glutámico a 75 mg/L estuvo asociado con un incremento en nitratos en los frutos de fresa, independientemente de si estas aplicaciones se hicieron con o sin silicio (Figura 29 y 30), sin embargo, esto se relacionó con una disminución en la concentración de potasio (Figura 31 y 32). En el caso del calcio, los frutos mostraron una reducción en el contenido de este nutriente cuando las plantas recibieron la aplicación tanto de ácido glutámico como de silicio (Figura 33 y 34).



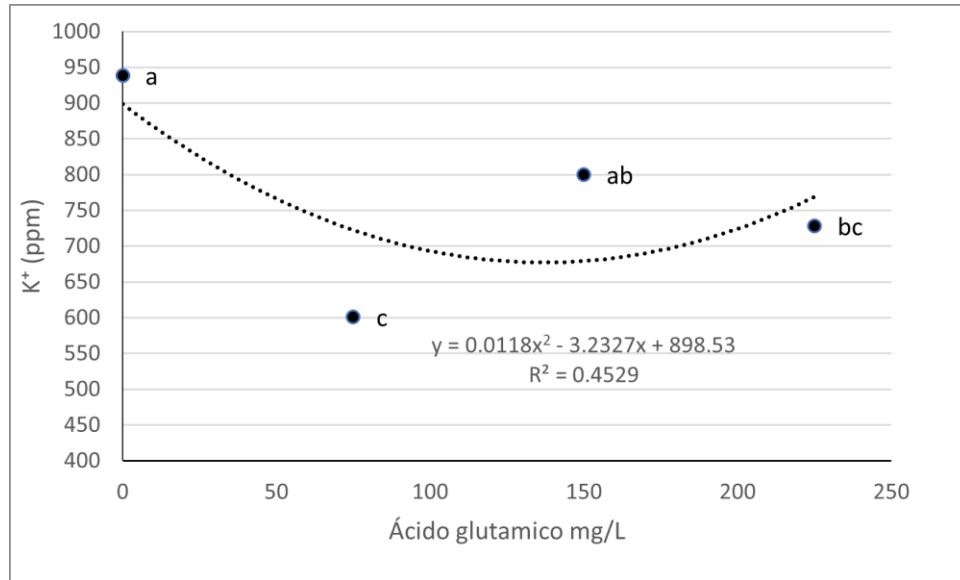
**Figura 29.** Concentración nutrimental de nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) en frutos de fresa (*Fragaria × ananassa* Duch) establecidas en un sistema de agricultura vertical con uso de iluminación LED en condiciones de ambiente controlado bajo distintas aplicaciones foliares de ácido glutámico y silicio.



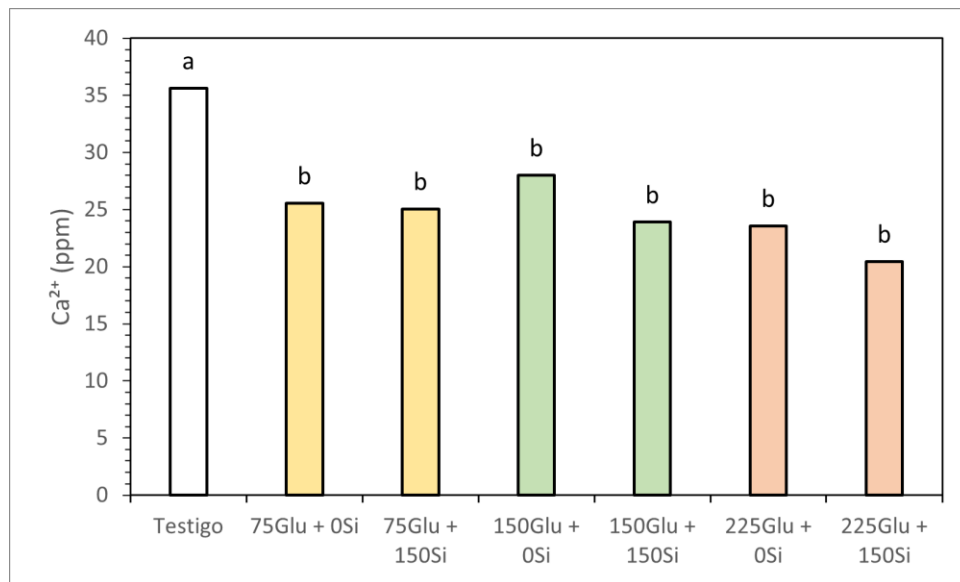
**Figura 30.** Efecto de aplicaciones foliares a distintas concentraciones de ácido glutámico y silicio sobre la concentración nutrimental de nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) de frutos de fresa (*Fragaria × ananassa* Duch) establecidas en un sistema de agricultura vertical con uso de iluminación LED en condiciones de ambiente controlado.



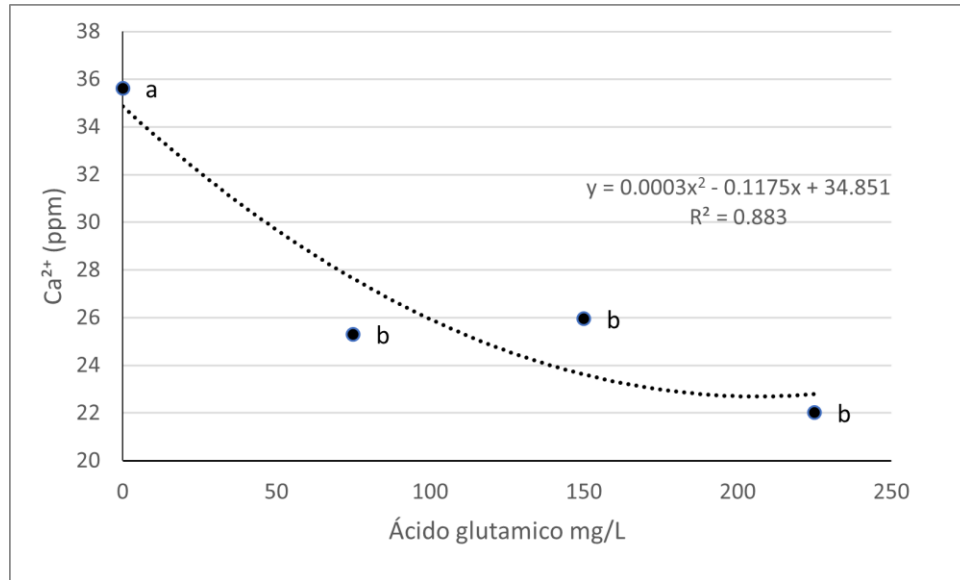
**Figura 31.** Concentración nutrimental de potasio (K<sup>+</sup>) en frutos de fresa (*Fragaria × ananassa* Duch) establecidas en un sistema de agricultura vertical con uso de iluminación LED en condiciones de ambiente controlado bajo distintas aplicaciones foliares de ácido glutámico y silicio.



**Figura 32.** Efecto de aplicaciones foliares a distintas concentraciones de ácido glutámico y silicio sobre la concentración nutrimental de potasio (K<sup>+</sup>) de frutos de fresa (*Fragaria × ananassa* Duch) establecidas en un sistema de agricultura vertical con uso de iluminación LED en condiciones de ambiente controlado.



**Figura 33.** Concentración nutrimental de Ca<sup>2+</sup> en frutos de fresa (*Fragaria × ananassa* Duch) establecidas en un sistema de agricultura vertical con uso de iluminación LED en condiciones de ambiente controlado bajo distintas aplicaciones foliares de ácido glutámico y silicio.



**Figura 34.** Efecto de aplicaciones foliares a distintas concentraciones de ácido glutámico y silicio sobre la concentración nutricional de calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) en frutos de fresa (*Fragaria × ananassa* Duch) establecidas en un sistema de agricultura vertical con uso de iluminación LED en condiciones de ambiente controlado.

La fresa tiene una alta demanda de nitrógeno y potasio, por lo que un balance ajustado es importante para el desarrollo adecuado puesto que un balance deficiente resulta en bajo rendimiento y mala calidad (Hancock, 1999). El ácido glutámico puede haber aumentado la productividad de los frutos a través de su función en la asimilación de nitrógeno (Alfosea-Simón et al., 2021), un nutriente directamente relacionado con el número de frutos producidos (Cvelbar et al., 2021). Los resultados obtenidos podrían ser explicados por los efectos del ácido glutámico en el metabolismo del nitrógeno en las plantas, lo que permitiría modificar el contenido de nitratos en los frutos. Los resultados sugieren que el ácido glutámico incrementó la absorción de nitratos pero que estos no pudieron ser asimilados ni reducidos a amonio cuando la dosis del ácido glutámico fue de 75 mg/L, resultando en un alto nivel de nitratos; en cambio, con dosis más altas el ácido glutámico los nitratos pudieron ser reducidos a amonio, resultando en bajas concentraciones de nitrato.

En relación al potasio y calcio, la reducción observada en la concentración de ambos nutrientes en el fruto puede deberse a un efecto de dilución al producirse

un mayor número de frutos y que estos hayan resultado de mayor tamaño, además de que produjeron un mayor rendimiento, causando que el potasio y calcio transportados hacia los frutos se mostrasen en menor concentración.

## V. CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos se puede concluir que las aplicaciones de ácido glutámico permiten aumentar el rendimiento de frutos y su calidad en cuanto al tamaño ya que con aspersiones a 75 mg/L se obtuvieron incrementos significativos; sin embargo, otros factores de calidad como la firmeza ni el contenido de sólidos solubles no fueron afectados. El crecimiento vegetativo de las plantas también fue afectado por los tratamientos ya que la longitud y diámetro de las coronas fue mayor cuando se aplicó ácido glutámico a 150 mg/L siempre y cuando se realizara en combinación con la aplicación de silicio; por su parte, el peso de las coronas fue favorecido por el ácido glutámico a 75 mg/L. En general, las aplicaciones de silicio en este experimento no resultaron favorables ya que no se observó un efecto sinérgico cuando se aplicó en combinación con ácido glutámico.

## VI. LITERATURA CITADA

- Abdallah, A. F. (2015). Algunos aspectos sobre nutrición de la Fresa Hidropónica. Ministerio de Agricultura y Ganadería. <https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/av-1817.pdf>
- Alarcón, V. A. (2006). Proyectos en cultivo sin suelo: ¿Cómo empezar? En V. A. Alarcón (Ed.), Cultivos sin suelo (Compendios de Horticultura, No. 17, pp. 11–21). Ediciones de Horticultura.
- Alfosea-Simón, M., Simón-Grao, S., Simón, I. (2021). Physiological, nutritional and metabolomic responses of tomato plants after the foliar application of amino acids aspartic acid, glutamic acid and alanine. *Front. Plant Sci.* 11, 581234.
- Almutairi, K.F., Ali, M.M., Ali, W.M., Zhang, X., Sierka, E., Lin, K., Kalaji, H.M., Telesinski, A., Yousef, A.F., & Guiamba, H. (2022). Growth performance of guava trees after the exogenous application of amino acids glutamic acid, arginine and glycine. *Horticulturae*, 8, 1110. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8121110>
- Beltrano, J., y Gimenez, D. O. (2015). Cultivo en hidroponía. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP). 180 p. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/46752>
- Benavides, M. A. (2021). Bioestimulantes agrícolas: importancia y definición. ResearchGate. 1 p. DOI: 10.13140/RG.2.2.21104.58889
- Benke, K., y Tomkins, B. (2017). Future food-production systems: vertical farming and controlled-environment agriculture. *Sustainability: Science, Practice and Policy*, 13(1), 13-26 p. <https://doi.org/10.1080/15487733.2017.1394054>
- Blanco-Valdés, Y. (2019). Importancia de la calidad de la luz entre las plantas arvenses-cultivo. *Cultivos Tropicales*, 40(4), e09. Recuperado a partir de <https://ediciones.inca.edu.cu/index.php/ediciones/article/view/1533>
- Briceño Armijos, H. A. (2021). Evaluación de 3 variedades de frutilla (*Fragaria x ananassa*) en un sistema semi hidropónico, bajo condiciones de

- invernadero (Tesis de licenciatura). Universidad San Francisco de Quito.  
<http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/10958>
- Briones Rodríguez, M. M. (2023). Respuesta de fresa cv. Albión a la aplicación de bioestimulantes, sometida a estrés hídrico (Tesis de licenciatura). Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.  
<http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/handle/123456789/49834>
- Casbis, G., Andrade, O., Sotelo, H., y Cardoso, A. (2020). Crecimiento, rendimiento y calidad de fresa por efecto del régimen nutrimental. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11, 1337–1348.
- Cooke, J., y Leishman, M. R. (2016). Consistent alleviation of abiotic stress with silicon addition: A meta-analysis. *Functional Ecology*, 30(8), 1340–1357.  
<https://doi.org/10.1111/1365-2435.12713>
- Cortes Muñoz, W. (2022). Respuesta de papa "*Solanum tuberosum*" variedad Parda Pastusa en rendimiento y calidad a la aplicación de ácido glutámico (Tesis de licenciatura). Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales.  
<https://repository.udca.edu.co/handle/11158/4945>
- Cruz Hipólito, J. P. (2018). Respuesta agronómica y fisiológica de la fresa (*Fragaria x ananassa* Duch.) a la aplicación de silicio (Tesis de maestría). Colegio de Postgraduados.  
<http://colposdigital.colpos.mx:8080/jspui/handle/10521/3058>
- Currie, H. A., y Perry, C. C. (2007). Silica in plants: Biological, biochemical and chemical studies. *Annals of Botany*, 100, 1383–1389.  
<https://doi.org/10.1093/aob/mcm247>
- Cvelbar Weber, N., Koron, D., Jakopič, J., Veberič, R., Hudina, M., y Baša Česnik, H. (2021). Influence of nitrogen, calcium and nano-fertilizer on strawberry (*Fragaria x ananassa* Duch.) fruit inner and outer quality. *Agronomy*, 11(5), 997. <https://doi.org/10.3390/agronomy11050997>
- Dávalos, P. A., Aguilar, G. R., Jofre, A. E., Hernández, A. R., y Vázquez, M. N. (2011). Tecnología para sembrar viveros de fresa (Libro técnico Núm. 3). Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.

- Dario, H. C. R. (2020). Desarrollo morfológico y rendimiento de tres variedades de fresa mediante un sistema hidropónico NFT cantón Guayaquil, Guayas (Tesis doctoral). Universidad Agraria del Ecuador.
- De Loera Hernández, M. del C. (2022). Cultivo aeropónico de chile habanero (*Capsicum chinense*) con luz LED y efecto de nanopartículas de MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (Tesis de licenciatura). Tecnológico Nacional de México. <https://rinacional.tecnm.mx/handle/TecNM/4778>
- Devi, P. I., Manjula, M., y Bhavani, R. V. (2022). Agrochemicals, environment, and human health. *Annual Review of Environment and Resources*, 47, 399–421. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-112420-014314>
- Departamento de Agricultura de Carolina del Norte y Servicios al Consumidor. (2020). Food and Drug Protection Division. <https://www.ncagr.gov/fooddrug/espanol/documents/Fresas.pdf>
- Dias, M. I., Barros, L., Morales, P., Sánchez-Mata, M. C., Oliveira, M. B. P. P., y Ferreira, I. C. F. R. (2015). Nutritional parameters of infusions and decoctions obtained from *Fragaria vesca* L. roots and vegetative parts. *LWT – Food Science and Technology*, 62(1), 32–38. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.01.034>
- du Jardin, P. (2015). Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation. *Scientia Horticulturae*, 196, 3–14. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.021>
- Eigenbrod, C., y Gruda, N. (2015). Urban vegetable for food security in cities. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 35, 483–498. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0273-y>
- FAOSTAT. (2020). Base de datos estadísticos de la FAO. <http://www.fao.org/faostat/es/#data>.
- FAOSTAT. (2019). The statistics division of the Food and Agriculture Organization of the United Nations: <http://faostat3.fao.org/faostat-gateway/go/to/download/T/TP/S>.

- Farahmandi, S.R., Samavat, S., Mostafavi, M., Mohammadi Torkashvand, A., y Kalate Jari, S. (2022). Combined foliar-applied L-glutamic acid, nitrogen and potassium improve plant growth, physio-chemical attributes, minerals and longevity of Gerbera (*Gerbera jamesonii*). *Plant Nutrition*, 45, 951–962. <https://doi.org/10.1080/01904167.2021.1998526>
- González-Ramírez, M. G., Santoyo-Cortés, V. H., Arana-Coronado, J. J., y Muñoz-Rodríguez, M. (2020). The insertion of Mexico into the global value chain of berries. *World Development Perspectives*, 20, 100240. <https://doi.org/10.1016/j.wdp.2020.100240>
- Goswami, B., y Yadav, V. (2022). Soil-less culture (hydroponics) — A review. *Just Agriculture*, 2(12), 1–12. [https://justagriculture.in/files/newsletter/2022/august/48.%20Soil-Less%20Culture%20\(Hydroponics\)%20%E2%80%93%20A%20Review.pdf](https://justagriculture.in/files/newsletter/2022/august/48.%20Soil-Less%20Culture%20(Hydroponics)%20%E2%80%93%20A%20Review.pdf)
- Gruda, N. S. (2021). Soilless culture systems and growing media in horticulture: An overview. En N. S. Gruda (Ed.), *Advances in horticultural soilless culture* (pp. 1–20). Burleigh Dodds Science Publishing. <https://doi.org/10.19103/AS.2020.0070.01>
- Hancock, F. (1999). *Strawberries*. CABI Publishings. Michigan. USDA.
- Hardigan, M. A., Lorant, A., Pincot, D. D. A., Feldmann, M. J., Famula, R. A., Acharya, C. B., Lee, S., Verma, S., Whitaker, V. M., Bassil, N., Zurn, J., Cole, G. S., Bird, K., Edger, P. P., y Knapp, S. J. (2021). Unraveling the complex hybrid ancestry and domestication of cultivated strawberry. *Molecular Biology and Evolution*, 38(6), 2285–2305. <https://doi.org/10.1093/molbev/msab024>
- Hernández Valencia, R. D., Juárez Maldonado, A., Pérez Hernández, A., Lozano Cavazos, C. J., Zermeño González, A., y González Fuentes, J. A. (2022). Influencia de fertilizantes orgánicos y del silicio sobre la fisiología, el rendimiento y la calidad nutracéutica del cultivo de fresa. *Nova Scientia*, 14(28), 00001. <https://doi.org/10.21640/ns.v14i28.3032>

- Hirzel, J. (2013). Fertilización en frutilla. En D. P. Undurraga y S. Vargas (Eds.), Manual de frutillas (Boletín No. 162, pp. 35–45). Centro Regional de Investigación Quilamapu.
- Jiménez Cabrera, U. R. (2024). La aplicación de silicio aumenta la calidad de frutos en plantas de fresa crecidas en agricultura vertical con iluminación artificial (Tesis de licenciatura). Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. <https://repositorio.uaaan.mx/xmlui/handle/123456789/50081>
- Khalil, N. H., y Hammoodi, J. K. (2020). Effect of nitrogen, potassium and calcium in strawberry fruit quality. *International Journal of Agricultural and Statistical Sciences*, 16(1), 1967–1972.
- Ledesma, N. A., Nakata, M., y Sugiyama, N. (2008). Effect of high temperature stress on the reproductive growth of strawberry cvs. 'Nyoho' and 'Toyonoka'. *Scientia Horticulturae*, 116(2), 186–193. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2007.12.010>
- López Jarrín, M. C. (2021). Diagnóstico morfológico de la pudrición de la corona de la fresa (*Fragaria x ananassa* Duchesne ex Rozier) en el cantón Quito (Trabajo de titulación de ingeniería agronómica). Universidad Central del Ecuador. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/23969>
- Medrano, E., Lorenzo, P., Sánchez Guerrero, M. C., García, M. L., Caparrós, I., Coelho, G., y Giménez, M. (2005). Water and nutrient use efficiency of a tomato crop as affected by two refrigeration methods: External mobile shading and fog system. *Acta Horticulturae*, 697, 463–467. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2005.697.58>
- Mir, M. S., Naikoo, N. B., Kanth, R. H., Bahar, F. A., Bhat, M. A., Nazir, A., y Ahngar, T. A. (2022). Vertical farming: The future of agriculture: A review. *The Pharma Innovation Journal*, 11, 1175–1195. <https://www.thepharmajournal.com/archives/2022/vol11issue2S/PartP/S-11-2-22-988.pdf>
- Mondal, M. F., Asaduzzaman, M., Kobayashi, Y., Ban, T., y Asao, T. (2013). Recovery from autotoxicity in strawberry by supplementation of amino

- acids. *Scientia Horticulturae*, 164, 137–144.  
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.09.019>
- NAAS 2019. (2019). Vertical farming (Policy Paper No. 89). National Academy of Agricultural Sciences.
- O’Sullivan, C. A., Hani, C. L., Hochman, Z., y Bonnett, G. D. (2020). Vertical farms bear fruit. *Nature Biotechnology*, 38, 160–162.  
<https://doi.org/10.1038/s41587-019-0400-z>
- Pérez Jiménez, S. (2020). NUTRICIÓN MINERAL. Recuperado el 19 de mayo de 2026, de <https://www.scribd.com/document/464867132/6-Nutricion-mineral>
- Pérez-León, M.I., González-Fuentes, J.A., Valdez-Aguilar, L.A., Benavides-Mendoza, A., Alvarado-Camarillo, D., y Castillo-Chacón, C.E. (2023). Effect of glutamic acid and 6-benzylaminopurine on flower bud biostimulation, fruit quality and antioxidant activity in blueberry. *Plants*, 12, 2363. <https://doi.org/10.3390/plants12122363>
- Pérez, L. (2018). Inducción de la floración en fresa (*Fragaria × ananassa*) variedad Albión, mediante la aplicación de extracto de sauce (*Salix humboldtiana*) y agua de coco (*Cocos nucifera* L.) (Tesis de ingeniería agronómica). Universidad Técnica de Ambato. <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/28651>
- Pohl, M. E. D., Piperno, D. R., Pope, K. O., Jones, J. G., Lentz, D. L., Hochberg, J. M., y Castillo, P. (2016). Early agriculture in the Maya lowlands. *Latin American Antiquity*, 27(1), 3–25. <https://doi.org/10.7183/1045-6635.27.1.3>
- Prasad, R., Lisiecka, J., y Kleiber, T. (2022). Morphological and yield parameters, dry matter distribution, nutrients uptake, and distribution in strawberry (*Fragaria × ananassa* Duch.) cv. ‘Elsanta’ as influenced by spent mushroom substrates and planting seasons. *Agronomy*, 12(4), 854. <https://doi.org/10.3390/agronomy12040854>

- Ramírez C., M. A. (2021). Efecto del ácido glutámico en plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) (Tesis de maestría, Instituto Politécnico Nacional).
- Ramírez Padrón, L. C., Cauich, I. C., Fernández, V. G. P., Luis, D. M., y Fernández, A. P. (2020). Análisis de los indicadores de competitividad de las exportaciones de fresa mexicana. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(4), 815–827. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i4.2049>
- Rivera-Solís, L. L., Benavides-Mendoza, A., Robledo-Olivo, A., y González-Morales, S. (2023). La salud del suelo y el uso de bioestimulantes. *Revista Agraria*, 20(3), 5–10. <https://doi.org/10.59741/agraria.v20i3.46>
- Rodríguez, R. D. L., Lara-Herrera, A., Padilla-Bernal, L. E., Avelar-Mejía, J. J., y España-Luna, M. P. (2018). Proporción de drenaje de la solución nutritiva en el rendimiento y calidad de tomate en hidroponía. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(SPE20), 4343–4353.
- Ruiz-Castro, M. D. (2022). Evaluación de tres variedades de frutilla (*Fragaria × ananassa*) en un sistema de cultivo semihidropónico en Puenbo–Pichincha (Trabajo de fin de carrera para obtener el título de Ingeniero en Agroempresas). Universidad San Francisco de Quito, Colegio de Ciencias e Ingenierías.
- Qiu, X.-M., Sun, Y.-Y., Ye, X.-Y. y Li, Z.-G. (2020). Signaling Role of Glutamate in Plants. *Front. Plant Sci.*, 10, 1743.
- Samtani, J., Friedrich, H., Fennimore, S. A., Finn, C. E., Petran, A., Wallace, R. W., Pritts, M. P., Fernandez, G., Chase, C. A., Kubota, C., y Bergefurd, B. (2019). The State and Future of the Strawberry Industry in the United States. *HortTechnology*, 29(1), 11–24. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH04184-18>
- Sánchez-Del Castillo, F., Moreno-Pérez, E. C., Pineda-Pineda, J., Osuna, J. M., Rodríguez-Pérez, J. E., y Osuna-Encino, T. (2014). Producción hidropónica de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) con y sin recirculación de la solución nutritiva. *Agrociencia*, 48, 185–197.

- Sánchez Ortiz, N. E. (2022). Evaluación de las propiedades bioestimulantes de dos productos alternativos en tres variedades de fresa (*Fragaria × ananassa*) en la parroquia Montalvo, provincia de Tungurahua (Tesis de licenciatura). Universidad Técnica de Ambato.
- Santoyo, J. A., y Martínez, C. O. (2010). Paquete tecnológico para la producción de fresa (Folleto técnico). SAGARPA–Fundación Produce Sinaloa A. C.
- Savvas, D., y Ntatsi, G. (2015). Biostimulant activity of silicon in horticulture. *Scientia Horticulturae*, 196, 66–81. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.010>
- Serna-Rodríguez, J. R., Castro-Brindis, R., Colinas-León, M. T., Sahagún-Castellanos, J., y Rodríguez-Pérez, J. E. (2011). Aplicación foliar de ácido glutámico en plantas de jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Revista Chapingo. Serie Horticultura*, 17(1), 9–13.
- Silva Yat, J. A. C., y Meoño Canel, A. C. (2018). Evaluación de sistema de agricultura vertical tecnificado para producción de cultivos agrícolas que minimicen la inseguridad alimentaria en Camotán, Chiquimula (Informe final de investigación INF-2018-09). Universidad de San Carlos de Guatemala. <https://digi.usac.edu.gt/bvirtual/informes/prunian/INF-2018-09.pdf>
- Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A., y Lovatelli, A. (2022). Producción de alimentos en acuaponía a pequeña escala: Cultivo integral de peces y plantas (Documento técnico de pesca y acuicultura No. 589). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://doi.org/10.4060/i4021es>
- Sulqui, R. E. (2021). Evaluación del efecto de dos productos orgánicos para el control de trips (*Frankliniella occidentalis*) en el cultivo de fresa (*Fragaria × ananassa*) variedad Albión (Tesis de ingeniería agronómica). Universidad Técnica de Ambato. <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/34781>

- Souri, Z., Khanna, K., Karimi, N., y Ahmad, P. (2021). Silicon and Plants: Current knowledge and Future Prospects. *Journal of Plant Growth Regulation*, 40, 906–925. <https://doi.org/10.1007/s00344-020-10172-7>
- Talukder, M.R., Asaduzzman, M.D., Tanaka, H., y Asao, T. (2018). Light-emitting diodes and exogenous amino acids application improve growth and yield of strawberry plants cultivated in recycled hydroponics. *Scientia Horticulturae*, 237, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.05.033>
- Toapanta Ichina, J. E. (2021). Evaluación de tres extractos vegetales para el control de ácaros (*Tetranychus urticae* Koch) en hojas de fresa (*Fragaria × ananassa*) (Tesis de licenciatura). Universidad Técnica de Ambato.
- Vidal, I. (2019). Fertirrigación: Desde la teoría práctica. Universidad de Concepción.

### 6.1 Citas electrónicas

- AdeptoAg. (2023, mayo 2). Vertical farming through the ages. Recuperado el 13 de noviembre de 2024, de <https://www.linkedin.com/pulse/vertical-farming-through-ages-adeptag/>
- Asociación Española de Fabricantes de Agronutrientes (AEFA). (2019, diciembre 4). El silicio como fertilizante y bioestimulante agrícola. Recuperado el 19 de noviembre de 2024, de <https://aefa-agronutrientes.org/el-silicio-como-fertilizante-y-bioestimulante-agricola>
- Asociación Española de Fabricantes de Agronutrientes (AEFA). (2022, marzo 11). Solución nutritiva. Recuperado el 30 de octubre de 2024, de <https://aefa-agronutrientes.org/solucion-nutritiva>
- Asociación Española de Fabricantes de Agronutrientes (AEFA). (2022, octubre 17). Elemento esencial. Recuperado el 5 de noviembre de 2024, de <https://aefa-agronutrientes.org/elemento-esencial>
- Agroactivo. (2024). TIPOS DE SUSTRATOS PARA LAS PLANTAS. Recuperado el 24 de octubre de 2024, de <https://agroactivocol.com/sin-categoria/tipos-de-sustratos-para-las-plantas/>

- AgroExcellence Magazine. (2022, septiembre 29). Sistemas de cultivo sin suelo. Recuperado el 22 de octubre de 2024, de <https://agroexcellence.com.mx/sistemas-de-cultivo-sin-suelo/>
- Boekhout, R. (2021, febrero 26). Introducing vertical farming to Mexico and beyond. FreshPlaza. Recuperado el 17 de noviembre de 2024, de <https://www.freshplaza.com/latin-america/article/9297887/introducing-vertical-farming-to-mexico-and-beyond/>
- BIOPROI. (2025) Ácido Glutámico en la Agricultura: Clave para una Mejor Absorción de Nutrientes. Recuperado el 19 de abril de 2026, de <https://bioprooi.com/blog/agricultura/acido-glutamico-en-la-agricultura-clave-para-una-mejor-absorcion-de-nutrientes>
- Centro Tecnológico del Metal. (2020). Informe trimestral julio-septiembre 2020. Agrotecnología (pp. 9–10). Recuperado el 7 de noviembre de 2024, de [https://ctmetal.es/gestion/imagenes/noticias/8205\\_Informe%202%20Agrotecnologia%20\(1\).pdf?utm\\_source=chatgpt.com](https://ctmetal.es/gestion/imagenes/noticias/8205_Informe%202%20Agrotecnologia%20(1).pdf?utm_source=chatgpt.com)
- Chavez, A. (2024, julio 8). Agricultura vertical: Una revolución silenciosa en la producción de alimentos. Yamuni Representaciones Agroindustriales. Recuperado el 17 de noviembre de 2024, de <https://yamuni.com.mx/agricultura-vertical-una-revolucion-silenciosa/>
- Chen, J. (2016, abril 4). La influencia de la luz en el crecimiento del cultivo. Premier Tech Growers and Consumers. Recuperado el 14 de noviembre de 2024, de <https://www.pthorticulture.com/es-us/centro-de-formacion/la-influencia-de-la-luz-en-el-crecimiento-del-cultivo>
- City of Greens. (2021, julio 17). Guía hidroponía. Recuperado el 12 de noviembre de 2024, de <https://cityofgreens.com/agricultura-vertical/hidroponia/guia-hidroponia/>
- Crumpacker, M. (2018, octubre 19). A Look at the History of Vertical Farming. Medium. Recuperado el 13 de noviembre de 2024, de <https://medium.com/@MarkCrumpacker/a-look-at-the-history-of-vertical-farming-f4338df5d0f4>

- Currey, C. (2021). Subirrigation strategies. Greenhouse Management. Recuperado el 12 de noviembre de 2024, de <https://www.greenhousemag.com/article/subirrigation-strategies/>
- Dabrio, A. (2020). Guía de estudio: Nutrición mineral de los vegetales. Cátedra de Fisiología Vegetal, Universidad Nacional del Nordeste. Recuperado el 30 de octubre de 2024, de <https://exa.unne.edu.ar/biologia/fisiologia.vegetal/Gu%C3%ADa%20de%20estudio-Nutricion%20mineral%202020.pdf>
- García, G. (2024). El consumo de fresas otorga importantes beneficios a la salud. THE FOOD TECH. Recuperado el 30 de septiembre de 2024, de <https://thefoodtech.com/industria-alimentaria-hoy/el-consumo-de-fresas-otorga-importantes-beneficios-a-la-salud/>
- Gagne, C., Allred, J., & Mattson, N. (2021). From Planting To Harvesting: The Basics of Indoor Strawberry Production. Greenhouse Grower. Recuperado de <https://www.greenhousegrower.com/production/from-planting-to-harvesting-the-basics-of-indoor-strawberry-production/>
- Google Earth. (2024). Departamento de Ciencias del Suelo. Recuperado el 19 de noviembre de 2024, de <https://earth.google.com/web/search/25%C2%B021%2713.6%22N+101%C2%B002%2701.6%22W/@25.35356812,-101.03370261,1781.48231492a,224.25006484d,35y,0h,0t,0r>
- FAOSTAT. (2022). Cultivos y productos de ganadería. (FAO) Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Recuperado el 30 de noviembre de 2025, de [https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL?regions=5000&elements=2510,2413,2312&items=544&years=2022&output\\_type=pivot&file\\_type=xls&submit=true](https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL?regions=5000&elements=2510,2413,2312&items=544&years=2022&output_type=pivot&file_type=xls&submit=true)
- FÓR-MATE. (2022). Manual de formación: Hidroponía (pp. 31–32). Academia de Formación. Recuperado el 6 de noviembre de 2024, de <https://academia->

formacion.com/wp-content/uploads/2022/12/MANUAL-DE-FORMACIO%CC%81N-HIDROPONI%CC%81A\_.pdf

Fernández, V. (2018). Doble uso de los productos de silicio contra el estrés biótico y abiótico de las plantas. *Redagícola*, (99), 50–53. Recuperado el 15 de noviembre de 2024, de <https://hdl.handle.net/20.500.14001/63453>

HANNA Instruments. (2019). Importancia del pH en suelos y en soluciones nutritivas para cultivo de plantas. Recuperado el 30 de octubre de 2024, de <https://h.hannainst.com.mx/blog/agricultura-e-hidroponia-boletines/importancia-del-ph-en-suelos-y-en-soluciones-nutritivas-para-cultivo-de-plantas/>

Hernández. (2024). Guía: ¿Qué es la electroconductividad?. HYDRO ENVIRONMENT. Recuperado el 31 de octubre de 2024, de [https://www.hydroenv.com.mx/catalogo/index.php?main\\_page=page&id=35](https://www.hydroenv.com.mx/catalogo/index.php?main_page=page&id=35)

InfoAgro. (2018, septiembre 19). Nutrición hídrica y mineral en cultivo hidropónico. Recuperado el 31 de octubre de 2024, de <https://mexico.infoagro.com/nutricion-hidrica-y-mineral-en-cultivo-hidroponico/>

JACTO. (2023, junio 13). Agricultura vertical: ¿La nueva cara de la agricultura?. Recuperado el 17 de noviembre de 2024, de <https://bloglatam.jacto.com/agricultura-vertical/>

Jiffy Group. (2023). Cultivo sin suelo: ¿qué es y cómo puede ser utilizado?. Recuperado el 30 de octubre de 2024, de <https://jiffygroup.com/es/noticias/cultivo-sin-suelo-que-es-y-como-puede-ser-utilizado/>

Maher. (2021). Qué es la conductividad eléctrica y su importancia en los cultivos. Maher Smart Agrocontrollers. Recuperado el 31 de octubre de 2024, de <https://www.maherelectronica.com/conductividad-electrica-agricultura/>

Maldonado, M. (2023, agosto 21). Redefiniendo la producción agrícola: México y la apuesta vertical de agricultura que cosecha innovación. iLab.

Recuperado el 17 de noviembre de 2024, de <https://ilab.net/agricultura-vertical-mexico/>

Mordor Intelligence. (2023). Análisis de participación y tamaño del mercado de agricultura vertical en México tendencias de crecimiento y pronósticos (2024-2029). Mordor Intelligence. Recuperado el 17 de noviembre de 2024, de <https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/mexico-vertical-farming-market-industry>

Mordor Intelligence. (2023). Análisis de participación y tamaño del mercado de agricultura vertical tendencias de crecimiento y pronósticos (2024-2029). Mordor Intelligence. Recuperado el 17 de noviembre de 2024, de <https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/vertical-farming-market>

Orozco Lab. (2023, abril 27). ¿Qué es el pH? ¿Cómo se mide? ¿Cuál es su importancia?. Recuperado el 30 de octubre de 2024 de <https://www.orozolab.info/que-es-el-ph-como-se-mide-cual-es-su-importancia>

SIAP. (2024). Panorama agroalimentario. 2018- 2024. Recuperado el 8 de octubre de 2024, de <https://www.gob.mx/agricultura/dgsiap/acciones-y-programas/panorama-agroalimentario-258035>

Piechowiak, M. (2024). The Full History of Vertical Farming: Who Invented It?. Vertical Farming Planet. Recuperado el 13 de noviembre de 2024, de <https://verticalfarmingplanet.com/the-full-history-of-vertical-farming-when-did-it-all-start/>

Pinedo-Guerrero, Z. H. (2020). Nanopartículas de SiO<sub>2</sub> para inducir tolerancia al estrés abiótico en plantas de tomate y pepino (Tesis doctoral en Ciencias en Agricultura Protegida). Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

Pizarro, V., Jana, C., Ibache, G., Contreras, C., Leris, L., Alfaro, V., & Instituto de Investigaciones Agropecuarias. (2019). Módulos Hidropónicos Sistema Raíz Flotante (SRF): diseño, construcción y costos. (Boletín INIA No. 86). Recuperado el 12 de noviembre de 2024, de

<https://biblioteca.inia.cl/server/api/core/bitstreams/76f4e862-c703-428b-a4cc-ae6623c77871/content>

- Proain. (2020). PRODUCCIÓN DE FRESA, REQUERIMIENTOS DE CLIMA y SUELO. ProainShop. Recuperado el 14 de octubre de 2024, de <https://proain.com/blogs/notas-tecnicas/produccion-de-fresa-requerimientos-de-clima-y-suelo>
- Sela, G. (2019, febrero 11). Los nutrientes de las plantas. Cropaia. Recuperado el 5 de noviembre de 2024, de <https://cropaia.com/es/blog/nutrientes-de-plantas/>
- Sela, G. (2021, julio 10). Sistemas hidropónicos. Cropaia. Recuperado el 7 de noviembre de 2024, de <https://cropaia.com/es/blog/sistemas-hidroponicos/>
- Sembralia. (2021, enero 22). Tipos de sustratos para el cultivo de plantas. Consejos y variedades para acertar con el sustrato. Recuperado el 25 de octubre de 2024, de <https://sembralia.com/blogs/blog/tipos-de-sustrato>
- Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA). (2024). MANEJO DE SUSTRATOS Y FERTILIZACIÓN EN AGRICULTURA URBANA. DIRECCIÓN DE FORMACIÓN PROFESIONAL. 16 p. Recuperado el 24 de octubre de 2024, de <https://zajuna.sena.edu.co/pdfs/campesena/Manejo%20de%20sustratos%20y%20fertilizaci%C3%B3n%20urbana%20-%20digital.pdf>
- SIAP. (2023, enero 7). Ninguna como la muy fresa. Recuperado el 13 de octubre de 2024, de <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/ninguna-como-la-muy-fresa>
- S&P. (2024, julio 22). Humedad relativa, específica y absoluta [incluye Carta Psicrométrica]. Recuperado el 15 de octubre de 2024, de <https://www.solerpalau.com/es-es/blog/humedad-relativa-especifica-absoluta/>
- Verde Compacto. (2024). Sobre nosotros. Recuperado el 17 de noviembre de 2024, de <https://verdecompacto.com/sobre-nosotros/>

Wallace-Springer, N. (2021, marzo 1). ¿Qué debes de saber acerca de la agricultura vertical? Recuperado el 01 de octubre de 2024 de <https://www.pthorticulture.com/es-us/centro-de-formacion/que-debes-de-saber-acerca-de-la-agricultura-vertical>