

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE BOTÁNICA



Efecto del Calcio en el Rendimiento y Calidad del Fruto en Fresa (*Fragaria x ananassa* Duch.) en Ambiente Controlado Bajo Diferentes Intensidades de Luz

Por:

EYMAR TOVAR GONZÁLEZ

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN AGROBIOLOGÍA

Saltillo, Coahuila, México

Junio, 2023

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE BOTÁNICA

Efecto del Calcio en el Rendimiento y Calidad del Fruto en Fresa (*Fragaria x ananassa* Duch.) en Ambiente Controlado Bajo Diferentes Intensidades de Luz

Por:

EYMAR TOVAR GONZÁLEZ

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN AGROBIOLOGÍA

Aprobada por el Comité de Asesoría:



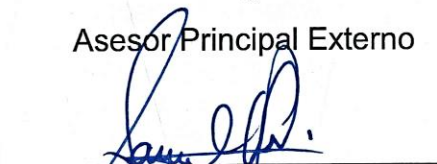
Dra. Daniela Alvarado Camarillo
Asesor Principal Interno



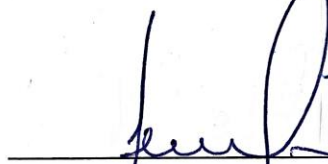
M.C. Adolfo Baylon Palomino
Asesor Principal Externo



Dr. Luis Alonso Valdez Aguilar
Coasesor



Dr. Víctor Samuel Peña Olvera
Coasesor



Dr. Jerónimo Landeros Flores
Coordinador Interino de la División de Agronomía



Saltillo, Coahuila, México

Junio, 2023

Derechos de Autor

Todo material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor de los Estados Unidos Mexicanos y pertenece al autor principal quien es el responsable directo y jura bajo protesta de decir verdad que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos: Reproducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (corta y pega); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio); comprar, robar o pedir prestados los datos o la tesis para presentarla como propia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin usar comillas; utilizar ideas o razonamientos de un autor sin citarlo; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, gráficas, mapas o datos sin citar al autor original y/o fuente. Así mismo tengo conocimiento de que cualquier uso distinto de estos materiales como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor. Por lo anterior nos responsabilizamos de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaramos que este trabajo no ha sido previamente presentado en ninguna otra institución educativa, organización, medio público o privado.

Autor principal



Eymar Tovar González

Nombre y Firma

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por brindarme la vida y dejarme vivir esta experiencia de culminar mi carrera profesional, guiándome en todo momento para tomar decisiones, dándome la fuerza y valentía para continuar en pie de lucha en este camino llamado vida.

A la Virgen de Guadalupe, quien ha cuidado de mí y de mis seres queridos en todo momento, dándome la fuerza para seguir ante cada adversidad.

A mi Alma Terra Mater, la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), por ser mi segundo hogar durante estos cinco años, abriéndome las puertas para desarrollarme profesionalmente y conocer grandes personas a lo largo de esta trayectoria.

A mis asesores

Dra. Daniela Alvarado Camarillo, quien tuve la fortuna de tenerla como profesora y después darme la oportunidad de trabajar en este proyecto de investigación, brindándome sus conocimientos y sobre todo su amistad incondicional.

Dr. Luis Alonso Valdez Aguilar, quien fue mi guía en este proyecto, brindándome sus conocimientos con paciencia y amabilidad, gracias por su tiempo dedicado y su amistad.

M.C. Adolfo Baylon Palomino, por su tiempo dedicado para brindarme sugerencias en la revisión del documento y ser parte del comité de asesoría de esta investigación.

Dr. Víctor Samuel Peña Olvera, por su apoyo, tiempo dedicado en la revisión del documento y ser parte del comité de asesoría de esta investigación.

Al M.C. Estanislado Antonio Sánchez Ortiz, por el gran equipo de trabajo conformado, siendo mi guía y brindándome sus conocimientos con paciencia y amabilidad.

Al Departamento de Botánica, donde compartí el mayor tiempo de estos cinco años de carrera profesional, teniendo a grandes profesores e investigadores quienes me brindaron sus conocimientos.

Al Dr. Antonio Juárez Maldonado, por haber sido mi tutor a lo largo de la carrera, apoyándome en todo momento a salir adelante, brindándome sus conocimientos en el aula y darme motivación en la vida.

Al Dr. Gregorio Castro Rosales del Departamento de Economía, por compartirme sus conocimientos en el aula y su apoyo incondicional en todo momento, gracias por sus consejos y su valiosa amistad.

A la familia Martínez Franco y Guillermo Encina, quienes me han apoyaron a lo largo de este camino y estaré profundamente agradecida siempre.

A mis amigos

Especialmente a **Juana Pedro y Joel Pájaro**, con los que compartí momentos de alegría y tristeza, pero siempre apoyándonos incondicionalmente saliendo adelante ante las adversidades, los admiro por su fortaleza y ganas de salir adelante, serán mis mejores amigos por el resto de la vida y lo mejor que me dejó la Narro ¡Los quiero mucho!

Ámbar Moreno, Yatzeli Díaz, Mitzy Ortiz, Raymundo Cuevas, Josué Rubio, Javier Cabrera y Juan Padilla, a los que considero grandes amigos, compartimos grandes anécdotas dentro y fuera de la UAAAN, gracias por su amistad y su apoyo incondicional, los llevo en mi corazón.

“Guardo un especial agradecimiento a todos aquellos que me han apoyado incondicionalmente, aportando un pedacito de su corazón, colaborando a hacer de mí, lo que soy ahora y lo que seré mañana”.

Dr. César Lozano

DEDICATORIA

A MIS PADRES

Francisco Tovar García y Teodora González Martínez

Por ser los mejores padres que Dios pudo darme, brindándome su amor, buenos valores y apoyo incondicional en todo momento, gracias por heredarme el gusto por el campo y la naturaleza. ¡Son lo mejor de mi vida!

A MIS HERMANOS

Vicente, Aracely, Semei y Nora Hilda

Por ser mis compañeros de vida, compartiendo días buenos y malos, sobre todo grandes anécdotas en familia y apoyándome en todo momento a tomar decisiones y no rendirme en mis momentos más difíciles.

A MI TÍO

Jesús González Martínez

Quien me ha acompañado en este camino, siendo un segundo padre brindándome sus consejos de vida, apoyándome en todo momento para ser una persona de buenos valores.

A MIS CUÑADOS

Pedro Lugo Méndez y Moisés Gassier Santiago

Quienes me han apoyado a lo largo del camino y hemos compartiendo grandes anécdotas en familia. Los aprecio mucho, gracias por ser parte de esta gran familia.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	IV
DEDICATORIA	VI
ÍNDICE DE CUADROS	X
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
RESÚMEN	XII
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivos	3
1.1.1 Objetivo general	3
1.1.2 Objetivos específicos	3
1.2. Hipótesis	3
II. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1 El cultivo de la fresa	4
2.2 Origen y distribución	4
2.3 Descripción botánica	4
2.3.1 Tallo	5
2.3.2 Hoja	5
2.3.3 Flor	5
2.3.4 Fruto	5
2.3.5 Sistema radicular	5
2.4 Clasificación taxonómica	6
2.5 Valor nutricional	6
2.6 Producción mundial	7
2.6.1 Principales países productores	7
2.7 Producción nacional	7
2.7.1 Principales estados productores	8
2.8 Cultivo sin suelo	8
2.8.1 Sustrato	8
2.8.2 Clasificación de los sustratos	8
2.8.3 Propiedades de los sustratos	9
2.9 Nutrición mineral en cultivos sin suelo	9
2.9.1 Calcio (Ca)	10
2.9.2 Potasio (K)	10

2.9.3	Nitrógeno (N)	11
2.10	Solución nutritiva (SN).....	12
2.10.1	pH	12
2.10.2	Conductividad eléctrica (CE)	12
2.10.3	Función de los elementos.....	13
2.11	Sistemas abiertos	14
2.11.1	Inmersión de raíces	15
2.11.2	Flotante	15
2.11.3	Acción capilar	15
2.12	Sistemas cerrados	15
2.12.1	NFT (<i>Nutrient film technique</i> , Técnica de la película nutritiva)	15
2.12.2	DFT (<i>Deep flow technique</i> , Técnica de flujo profundo)	16
2.12.3	Sistema de raíz flotante.....	16
2.12.4	Sistema de subirrigación	16
2.12.5	Aeroponía.....	16
2.13	Agricultura vertical	17
2.13.1	Origen.....	17
2.13.2	Agricultura vertical a nivel mundial	17
2.13.3	Agricultura vertical a nivel nacional.....	18
2.13.4	Impacto.....	19
2.13.5	Beneficio	20
2.13.6	Lámparas LED's (<i>Light emitting diodes</i>)	21
2.13.7	Humedad relativa (HR)	22
2.13.8	Temperatura.....	22
III.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	23
3.1	Sitio de estudio	23
3.2	Material vegetativo.....	23
3.3	Preparación del sustrato	23
3.4	Trasplante.....	24
3.5	Sistema de cultivo vertical de interior	24
3.6	Control de temperatura y humedad relativa.....	24
3.7	Tratamientos de lámparas LED's por niveles	25
3.8	Tratamientos de la solución nutritiva y fertilización.....	25
3.9	Riego.....	25
3.10	Forma de aplicación de los tratamientos	26

3.11	Manejo agronómico del cultivo	26
3.11.1	Podas	26
3.11.2	Control de plagas y enfermedades	27
3.12	Cosecha	27
3.13	Variables evaluadas	27
3.13.1	Variables de rendimiento	27
3.13.2	Variables agronómicas	28
3.13.3	Variables de calidad	28
3.13.4	Variables nutrimentales	29
3.14	Diseño experimental	29
IV.	RESULTADOS	30
4.1	Variables de rendimiento.....	30
4.1.1	Rendimiento del cultivo	30
4.1.2	Número de flores, frutos y coronas	32
4.2	Variables agronómicas.....	35
4.2.1	Longitud y diámetro del fruto	35
4.2.2	Peso fresco	36
4.2.3	Peso seco.....	40
4.2.4	Variables de calidad (Firmeza y sólidos solubles totales).....	41
4.3	Variables nutrimentales del fruto.....	43
V.	CONCLUSIONES.....	48
VI.	LITERATURA CITADA.....	49
6.1	Citas electrónicas	55

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Clasificación taxonómica de la planta de fresa.	6
Cuadro 2. Valor nutricional del fruto de fresa.	6
Cuadro 3. Propiedades que debe tener un buen sustrato en cultivos sin suelo.....	9
Cuadro 4. Beneficios de la agricultura vertical en el ámbito económico, ambiental y social.	20
Cuadro 5. Longitudes de onda del espectro según diversos autores.	21
Cuadro 6. Intensidades lumínicas de las lámparas LED´s por niveles.	25
Cuadro 7. Plaguicidas para el control de plagas.	27
Cuadro 8. Rendimiento de fresa (<i>Fragaria x ananassa</i> Duch) en condiciones de ambiente controlado con uso de lámparas LED a diferentes intensidades lumínicas en interacción con distintos niveles de Ca en la solución nutritiva.	30
Cuadro 9. Número de flores, frutos y coronas del cultivo de fresa (<i>Fragaria x ananassa</i> Duch) en condiciones de ambiente controlado con uso de lámparas LED a diferentes intensidades lumínicas en interacción con distintos niveles de Ca en la solución nutritiva.	32
Cuadro 10. Longitud y diámetro del fruto de fresa (<i>Fragaria x ananassa</i> Duch) en condiciones de ambiente controlado con uso de lámparas LED a diferentes intensidades lumínicas en interacción con distintos niveles de Ca en la solución nutritiva.....	36
Cuadro 11. Peso fresco de la parte aérea (hoja/tallo), flor/fruto, corona y raíz de fresa (<i>Fragaria x ananassa</i> Duch) en condiciones de ambiente controlado con uso de lámparas LED a diferentes intensidades lumínicas en interacción con distintos niveles de Ca en la solución nutritiva.....	37
Cuadro 12. Peso seco de la parte aérea (hoja/tallo), flor/fruto, corona y raíz de la fresa (<i>Fragaria x ananassa</i> Duch) en condiciones de ambiente controlado con uso de lámparas LED a diferentes intensidades lumínicas en interacción con distintos niveles de Ca en la solución nutritiva.....	40
Cuadro 13. Firmeza y sólidos solubles totales del fruto de fresa (<i>Fragaria x ananassa</i> Duch) en condiciones de ambiente controlado con uso de lámparas LED a diferentes intensidades lumínicas en interacción con distintos niveles de Ca en la solución nutritiva.	42
Cuadro 14. Concentración nutrimental de Ca ²⁺ , K ⁺ y NO ₃ ⁻ en fruto de fresa (<i>Fragaria x ananassa</i> Duch) en condiciones de ambiente controlado con uso de lámparas LED a diferentes intensidades lumínicas en interacción con distintos niveles de Ca en la solución nutritiva.	44

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del Laboratorio de Agricultura Vertical en el Departamento de Ciencias del Suelo de la UAAAN.	23
Figura 2. Efecto del balance de las lámparas LED a diferentes intensidades lumínicas en el rendimiento de fruto de fresa (<i>Fragaria x ananassa</i> Duch) en un sistema vertical, en función de la concentración de Ca en la solución nutritiva.	31
Figura 3. Efecto del balance de las lámparas LED a diferentes intensidades lumínicas en el número de flores del cultivo de fresa (<i>Fragaria x ananassa</i> Duch) en un sistema vertical, en función de la concentración de Ca en la solución nutritiva.	33
Figura 4. Efecto del balance de las lámparas LED a diferentes intensidades lumínicas en el número de frutos del cultivo de fresa (<i>Fragaria x ananassa</i> Duch) en un sistema vertical, en función de la concentración de Ca en la solución nutritiva.	34
Figura 5. Efecto del balance de las lámparas LED a diferentes intensidades lumínicas en el número de coronas del cultivo de fresa (<i>Fragaria x ananassa</i> Duch) en un sistema vertical, en función de la concentración de Ca en la solución nutritiva.	35
Figura 6. Efecto del balance de las lámparas LED a diferentes intensidades lumínicas en el peso fresco aéreo (hoja y tallo) de la planta de fresa (<i>Fragaria x ananassa</i> Duch) en un sistema vertical, en función de la concentración de Ca en la solución nutritiva. .	38
Figura 7. Efecto del balance de las lámparas LED a diferentes intensidades lumínicas en el peso fresco del flor y fruto de la planta de fresa (<i>Fragaria x ananassa</i> Duch) en un sistema vertical, en función de la concentración de Ca en la solución nutritiva.	39
Figura 8. Efecto del balance de las lámparas LED a diferentes intensidades lumínicas en el peso fresco de la raíz de la planta de fresa (<i>Fragaria x ananassa</i> Duch) en un sistema vertical, en función de la concentración de Ca en la solución nutritiva.	39
Figura 9. Efecto del balance de las lámparas LED a diferentes intensidades lumínicas en sólidos solubles totales del fruto de fresa (<i>Fragaria x ananassa</i> Duch) en un sistema vertical, en función de la concentración de Ca en la solución nutritiva.	42
Figura 10. Efecto del balance de las lámparas LED a diferentes intensidades lumínicas en la concentración nutrimental de Ca^{2+} en el fruto de fresa (<i>Fragaria x ananassa</i> Duch) en un sistema vertical, en función de la concentración de Ca en la solución nutritiva. .	45
Figura 11. Efecto del balance de las lámparas LED a diferentes intensidades lumínicas en la concentración nutrimental de K^{+} en el fruto de fresa (<i>Fragaria x ananassa</i> Duch) en un sistema vertical, en función de la concentración de Ca en la solución nutritiva.	45
Figura 12. Efecto del balance de las lámparas LED a diferentes intensidades lumínicas en la concentración nutrimental de NO_3^{-} en el fruto de fresa (<i>Fragaria x ananassa</i> Duch) en un sistema vertical, en función de la concentración de Ca en la solución nutritiva. .	46

RESÚMEN

El presente trabajo de investigación se llevó a cabo en el Laboratorio de Agricultura Vertical en Ambiente Controlado del Departamento de Ciencias del Suelo, ubicado dentro de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, con dirección Calzada Antonio Narro 1923, Buenavista, C.P., 25315, Saltillo, Coahuila, México. El objetivo de la investigación fue determinar la concentración adecuada del calcio (Ca) en la solución nutritiva (SN) y la intensidad lumínica para incrementar la calidad del fruto de fresa.

Las plántulas de fresa fueron establecidas en un sistema vertical bajo un ambiente controlado, donde se pudo manipular la temperatura, humedad relativa, luminosidad y el riego. Durante el ciclo del cultivo fueron evaluados los tratamientos de intensidad lumínica de 250, 300 y 600 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ utilizando lámparas LED's, así también las concentraciones de 7, 9 y 11 meq/L de Ca en la SN con las que fueron irrigadas las plantas.

Se estableció un diseño experimental de bloques completos al azar con arreglo factorial 3 x 3. Se realizó un análisis de varianza y una prueba de comparación de medias de acuerdo a la prueba de Duncan ($p < 0.05$), utilizando el programa estadístico de *Statistical Analysis System* (SAS) versión 9.0.

En las variables de rendimiento, calidad y concentración nutrimental de los frutos de fresa cosechados, se encontró interacción del efecto del balance de la intensidad lumínica en función de la concentración de Ca en la SN, llegando a concluir que este cultivo de porte bajo se adapta a sistemas verticales con una intensidad lumínica de 300 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y una concentración de 11 meq/L de Ca en la SN para tener mayor rendimiento del cultivo, alto contenido de sólidos solubles totales y concentración de nitratos (NO_3^-) en el fruto.

Palabras clave: Agricultura vertical, ambiente controlado, intensidad lumínica, rendimiento, concentración y calcio.

I. INTRODUCCIÓN

México es el país que ocupa la cuarta posición, con un promedio de 542,891 t, a nivel mundial en la producción de fresa (*Fragaria x ananassa* Duch) pero es el primer lugar en exportación de frutillas (SIAP, 2022), dentro de las cuales se ubica a la fresa (*Fragaria x ananassa* Duch). El cultivo de la fresa es de un alto valor económico en México, el cual junto con China y Estados Unidos de América aportan el 59% de la producción total en el mundo (FAO, 2017). Comparado con hace 40 años, la superficie cultivada con fresa en México creció en 270% y dentro de los principales estados productores se encuentran: Michoacán con 329,184 t (60.08%), Baja California con 105,403 t (16.87%) y Guanajuato con 97,499 t (18.29%), constituyendo en conjunto el 92.25% de la producción nacional (SIAP, 2022).

La fresa se cultiva bajo sistemas de agricultura protegida, siendo la producción en macro túnel el sistema más preponderante, aunque también se produce bajo casa sombra e invernadero manejando sistemas de producción convencionales u orgánicos dentro de los cuales se emplean tecnologías como macro y micro túneles e hidroponía (Salazar *et al.*, 2017). Bajo estas condiciones se tiene un mejor manejo y control de la temperatura e incidencia de plagas y enfermedades, lo cual permite que existan mejores rendimientos y calidad del producto (Rocha, 2014).

Para mantener la posición de México como líder mundial en este cultivo de fresa es necesario elevar los estándares de calidad de la fruta, que permitan diversificar los mercados por lo que se requiere de instalaciones de mayor tecnología, ya que en estas es posible reducir la incidencia de plagas y enfermedades, así como los daños por efecto del clima.

Los sistemas de producción en interior con iluminación artificial son una alternativa económicamente factible para producir alimentos (Kozai, 2016). Una ventaja de estos sistemas es que las condiciones ambientales pueden ser controlados, permitiendo la producción de cultivos sin ser afectados por el medio ambiente (Yoshida *et al.*, 2016). La fresa es un cultivo que puede adaptarse a

este sistema de producción ya que el porte bajo de la planta, así como sus necesidades de iluminación se pueden abastecer (Yoshida *et al.*, 2016).

La luz es el factor ambiental que más afecta el crecimiento de las plantas, ya que influye directamente en la fotosíntesis y en el rendimiento. La tecnología LED (*light emitting diodes*) para la iluminación de cultivos permite mantener altas tasas fotosintéticas en condiciones de cultivos de interior, con lo cual se promueve el crecimiento y rendimiento (Hidaka *et al.*, 2013). Dentro de los atributos de la luz, la intensidad es un parámetro de gran importancia ya que un exceso o deficiencia tiene repercusiones en el crecimiento y rendimiento de las plantas. Maeda y Ito (2020) demostraron que la fresa cultivada en condiciones de iluminación LED con una densidad de flujo de fotones arriba de $300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ producen el mayor rendimiento de fruto, lo cual es incluso más favorable si esto se combina con un fotoperiodo de 24 horas, mientras que con una densidad de flujo de $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ se presenta una reducción significativa en el rendimiento.

Un aspecto importante es la nutrición de los cultivos. El Ca es un elemento que la fresa demanda ya que en condiciones de deficiencia se presentan malformaciones de los frutos que los dejan fuera del mercado. El Ca en fresa debe ser absorbido desde la etapa del crecimiento ya que contribuye a regular la fuerza y grosor de la estructura de la pared celular (Trejo-Téllez y Gómez-Merino, 2014) además, brinda mayor peso, tamaño, firmeza y resistencia a la fruta para la vida de anaquel y minimiza la presencia de plagas y enfermedades, alargando la vida en poscosecha de la fresa (Khalil y Hammoodi, 2021). La deficiencia de Ca en fresa, se presenta mayormente en las hojas nuevas, en las que las puntas se deforman, visualizándose enchinadas y con aspecto de quemadura color marrón (Espino *et al.*, 2017)

Por lo anterior se propone el presente trabajo de investigación para determinar el efecto de la concentración del Ca en la SN en interacción con la intensidad lumínica en la producción y calidad de los frutos de plantas de fresa desarrolladas en un sistema de agricultura vertical en interior con iluminación mediante lámparas LED.

1.1. Objetivos

1.1.1 Objetivo general

Determinar la concentración óptima del calcio en la solución nutritiva y la intensidad lumínica para incrementar el rendimiento y la calidad del fruto de fresa.

1.1.2 Objetivos específicos

Determinar la calidad y rendimiento de fruto bajo diferentes concentraciones de calcio en la solución nutritiva.

Definir el efecto de diferentes niveles de intensidad lumínica en el cultivo de fresa bajo agricultura vertical en ambiente controlado.

1.2. Hipótesis

La concentración óptima de calcio en la solución nutritiva estará en función de la intensidad lumínica.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 El cultivo de la fresa

La fresa se encuentra dentro del grupo de las frutillas, también conocidas como berries, este fruto contiene una gran cantidad de fibra, vitaminas, minerales y antioxidantes; brinda energía, salud, juventud, además de que es bajo en calorías y nulo en colesterol (SADER, 2019).

A nivel mundial, la fresa se ha reconocido por su exquisito sabor dulce, coloración roja y por los diferentes usos que la industria le ha dado, para consumirlo en fresco, congelado y procesado como refrescos, licores, tés, postres, dulces, mermeladas y helados (SADER, 2022).

2.2 Origen y distribución

El origen de esta frutilla se dio en el siglo XVII, por la introducción a Europa de dos especies: *Fragaria chiloensis* (originaria de Chile) y *F. virginiana* (originaria de Estados Unidos), la cruce de ambas dio el resultado de un híbrido de fruto grande, dulce y esencia agradable (Edger *et al.*, 2019).

Según Muñoz (2017) menciona que Duchesse en 1766 le da el nombre de fresa-piña al resultado de esta cruce, para posteriormente nombrarlo *Fragaria x ananassa* Duch., nombre con el que se conoce actualmente en todo el mundo y se distribuye principalmente en las zonas cálidas pertenecientes a los países del hemisferio norte.

2.3 Descripción botánica

La fresa, es una planta herbácea, perenne, bajo porte y un follaje normal de hojas compuestas; su reproducción puede ser sexual o asexual, esto mediante semillas o vegetativamente, por medio de la formación de estolones y la separación de coronas (SIAP, 2018).

2.3.1 Tallo

Dispone de un eje cónico conocido como corona, formando yemas axilares que desarrollan tallos rastreros conocidos como estolones, estos son ramificaciones largas, conformados por dos entrenudos de hasta 20 cm de largo y una yema terminal que conformará a una nueva planta (Bolda *et al.*, 2015).

2.3.2 Hoja

Las hojas están compuestas por tres folíolos, crecen en forma espiral de 8 a 12 días durante toda la etapa de crecimiento; tienen varias funciones como la participación en el proceso de fotosíntesis, respiración y transpiración (Bolda *et al.*, 2015).

2.3.3 Flor

Las flores están organizadas en cimas de pétalos redondeados color blanco, las cuales se originan de las yemas axilares, con un cáliz de protección de sépalos verdes parecidos a hojas, cuentan con un pistilo y diversos estambres amarillos (SAGARPA, 2017). Se desarrollan flores primarias y secundarias, por lo que se convierten en frutos en diferentes tiempos y las primeras suelen ser las primarias logrando un mayor tamaño (Bolda *et al.*, 2015).

2.3.4 Fruto

El fruto se forma sobre un receptáculo pulposo, con la unión de varios carpelos pequeños y secos; su color es rojizo de aroma intenso y muy peculiar, con un sabor que va desde extremadamente ácido a dulce (SIAP, 2023).

2.3.5 Sistema radicular

El sistema radicular de la planta es de tipo fasciculado, está compuesto de raíces y raicillas de color claro, las primeras tienen un ciclo de vida corto, mientras que las demás llegan a ser perennes (SAGARPA, 2017).

2.4 Clasificación taxonómica

La clasificación taxonómica de la fresa se muestra en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Clasificación taxonómica de la planta de fresa.

Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Magnoliopsida
Orden	Rosales
Familia	Rosaceae
Género	<i>Fragaria</i>
Especie	<i>Fragaria x ananassa</i> D.

Fuente: EcuRed, 2019.

2.5 Valor nutricional

El valor nutricional de la fresa se muestra en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Valor nutricional del fruto de fresa.

Valor por cada 100 g	
Calorías	32 kcal
Agua	91 g
Carbohidratos	5.5 g
Azúcares	4.9 g
Fibra	2.0 g
Proteínas	0.7 g
Grasas	0.3 g
Ceniza	0.4 g
Vitamina C	58.8 mg
Potasio	153 mg
Fósforo	24 mg
Calcio	16 mg
Magnesio	13 mg
Sodio	1.0 mg
Hierro	0.4 mg
Manganeso	0.4 mg
Zinc	0.1 mg
Cobre	0.05 mg
Colesterol	0 mg

Fuente: USDA, 2019.

2.6 Producción mundial

La fresa tiene una gran demanda en todo el mundo, sobre todo en países desarrollados, siendo los principales China y Estados Unidos; en conjunto con todos los países productores en el 2021 cultivaron 384,688 ha del cultivo de fresa (SIAP, 2022).

Se calcula que para el año 2030, la demanda de producción mundial de fresa aumentará de 1,739.12 a 2,388.03 millones de toneladas, por lo que expandirá un 34.44 % (SAGARPA, 2017).

2.6.1 Principales países productores

A nivel mundial, China es el principal productor de fresa, con una producción en el 2021 de 3.3 millones de toneladas. México ocupa la cuarta posición, con un promedio de 542,891 t y la segunda posición en exportación mundial, destinando gran parte de su producción a Estados Unidos y Canadá (SIAP, 2022).

2.7 Producción nacional

El volumen de la producción nacional del 2012 al 2021 ha ido en aumento en los últimos años con un promedio de 533,000 t, pero en el 2020 hubo una descendencia a causa de los bajos rendimientos por el COVID-19, por lo que aún en el 2021 no se ha podido recuperar el rendimiento teniendo 543,000 t en comparación con el 2019 donde se produjo 861,000 t, por lo que se obtuvo un 36.94% menos de producción (SIAP, 2022).

En México el incremento de producción de fresa para el 2030 sería del 26.44%, por lo que habrá un aumento de 468.25 a 592.03 millones de toneladas y se considera que con esta cifra el país pueda cubrir la demanda a nivel local e internacional sin tener problemas por la seguridad alimentaria de esta frutilla (SAGARPA, 2017).

2.7.1 Principales estados productores

Entre los principales estados productores de fresa en México se encuentran: Michoacán (60.08%), Guanajuato (18.29%) y Baja California (16.87%), generando un 95.25% del valor de la producción del país, el 4.75% restante lo realizan los demás estados productores, ya que la mayor demanda de esta frutilla se encuentra en los meses de abril a junio (SIAP, 2022).

2.8 Cultivo sin suelo

Es un sistema agrícola en el cual se produce sin la necesidad de utilizar suelo, este se reemplaza por sustratos orgánicos e inorgánicos, sin embargo, también puede cultivarse directamente en la solución nutritiva bajo diferentes sistemas, permitiendo el correcto crecimiento de las plántulas (Fussy y Papenbrock, 2022).

2.8.1 Sustrato

Un sustrato es un material distinto al suelo, puede ser de origen orgánico e inorgánico, puede ser colocado en contenedores en forma de mezcla o natural, modificando sus propiedades para facilitar el anclaje del sistema radicular de la planta, permitiendo su óptimo desarrollo (Aquino, 2015).

2.8.2 Clasificación de los sustratos

Materiales orgánicos: pueden ser de origen natural, como la turba y productos derivados de actividades agrícolas como el aserrín, la paja de cereales, fibra de coco, cascarilla de arroz, el bagazo de caña y agave (Beltrano y Gimenez, 2015).

Materiales inorgánicos: pueden ser de origen natural, a los cuales no es indispensable realizar una fabricación, como la grava, arena, tezontle y piedra pómez. Algunos materiales que han sido modificadas industrialmente sus características, serían la arcilla, vermiculita, lana de roca y perlita (Beltrano y Gimenez, 2015).

2.8.3 Propiedades de los sustratos

Los sustratos empleados para sistemas de cultivos sin suelo deben reunir ciertas propiedades, las cuales se muestran en el Cuadro 3.

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

Propiedades de un sustrato	
Generales	<ul style="list-style-type: none">• Facilidad de compra en el mercado y bajo precio.• Peso ligero y facilidad de manejo.
Físicas	<ul style="list-style-type: none">• Espacio poroso total (>85%).• Capacidad de aireación (20-30%).• Alta capacidad de retención del agua.• Estructura permanente.• Tamaño de partículas homogéneas (0.25-2.5 mm).• Baja densidad aparente (<0.4 g/cm³).
Químicas	<ul style="list-style-type: none">• CIC variable (>20 meq/100 g).• Disponibilidad de los nutrientes.• Baja salinidad.• pH (5.5-6.8).• Eficiente relación C/N (<=40).
Biológicas	<ul style="list-style-type: none">• Amigable con el medio ambiente.• Alta velocidad de descomposición.• Actividad reguladora del crecimiento.• Libre de plagas y semillas de malas hierbas.

Fuente: Beltrano y Gimenez, 2015.

2.9 Nutrición mineral en cultivos sin suelo

Fussy y Papenbrock (2022) mencionan que para la nutrición mineral en cultivos sin suelo debe considerarse dos aspectos importantes: la proporción de nutrientes por parte del sistema y la reacción de las plantas ante la nutrición.

Cada elemento cumple con funciones específicas en las plantas, los asimilan y absorben de forma diferente, ninguno puede ser reemplazado por otro (Goswami y Yadav, 2022).

Las técnicas de cultivo sin suelo permiten proporcionarle a la planta la cantidad de nutrientes y agua que necesita por etapa fenológica, siendo posible esto por

medio de la modificación de la solución nutritiva, ya que dichos elementos se encuentran en forma iónica y permite su fácil absorción, evitando la búsqueda o competencia de nutrientes como ocurre en el suelo (Swain *et al.*, 2021).

2.9.1 Calcio (Ca)

El Ca es un elemento de baja movilidad en la planta, lo asimila como Ca^{2+} e integra del 1.0% al 2.2% de la planta de fresa (Bolda *et al.*, 2015). Pandey (2015) menciona que la absorción y transportación de Ca es un movimiento pasivo dentro de la planta, se realiza por vía xilema con ayuda del movimiento del agua, iniciando desde la raíz hasta el ápice de las hojas.

Las funciones del Ca en la planta de fresa son de suma importancia, debe ser absorbido desde la etapa del crecimiento, ayuda a regular la fuerza y grosor de la estructura de la pared celular (Trejo-Téllez y Gómez-Merino, 2014). Además, brinda mayor peso, tamaño, firmeza y resistencia a la fruta para la vida de anaquel, minimiza la presencia de plagas y enfermedades para alargar la poscosecha de la fresa (Khalil y Hammoodi, 2021). La deficiencia de Ca en fresa, se presenta mayormente en las hojas nuevas, en las que las puntas se deforman, visualizándose enchinadas y con aspecto de quemadura color marrón (Espino *et al.*, 2017) se desintegra la pared celular y se destruyen los tejidos involucrados como el peciolo, por lo que esto también ocurre en las hojas viejas (Pandey, 2015).

Las altas concentraciones de Ca en fresa, afecta principalmente al fruto y a las hojas jóvenes, los frutos suelen ser flexibles, las hojas corrugadas y los bordes con tonalidad marrón (Dixon *et al.*, 2019). También causa la baja disponibilidad elementos como el potasio (K) y magnesio (Mg), esto se verá reflejado en la marchitez de las hojas nuevas (Morales y Riquelme, 2017).

2.9.2 Potasio (K)

El K es un elemento móvil dentro de la planta, lo asimila como K^+ e integra del 1.3 % a 1.8% a la planta de fresa (Bolda *et al.*, 2015). Pandey (2015) menciona

que la transportación de K es un movimiento activo dentro de la planta, se realiza por vía xilema y floema con la ayuda del movimiento del agua se distribuye de donde hay una alta concentración a una menor.

El K es el elemento principal en la planta de fresa, es fundamental para el crecimiento y desarrollo del cultivo, lo demanda en la etapa de crecimiento y en mayores cantidades en la etapa de fructificación, por lo que estimula una pronta maduración, generando mejor tamaño, aroma, acidez y azúcar (Khalil y Hammoodi, 2021).

La deficiencia de K genera un bajo rendimiento en el cultivo de fresa, presentándose con tallos débiles, hojas con poco vigor, cloróticas, pasando a tener necrosis en los bordes y puntas (Dixon *et al.*, 2019). También afecta la calidad del fruto, menor coloración, maduración heterogénea, pH bajo y sin aroma (Espino *et al.*, 2017).

Según Dixon *et al.*, (2019) las altas concentraciones de K en fresa, hace menor la disponibilidad de algunos macronutrientes como el Mg y Ca. Espino *et al.*, (2017) mencionan que también perjudica significativamente el fruto, afectando su calidad generando pudrición apical y menor firmeza del fruto.

2.9.3 Nitrógeno (N)

El N es un elemento móvil dentro de la planta, lo asimila en mayor cantidad como NO_3^- y en menor como NH_4^+ e integra del 2.4% al 4% a la planta de fresa (Bolda *et al.*, 2015).

Ohyama (2010) menciona que la planta puede tomar el N del suelo, ya que estará disponible como compuestos inorgánicos (amonio y nitrato), dependiendo de la especie cultivada, será la forma en que prefiera tomarlo; para el caso de la fresa, el mecanismo de transporte será por vía xilema, comenzará tomando el nitrato por la raíz, reduciendo una cantidad a nitrito, lo restante llegará a los demás órganos y se convertirá en amonio en las hojas.

Las funciones del N en la planta de fresa, interviene en el número de hojas, tallos, brotes y calidad del fruto (Bolda *et al.*, 2015) sus funciones principales son de tipo osmótico y estructural, por lo que es importante para la síntesis de clorofila y la fotosíntesis (Espino *et al.*, 2017).

La deficiencia de N se visualiza principalmente en las hojas viejas y después en las jóvenes, cambiando sus bordes de color anaranjado a púrpura, también afecta en una baja producción, manifestándose en el acortamiento, pocos brotes, limitada floración, frutos pequeños y ácidos (Espino *et al.*, 2017).

Un exceso de N convierte a la planta en suculenta, teniendo mayor desarrollo aéreo, menos partes leñosas y poco sistema radical; en los frutos su maduración se retrasa, pierde su valor nutricional, algunos frutos tienen gruesa la piel y la planta está más expuesta a enfermedades (Pandey, 2015).

2.10 Solución nutritiva (SN)

Es una mezcla de sales minerales diluidas en el agua, por lo que los elementos se ionizan para poder ser absorbidos por las raíces de la planta, logrando su desarrollo y crecimiento adecuado (Beltrano y Gimenez, 2015).

2.10.1 pH

El pH en la SN determina la disponibilidad de nutrientes para que la planta los absorba, los valores se encuentran del 1 a 14, pero el permitido en cultivos sin suelo es de 5.8 a 6.5. Las deficiencias o toxicidades de los elementos en las plantas serán más evidentes, cuando el pH este fuera del rango permitido (Goswami y Yadav, 2022).

2.10.2 Conductividad eléctrica (CE)

La CE indica la salinidad de la SN, se utiliza el conductímetro y la unidad de medida más común es dS/m^{-1} (IICA, 2017). El rango permitido para cultivos sin

suelo es de 1.5 a 2.5 dS/m⁻¹, esto cambia dependiendo de la especie cultivada, pero para la planta de fresa es de 1.0 y 1.8 dS/m⁻¹ (Abdallah, 2015).

Una elevada CE no permite que los elementos sean absorbidos a consecuencia de la presión osmótica, por el contrario, cuando es baja afecta la productividad de las plantas (Goswami y Yadav, 2022).

2.10.3 Función de los elementos

Según Swain *et al.*, (2021) para el desarrollo y crecimiento de las plantas, se necesitan 17 elementos esenciales, estos se dividen en macro y micronutrientes.

Macronutrientes

Según Aquino (2015) el carbono (C), hidrógeno (H) y oxígeno (O) en comparación con los demás nutrientes no se introducen en la SN, por lo que las plantas toman el C del CO₂ del aire, el H y O lo adquieren del agua.

Nitrógeno (N): implicado en la formación de ácidos nucleicos, aminoácidos y proteínas; maximiza la eficiencia de productividad de estolones, mayor vigor en las hojas y le da el color verde (Pandey, 2015).

Fósforo (P): promueve el desarrollo de la floración, sistema radicular, en el metabolismo energético y el proceso de fotosíntesis (Aquino, 2015).

Potasio (K): ajusta la apertura y cierre de estomas, la absorción de CO₂, mejora la calidad del fruto (firmeza y el sabor) incrementa la productividad y resistencia a condiciones de estrés hídrico (Morales y Riquelme, 2017).

Calcio (Ca): promueve el desarrollo del sistema radicular, mejora la calidad para el cuaje y firmeza del fruto, resiste a la presencia de plagas y enfermedades (IICA, 2017).

Magnesio (Mg): nutriente principal de la clorofila, le da el color verde a la hoja, participa en la fotosíntesis y síntesis de las proteínas (Aquino, 2015). Contribuye con el P para la formación de semillas y ayuda a que otros elementos puedan ser absorbidos (Morales y Riquelme, 2017).

Azufre (S): participa en la formación de la clorofila, aumenta el desarrollo del sistema radicular, formación de semillas y en combinación con el K mejora la calidad del fruto (Morales y Riquelme, 2017).

Micronutrientes

Hierro (Fe): componente que ayuda a la estructura de las moléculas, participa en la síntesis de proteínas y ADN, cataliza la síntesis de la clorofila y ayuda absorber otros nutrientes (Pandav *et al.*, 2016).

Manganeso (Mn): en combinación con el Fe promueve la formación de proteínas y clorofila (Aquino, 2015).

Cobre (Cu): participa en los procesos bioquímicos de la planta, promueve la formación de enzimas, ayuda al Fe en la síntesis de la clorofila y participa en el proceso de la fotosíntesis (Harris y Lavanya, 2016).

Zinc (Zn): interviene en el metabolismo del N, activa la enzima glutámato deshidrogenasa para la asimilación del NH_4^+ y aumenta la formación de las flores (IICA, 2017).

Boro (B): participa en la polinización de las flores y aumenta el tamaño del fruto (Morales y Riquelme, 2017).

Cloro (Cl): maximiza la potencia osmótica de la célula, promueve el aumento del sistema radicular y previene la presencia de microbios (Pandey, 2015).

Molibdeno (Mo): elemento clave para asimilar los nitratos, interviene en la síntesis de proteínas y es participante en la absorción del Fe (Sidhu *et al.*, 2019).

Níquel (Ni): se involucra en la enzima ureasa para el metabolismo del N y controla la senescencia (Pandey, 2015).

2.11 Sistemas abiertos

Según Fussy y Papenbrock (2022) en estos sistemas el agua sobrante del riego que se aplica no se reincorpora al sistema, solamente se drena produciendo

contaminación por los nitratos y fosfatos, por lo que implica un mayor gasto de agua y fertilizantes.

2.11.1 Inmersión de raíces

Técnica donde las plantas se cultivan en recipientes de poco espacio con SN, por lo que se les da escaso mantenimiento y la SN se reemplaza solamente cuando la cantidad de nutrientes, pH y CE disminuyen (Goswami y Yadav (2022)).

2.11.2 Flotante

Técnica donde las plantas estarán en recipientes anclado en los orificios de una lámina de poliestireno flotando sobre la SN, una ventaja es que no depende de la energía eléctrica para la producción (Goswami y Yadav (2022)).

2.11.3 Acción capilar

Técnica apropiada para plantas ornamentales de interior, utilizando contenedores de poca profundidad con sustrato para soporte, la SN llegará al sustrato por acción capilar, aunque en ocasiones existirán problemas de aireación por el tipo de sustrato que se utilice (Goswami y Yadav (2022)).

2.12 Sistemas cerrados

Estos tipos de sistemas son amigables con el medio ambiente, el sobrante del riego que se aplica se reincorpora al sistema, por lo que se adecúa la SN para su recirculación; estos sistemas dependen de la energía eléctrica, por lo que puede ser un inconveniente, sin embargo, los nutrientes y el agua se utilizan en menores cantidades (Fussy y Papenbrock, 2022).

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

Método donde se cultivan hortalizas sin sustrato, utilizando tubos de policloruro de vinilo (PVC) circulares o cuadrados, donde una delgada película de SN es

regada desde lo más alto del canal para fluir por gravedad y esté disponible para las raíces para finalmente regresar al depósito de la solución (SIAP, 2016).

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

En este sistema las plantas se encuentran en recipientes protegidos por una red, donde las raíces estarán en contacto con la SN, que estará fluyendo a través de tubos de PVC, teniendo una pendiente de caída utilizando una bomba o por gravedad (Goswami y Yadav, 2022).

2.12.3 Sistema de raíz flotante

Este sistema es muy práctico, se cultivan hortalizas en cajas de plástico o madera, las raíces de las plantas quedarán sumergidas en la SN, mientras que la parte superior de la planta se sostiene en una lámina de poliestireno que estará flotando sobre el nivel de la solución (SIAP, 2016).

2.12.4 Sistema de subirrigación

Ferrarezi *et al.*, (2015) describen a este sistema como una técnica que permite cultivar plantas utilizando sustrato en recipientes, la SN será absorbida por medio de acción capilar del sustrato llegando hasta las raíces brindándole lo que la planta necesite.

2.12.5 Aeroponía

Método donde se cultivan hortalizas de hojas de bajo porte, se trasplantan en pequeños orificios en una lámina de poliestireno, quedando las raíces suspendidas en el aire para ser irrigadas con la SN sin ningún sustrato de por medio (Lakhiar *et al.*, 2018).

2.13 Agricultura vertical

La agricultura vertical en ambiente controlado es un método que permite producir plántulas en capas orientadas verticalmente, tomando en cuenta técnicas de cultivo sin suelo controlando los factores ambientales como temperatura, luz, aireación y humedad relativa; así también el agua, sustratos y la fertilización (Mir *et al.*, 2022).

2.13.1 Origen

Van Gerrewey *et al.*, (2021) mencionan que Gilbert Ellis en 1915 dio a conocer el concepto de agricultura vertical, recalcó que la hidroponía es de gran utilidad para cultivar en un ambiente controlado, por lo que se tendrán beneficios e impactos ambientales, económicos y sociales. Según Kozai y Niu (2020), en 1930 William Frederick Gericke creó una guía, brindando las herramientas para la hidroponía para cultivar sin suelo, por lo que esto favoreció a la agricultura vertical

El Ing. Othmar Ruthner en 1960 comenzó a crear varios edificios, los utilizó como un invernadero con hidroponía, aunque no tuvo el éxito que él esperaba; con el paso del tiempo el valor del término agricultura vertical descendió por la gran inversión económica y mano de obra (Kleszcz *et al.*, 2020).

Van Gerrewey *et al.*, (2021) mencionan que Ake Olsson en 1980 modificó el término de agricultura vertical y lo dio a conocer como un sistema más apropiado para producir en zonas urbanas. Para el 2000 Dickson Despommier renovó el concepto y lo dio a conocer como una alternativa para la seguridad alimenticia.

2.13.2 Agricultura vertical a nivel mundial

La agricultura vertical a nivel mundial es un sistema de producción que ha cautivado la atención de la población, sobre todo por ser la esperanza de la seguridad alimenticia en los próximos años (Butturini y Marcelis, 2020).

Para el 2050 se estima que la población mundial tendrá un aumento de 7.300 a 9.800 millones de personas en el planeta, por lo que se tendrá que producir un 50% más de los alimentos para abastecer a la población (FAO, 2017).

A principios del Siglo XXI, eran muy pocas las producciones bajo sistemas verticales controlados, esta nueva forma de producción hizo que varios países comenzaran rápidamente a instalarse en el mercado (Lira, 2022). Actualmente países que producen y comercializan alimentos bajo sistema controlado son: Japón, Corea del Sur, Estados Unidos, Taiwán, China, Singapur, Panamá y Holanda (Mir *et al.*, 2022).

2.13.3 Agricultura vertical a nivel nacional

Según Mondor Intelligence (2023) en los últimos años México ha tenido una notable caída en la producción de alimentos bajo invernadero y a campo abierto, esto debido al poco suelo fértil, agua disponible y al COVID-19; por lo que la agricultura vertical ha llegado para asegurar la fuente alimenticia.

Dos empresas, han comenzado a colaborar en la agricultura vertical en México: Verde Compacto, ubicada en el Tecnológico de Monterrey en León Guanajuato, México (Verdecompacto, 2023). Karma Verde Fresh (KfV), ubicada en dos estados en Monterrey, Nuevo León en la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) y en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN) en Saltillo, Coahuila (KfV, 2023). Algunos trabajos de investigación han generado publicaciones científicas en México, actualmente se conocen algunas por la Universidad Autónoma de Chapingo (UACH) y la UAAAN.

En la UACH, Mendoza-Paredes *et al.*, (2021) evaluaron el efecto de cinco proporciones de luz LED azul: roja y un testigo fluorescente sobre el crecimiento de plantas de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) en condiciones controladas. Flores-Pérez *et al.*, (2021) evaluaron el crecimiento de *Lilium* spp., con diferentes proporciones de luces LED roja y azul. En la UAAAN Avendaño-Abarca *et al.*, (2022) evaluaron la respuesta del cultivo de fresa (*Fragaria x*

ananassa Duch.) a la sustitución de luz azul por la verde en un sistema de ambiente controlado.

2.13.4 Impacto

Benke y Tomkins, (2017) han enumerado una serie de impactos que la agricultura vertical puede aportar a la producción de alimentos, mismos que se muestran en los siguientes ámbitos:

Económico

- Producción eficiente para la demanda de los alimentos.
- Baja inversión en fertilizantes y biopesticidas.
- Poca inversión en maquinaria pesada.
- Libre de pérdidas por desastres naturales.
- Ahorro de transportación.

Ambiental

- No exige uso de suelo.
- Uso de fuentes renovables.
- Restauración del suelo y los ecosistemas.
- Uso de aguas residuales para riego.
- Recolección de agua transpirada por las plantas.
- Se promueve la conservación de la biodiversidad.
- Menor consumo de combustibles fósiles.

Social

- Fuentes de empleo para los habitantes de la región.
- Progreso en el desarrollo de la tecnología agrícola.
- Estilo de vida más saludable al consumir productos frescos y de alta calidad.

2.13.5 Beneficio

También se han señalado los beneficios que la agricultura vertical aporta a la producción de alimentos, mismos que se muestran en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Beneficios de la agricultura vertical en el ámbito económico, ambiental y social.

Beneficio	Económico	Ambiental	Social
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.
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 puro y fresco.
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 y fauna.	Mejor presentación del sitio.

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

2.13.6 Lámparas LED's (*Light emitting diodes*)

Los LED's son diodos emisores de luz, ingresados recientemente a la agricultura en ambiente controlado, sus principales ventajas es que pueden brindar las longitudes de ondas electromagnéticas que la planta necesita para su crecimiento principalmente el color rojo y azul, además suple la luz natural en los días cortos, donde no hay suficiente iluminación y ayuda al fotoperiodo para estimular la floración (Gonzalías y Lasso, 2016).

Las lámparas LED son fácil de manejar, siendo mejores que cualquier otro sistema de iluminación artificial, se pueden programar para su encendido y apagado por medio de temporizadores digitales y por la baja emisión de calor no emiten luz infrarroja ni ultravioleta para las personas que tengan acceso (Gonzalías y Lasso, 2016).

Según Bures *et al.*, (2018) la radiación PAR o fotosintéticamente activa que las plantas requieren, están dentro de un rango de 400 nm a 700 nm, muy parecida a la que el ojo del ser humano puede percibir, las longitudes de onda del espectro se conforman por colores y los rangos pueden variar como se muestra en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Longitudes de onda del espectro según diversos autores.

Longitud de onda (nm)	Enríquez, 2005	Gonzalías y Lasso, 2016
UV-B		
UV-A	<380	
Púrpura	380 - 436	400 - 520
Azul	436 - 495	400 - 520
Verde	495 - 566	400 - 610
Amarillo	566 - 589	520 - 610
Naranja	589 - 627	520 - 610
Rojo	627 - 730	610 - 720
Rojo lejano	>730	610 - 720

2.13.7 Humedad relativa (HR)

La HR es una condición climática que interviene en el balance hídrico y ajusta la tasa de transpiración de las hojas; para el cultivo de fresa el rango permitido es de 60% a 75% (Bogotá, 2015).

El control de la HR por lo regular necesita la mayor ventilación posible, una baja HR aumenta en la planta la circulación de agua y por ende la transpiración es mayor (Ferrante y Mariani, 2018). Por el contrario, una alta HR disminuye asimilación de los elementos por la planta, la transpiración y el estrés hídrico (Hatfield y Prueger, 2015).

El déficit de presión de vapor (VPD) también afecta drásticamente a las plantas, un VPD bajo permite que las enfermedades lleguen rápidamente, ya que se acumula humedad en la planta y baja notoriamente la productividad (Linker *et al.*, 2011) un VPD alto demanda mayor agua en la planta necesitando mayor ventilación y en condiciones extremas las hojas no generarían transpiración por el cierre de estomas (Kozai *et al.*, 2019).

2.13.8 Temperatura

La temperatura es un factor climático que influye en todas las etapas fenológicas de las plantas, desde el trasplante hasta la maduración de los frutos (Kozai *et al.*, 2019). Para la fresa la estimulación de floración se da a temperaturas más cálidas, para las de día neutro se da en los días largos en un rango de 12°C a 26°C, para el crecimiento de estolones se da en temperaturas aún más altas de los 15°C y retienen su producción a temperaturas de 32 °C a 35°C (Bolda *et al.*, 2015).

Mantener temperaturas dentro del rango que las plantas toleran, es una serie de cuidados y una aportación es el uso de los LEDS, ya que hacen más eficaz su energía y disminuyen la emisión del rojo lejano, que afecta en algunos aspectos a los cultivos (Kozai *et al.*, 2019).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Sitio de estudio

La investigación se realizó en el Laboratorio de Agricultura Vertical en Ambiente Controlado del Departamento de Ciencias del Suelo, ubicado dentro de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, con dirección Calzada Antonio Narro 1923, Buenavista, C.P. 25315, Saltillo, Coahuila, México (Figura 1).



Figura 1. Ubicación del Laboratorio de Agricultura Vertical en el Departamento de Ciencias del Suelo de la UAAAN.

Fuente: Google Maps, 2023.

3.2 Material vegetativo

Se utilizaron 54 plántulas de fresa (*Fragaria × ananassa* Duch.) variedad San Andreas, la cual se caracteriza por ser de día neutro, lo que significa que las horas luz no alteran la producción de frutos.

3.3 Preparación del sustrato

La proporción del sustrato utilizado fue peat moss 70% y perlita 30%, con un pH de 5.8 y CE de 0.9 dS/m⁻¹.

A las bolsas de polietileno color negro se les perforó 4 orificios en la parte inferior con la ayuda de unas tijeras, esto para facilitar el lixiviado del riego, para posteriormente proceder a llenarlas con el sustrato ya preparado, por último, se

realizó el primer riego, utilizando solo agua ajustando el pH a 5.5, esto para lavar el exceso de sales que se acumulan en el sustrato.

3.4 Trasplante

Las plantas de fresa se trasplantaron en bolsas de 5 L, realizando un orificio en la parte superior central del sustrato, colocando la plántula cuidadosamente y cubriendo con sustrato hasta dejarla firme sin cubrir los primeros brotes, para evitar problemas de adaptación y marchitez de la planta.

3.5 Sistema de cultivo vertical de interior

Para este experimento, se utilizó un rack de las siguientes medidas: 2.53 m de alto, 1.72 m de largo y 80 cm de ancho. Estaba constituido por 5 niveles, separados por 35.5 cm; donde cada uno contenía una charola de aluminio, donde dentro de ella se colocaba otra bandeja de plástico de acrilonitrilo butadieno estireno de color negro, con las siguientes medidas: 1.71 m de largo, 73.5 cm de ancho y 10 cm de profundidad.

En todos los niveles, en la parte izquierda al inicio de la charola se les realizó una perforación circular colocando un tubo de PVC por nivel, para recolectar la fracción del lixiviado del riego en última bandeja.

Para este trabajo de investigación se utilizaron solo tres niveles del rack, en cada charola se realizaron tres filas colocando 6 plantas, teniendo un total de 18 plantas por nivel.

3.6 Control de temperatura y humedad relativa

La temperatura se modificó diariamente a 24°C en el día y a 17 °C por la noche para esto se utilizó un minisplit de dos toneladas.

La HR se mantuvo a 60% \pm 5% utilizando un humidificador de 0.5 L^{h-1} y un extractor de 25 cm de diámetro, conectándose a un controlador de humedad digital de enchufe programable. Se colocaron cuatro ventiladores en los tres

niveles del rack utilizados de modo que fuera proporcional la circulación del aire y la concentración promedio del CO₂ fue de 400 ppm.

3.7 Tratamientos de lámparas LED's por niveles

Cada lámpara LED fue caracterizada con un espectrorradiómetro y se colocaron a 21 cm de distancia de la bandeja del nivel y se le consideró un tratamiento de intensidad lumínica como se muestra en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Intensidades lumínicas de las lámparas LED's por niveles.

	Intensidad μmol m⁻² s⁻¹	Azul	Verde	Roja
Nivel 1	250	32.6 (12.5%)	66.1 (25.3%)	162.5 (62.2%)
Nivel 2	300	42.0 (13.3%)	82.6 (26.1%)	191.5 (60.6%)
Nivel 3	600	70.9 (11.8%)	157.3 (26.2%)	373.3 (62.1%)

3.8 Tratamientos de la solución nutritiva y fertilización

En base a la solución Steiner, se modificó su concentración y se manejaron tres tratamientos de concentraciones con 7, 9 y 11 meq/L de Ca, la cual contenía los siguientes fertilizantes: NH₄NO₃, KNO₃, Ca(NO₃)₂, K₂SO₄ y MgSO₄ y fue utilizado ácido fosfórico (H₃PO₄) y nítrico (HNO₃) para neutralizar la solución y poder tener una buena absorción de los nutrientes.

3.9 Riego

El riego se realizó conforme a las necesidades de la planta, aplicando riegos con las soluciones nutritivas correspondientes a los tratamientos y con riegos simples de agua con un pH de 6.5 a 8, a lo que se ajustaba con ácido sulfúrico (H₂SO₄), para llegar a un rango de 5.5 a 5.8 máximo, teniendo una fracción de lixiviado del 30%.

3.10 Forma de aplicación de los tratamientos

Los tratamientos de la SN se aplicaron con una frecuencia de 3 a 4 días, 1 L por planta, realizando dos riegos consecutivos con las soluciones nutritivas y el tercer riego, aplicando 800 ml de agua simple por planta para lavar el exceso de sales presentes en el sustrato.

3.11 Manejo agronómico del cultivo

3.11.1 Podas

- **Poda de estolones**

La formación de los estolones comenzó a los 45 días de haber realizado el trasplante, una vez a la semana se revisaban todas las plantas, conforme crecían se retiraban para evitar que tomaran nutrientes de la planta y por ende disminuyera el crecimiento de la planta.

- **Poda de hojas**

La poda de hojas consistía en enfocarse en las más viejas y las que contaban con presencia de alguna plaga o enfermedad, esto para evitar que las hojas sanas se infectaran.

- **Podas de flores**

Después del trasplante se retiraron las primeras flores que se formaron, esto para estimular mayor vigor en la planta e impedir que entre en producción a temprana edad.

- **Poda de frutos**

Cuando la planta entró en producción de frutos, se revisaba una vez a la semana los frutos nuevos, retirando los que presentaban alguna malformación o deficiencia de nutrientes.

3.11.2 Control de plagas

Durante todo el ciclo vegetativo de la fresa, estuvo expuesto a plagas aun estando en un ambiente controlado.

Se tuvo la presencia de la araña roja (*Tetranychus urticae*), las primeras señales se presentaron con pequeños puntos de color blanco en el haz de la hoja y en el envés se observaban los diferentes estadios de desarrollo.

Se realizó un calendario de control que consistía en aplicar de forma foliar, una vez a la semana tres insecticidas como se muestra en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Plaguicidas para el control de plagas.

Plaguicida	Ingrediente activo	Dosis
Abamectina delta	Abamectina	1 ml/L
Penatrex	Nonilfenol y Polioxietilénico	3 ml/L
Celapyr ce	Aceite de canela + piretrinas	1 ml/L

3.12 Cosecha

La recolección de los frutos se realizó de forma manual, eligiendo solamente los frutos con el mismo estado de maduración y firmeza adecuada.

Cada fruto recolectado pasaba por diferentes evaluaciones en el Laboratorio de Agricultura Vertical, donde los frutos en buen estado y mejor calidad se almacenaban en bolsas de plástico transparentes con cierre tipo Zip Lock, colocando una etiqueta con el número del nivel del rack, tratamiento de la SN y número de planta, para posteriormente pasarlas al congelador y realizar pruebas nutrimentales.

3.13 Variables evaluadas

3.13.1 Variables de rendimiento

- **Rendimiento del cultivo**

Se determinó el peso de cada fruto en gramos con la ayuda de una báscula digital de acero inoxidable (marca MESVIER, color plata).

- **Número de flores, frutos y coronas**

Al terminar el ciclo del cultivo se contaron el número de flores, frutos y coronas por planta, tratamiento y nivel, se procedió a retirarlos y guardarlos en una bolsa de papel de estraza del número tres, colocando una etiqueta con un marcador permanente el número del nivel del rack, tratamiento de la SN y número de planta.

3.13.2 Variables agronómicas

- **Longitud y diámetro del fruto**

Se determinó estas variables en milímetros (mm) con la ayuda de un vernier digital, colocándolo a lo largo y ancho del fruto.

- **Peso fresco**

Al momento de haber sido retirados las hojas, tallos, flores, frutos, coronas y raíz de cada planta, fueron pesadas con la ayuda de una báscula digital, se resguardaron en una bolsa de papel de estraza del número tres, colocando una etiqueta con un marcador permanente el número del nivel, tratamiento y planta.

Se agruparon de la siguiente forma: parte aérea (hoja/tallo), flor/fruto, corona y raíz.

- **Peso seco**

Una vez agrupadas y etiquetadas todas las muestras, se pasaron a una estufa de secado a 60°C dejándolas por un lapso de 24 a 48 horas. Al transcurrir el tiempo de secado se procedió a pesar cada muestra con la ayuda de la báscula digital.

3.13.3 Variables de calidad

- **Firmeza del fruto**

Se determinó con la ayuda de un penetrómetro manual (marca WAGNER) en unidades de kg/cm, tomando cada fruto de modo vertical, retirando con un

pelador una parte de la textura del fruto, procediendo a colocar la punta del penetrómetro de modo firme, pulsando el botón pequeño de la parte superior lado izquierdo.

- **Sólidos solubles totales (SST)**

El contenido de SST se determinó con la ayuda de un refractómetro manual (marca ATAGO) en °Brix, para ello se limpió la placa de luz de día con un pañuelo delgado, se colocaron de 2 a 3 gotas de la muestra de pulpa del fruto, se cierra la placa del instrumento para poder visualizar la lectura por medio del ocular.

3.13.4 Variables nutrimentales

- **Concentración nutrimental de Ca^{2+} , K^+ y NO_3^- en frutos**

Los frutos de cada tratamiento se trituraban en bolsas transparentes de 5 cm x 12 cm, se colocaba de dos a tres gotas de la pulpa en cada medidor de nutrientes de Ca^{2+} , K^+ y NO_3^- (marca HORIBA), pasando algunos segundos se podía observar en la pantalla el contenido nutrimental, por último, se retiraba la pulpa de los sensores limpiando con agua destilada, secando cuidadosamente con un pañuelo delgado.

3.14 Diseño experimental

Se utilizaron tres niveles de intensidades lumínicas (Cuadro 6) y tres concentraciones de Ca en la SN (7, 9 y 11 meq) con 6 repeticiones cada uno, teniendo un total de 54 unidades experimentales bajo un diseño de bloques completamente al azar con arreglo factorial de 3 x 3.

IV. RESULTADOS

4.1 Variables de rendimiento

4.1.1 Rendimiento del cultivo

No hubo una diferencia significativa entre los tratamientos de intensidades lumínicas (Cuadro 8), sin embargo, en los diferentes niveles de Ca en la SN se observó que con una concentración de 11 meq se obtuvo el mayor rendimiento a diferencia de los otros tratamientos, mientras que con la concentración de 7 meq resultó un menor rendimiento (Cuadro 8). La interacción de las diferentes intensidades lumínicas y niveles de Ca en la SN muestran un efecto significativo.

Cuadro 8. Rendimiento de fresa (*Fragaria x ananassa* Duch) en condiciones de ambiente controlado con uso de lámparas LED a diferentes intensidades lumínicas en interacción con distintos niveles de Ca en la solución nutritiva.

Intensidad lumínica ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Rendimiento (g)
250	249.5
300	261.9
600	230.4
ANOVA	P= 0.341
Ca (meq)	
7	215.6 B
9	255.7 AB
11	267.0 A
ANOVA	P= 0.045
Interacción	P= 0.036

Promedios seguidos de la misma letra indica diferencias no significativas según la prueba LSD con $p < 0.05$

Guiamba *et al.*, (2022) informan que, con intensidades lumínicas de 150, 200 y 250 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ el mayor rendimiento de fresa se obtuvo con la intensidad más alta, por lo que nuestros resultados no concuerdan al tener mayor rendimiento con 300 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Así mismo Avendaño-Abarca *et al.*, (2022) reportan que bajo una intensidad lumínica de 420.6 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ con un balance de luz azul (LA), verde (LV) y roja (LR) (20:20:60) respectivamente obtuvieron rendimientos de 80 g/planta de fresa, por lo que no coincide con nuestros resultados al superar el rendimiento con intensidades de 300 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (LA13: LV26: LR60).

Escorcia (2018) reporta que al aumentar las concentraciones de Ca en la SN hay mayor rendimiento de fresa bajo invernadero, lo que concuerda con nuestros resultados al tener mejor rendimiento con concentraciones altas de Ca en producción bajo agricultura vertical.

Prasad *et al.*, (2022) informan que los rendimientos comerciales por planta de fresa van desde 96.10 a 554.58 g/planta bajo túnel, por lo que nuestros resultados concuerdan al estar dentro del rango promedio aceptable en el mercado.

La interacción muestra que mientras que con 7 meq/L de Ca en la SN el nivel de intensidad lumínica no tuvo efecto significativo, con 9 meq/L si hubo una ligera reducción en la producción de fruto, mientras que con 11 meq/L el mayor rendimiento de fruto se presenta cuando la intensidad fue de 300 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Figura 2).

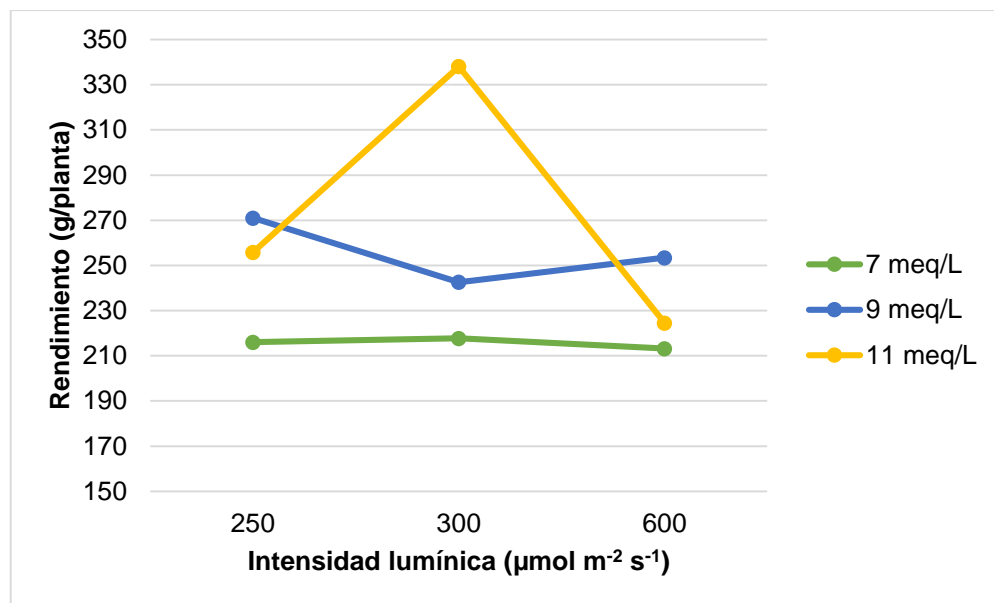


Figura 2. Efecto del balance de las lámparas LED a diferentes intensidades lumínicas en el rendimiento de fruto de fresa (*Fragaria x ananassa* Duch) en un sistema vertical, en función de la concentración de Ca en la solución nutritiva.

4.1.2 Número de flores, frutos y coronas

Número de flores

En los niveles de intensidad lumínica se puede ver que hubo una diferencia significativa entre los tratamientos, así mismo en los diferentes niveles de Ca en la SN ya que con una concentración de 7 meq se obtuvo mayor número de flores a diferencia de los otros tratamientos, mientras que con la concentración de 11 meq resultó una menor cantidad (Cuadro 9). La interacción de las diferentes intensidades lumínicas y niveles de Ca en la solución fue significativa.

Cuadro 9. Número de flores, frutos y coronas del cultivo de fresa (*Fragaria x ananassa* Duch) en condiciones de ambiente controlado con uso de lámparas LED a diferentes intensidades lumínicas en interacción con distintos niveles de Ca en la solución nutritiva.

Intensidad lumínica ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Número de flores	Número de frutos	Número de coronas
250	3.1 A	2.7 A	3.2 A
300	2.0 B	1.7 B	2.3 B
600	0.7 C	1.0 C	2.1 B
ANOVA	P= <.0001	P= <.0001	P= <.0001
Ca (meq)			
7	2.6 A	2.2 A	2.5 B
9	1.6 B	2.2 A	3.0 A
11	1.3 B	0.9 B	2.1 B
ANOVA	P= <.0001	P= <.0001	P= 0.0004
Interacción	P= <.0001	P= 0.0067	P= 0.0435

Promedios seguidos de la misma letra indica diferencias no significativas según la prueba LSD con $p < 0.05$

La Figura 3 muestra que independientemente de la concentración de Ca en la SN, el número de flores tiende a disminuir conforme se eleva la intensidad lumínica. Estos datos sugieren que para obtener la mayor cantidad de flores la intensidad debe ser de $250 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ combinados con 7 meq de Ca. Sin embargo, este comportamiento es contrario a lo observado con el rendimiento ya que este fue mayor con altos niveles de Ca e intermedios de iluminación, por lo que este comportamiento sugiere que el menor número de flores en estos tratamientos puede ser debido a que las plantas desarrollaron más frutos o frutos de mayor peso, afectando la producción de flores.

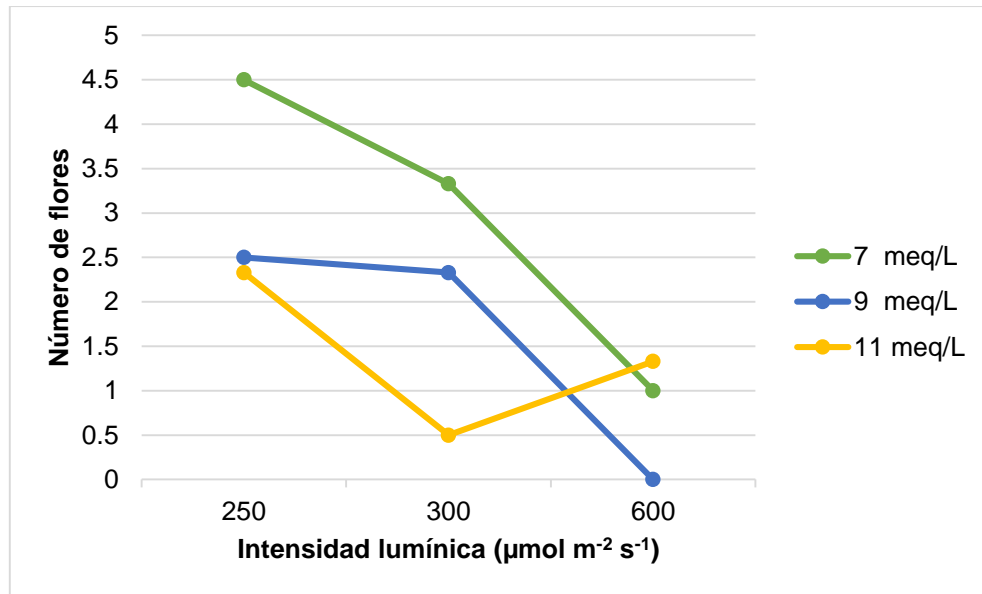


Figura 3. Efecto del balance de las lámparas LED a diferentes intensidades lumínicas en el número de flores del cultivo de fresa (*Fragaria x ananassa* Duch) en un sistema vertical, en función de la concentración de Ca en la solución nutritiva.

Rangel (2011) reporta que con una intensidad lumínica de $256 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ obtuvieron el mayor número de flores (4.75) en la producción de anturio (*Anthurium andraeanum*), por lo que concuerda con nuestros resultados al tener la mayor cantidad de flores (3.1) con $250 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Juárez-Rosete *et al.*, (2007) informan que bajo producción de fresa en sistemas de riego por goteo obtuvieron en promedio una flor por planta desde la floración hasta la fructificación debido a los factores ambientales, por lo que no coincide con nuestros resultados, esto puede deberse a que se trabajó en agricultura vertical, controlando los factores del ambiente obteniendo datos superiores.

Número de frutos

Hubo una diferencia significativa entre las intensidades lumínicas así mismo por los diferentes niveles de Ca en la SN (Cuadro 9); con una concentración de 7 y 9 meq se obtuvo mayor número de frutos, mientras que con 11 meq resultó en una menor cantidad. La interacción resultó ser significativa (Figura 4) y muestra tendencias similares a lo señalado para el número de flores (Figura 3).

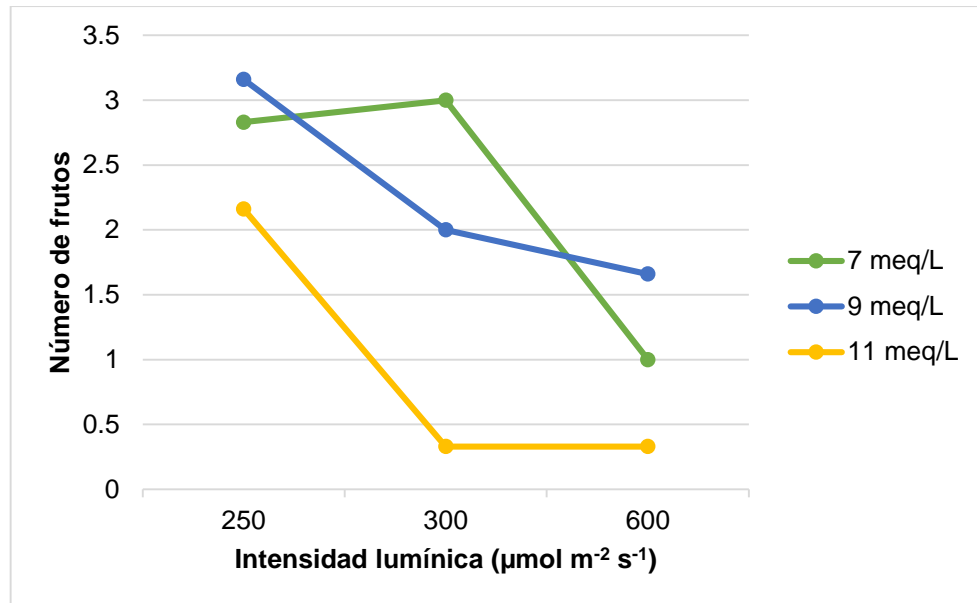


Figura 4. Efecto del balance de las lámparas LED a diferentes intensidades lumínicas en el número de frutos del cultivo de fresa (*Fragaria x ananassa* Duch) en un sistema vertical, en función de la concentración de Ca en la solución nutritiva.

An *et al.*, (2013) informan que la cantidad de frutos disminuye a una mayor intensidad lumínica, por lo que concuerda con nuestros resultados obtenidos al tener la menor cantidad de frutos en intensidades de $600 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Juárez-Rosete *et al.*, (2007) reportan que bajo producción de fresa en sistema NFT obtuvieron en promedio tres frutos por planta, utilizando diferentes concentraciones de SN, por lo que concuerda con nuestros resultados al estar cerca del rango promedio de frutos.

Número de coronas

Las intensidades lumínicas causaron una diferencia significativa entre los tratamientos en el número de coronas desarrolladas en la planta, ya que con $250 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ se produjeron un 52.4% más coronas que con $600 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Cuadro 9); así mismo, los niveles de Ca en la SN tuvieron efecto ya que con una concentración de 9 meq se obtuvo el mayor número de coronas, mientras que con 11 meq resultó una menor cantidad (Figura 5). La interacción de las diferentes intensidades lumínicas y de Ca en la solución fue significativa.

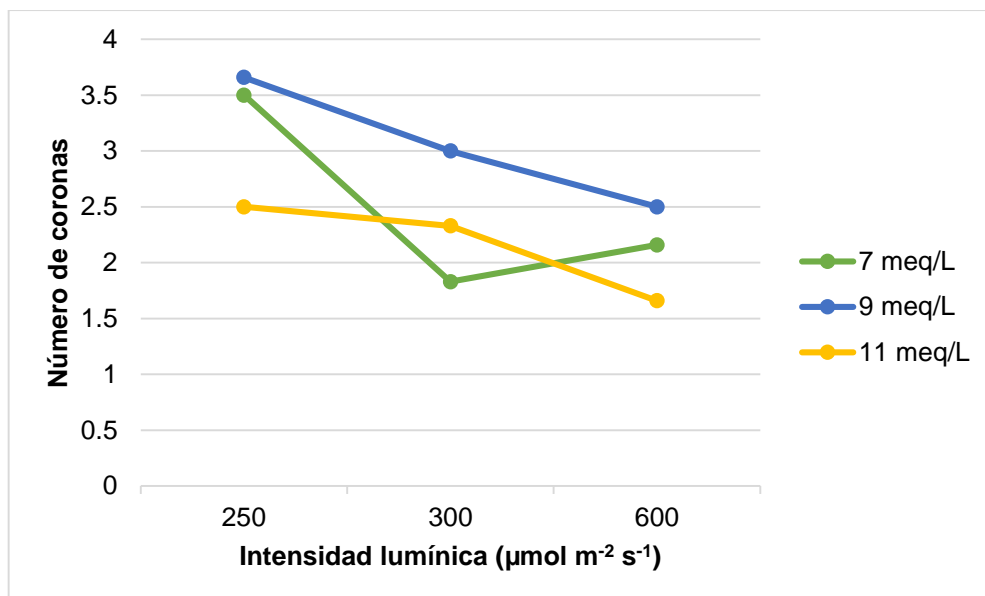


Figura 5. Efecto del balance de las lámparas LED a diferentes intensidades lumínicas en el número de coronas del cultivo de fresa (*Fragaria x ananassa* Duch) en un sistema vertical, en función de la concentración de Ca en la solución nutritiva.

Avendaño-Abarca *et al.*, (2022) informan que se obtienen mayor número de coronas (3.47) con una intensidad lumínica de $427.5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ con un balance (LA12: LV27: LR61), por lo que nuestros resultados no concuerdan al tener mayor cantidad de coronas con $250 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (LA12: LV25: LR62).

Prasad *et al.*, (2022) reportan un número de coronas promedio 2.43 de la planta fresa en producción bajo túnel con diferentes combinaciones de sustrato, por lo que nuestros resultados son superiores con 3.0 coronas en producción bajo ambiente controlado.

4.2 Variables agronómicas

4.2.1 Longitud y diámetro del fruto

No hubo una diferencia significativa entre los tratamientos de longitud y diámetro causado por las intensidades lumínicas, así como tampoco por los diferentes niveles de Ca en la SN (Cuadro 10). La interacción de las diferentes intensidades lumínicas y de Ca en la solución no muestran una interacción entre sí en ambas variables.

Cuadro 10. Longitud y diámetro del fruto de fresa (*Fragaria x ananassa* Duch) en condiciones de ambiente controlado con uso de lámparas LED a diferentes intensidades lumínicas en interacción con distintos niveles de Ca en la solución nutritiva.

Intensidad lumínica ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Longitud de fruto (mm)	Diámetro de fruto (mm)
250	31.2	25.6
300	30.5	25.7
600	29.8	25.1
ANOVA	P= 0.121	P= 0.455
Ca (meq)		
7	30.3	25.3
9	30.3	25.5
11	30.9	25.6
ANOVA	P= 0.558	P= 0.878
Interacción	P= 0.475	P= 0.559

Promedios seguidos de la misma letra indica diferencias no significativas según la prueba LSD con $p < 0.05$

Dussi (2007) informa que una menor intensidad lumínica afecta el tamaño y crecimiento de los frutos en las plantas, por lo que difiere con nuestros resultados al no tener afectación en la longitud y diámetro del fruto con diferentes intensidades de iluminación.

Escorcia, (2018) reporta que bajo producción en invernadero en dos cultivares de fresa la concentración de Ca en la SN no afectó el diámetro del fruto, por lo que nuestros resultados son similares, sin embargo, el mismo autor también informa que con concentraciones de 4.5 meq y 6.75 meq de Ca si afectó reduciendo la longitud del fruto, por lo que nuestros resultados no coinciden al no ser afectados por ninguna concentración.

4.2.2 Peso fresco

Las intensidades lumínicas causaron una diferencia significativa en el peso fresco de la parte aérea, así como de la flor/fruto, corona y raíz, siendo las plantas desarrolladas con $250 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ las que mayor biomasa vegetativa acumularon (Cuadro 11). Para la parte aérea, la corona y la raíz, el mayor peso fresco se presentó cuando los niveles de Ca en la SN fueron de 9 meq/L, en tanto que para las flores/frutos que al momento de la cosecha final se encontraban en las plantas

el mayor peso fresco se presentó con 7 meq/L (Cuadro 11). La interacción de las diferentes intensidades lumínicas y de Ca en la SN fueron significativas excepto para el peso fresco de la corona (Cuadro 11); en general, al subir la intensidad lumínica se presentó una disminución en el peso fresco de las plantas, pero la disminución en el peso fresco de la parte aérea es menor con 9 meq/L de Ca (Figura 6) con 7 meq/L de Ca es mayor el peso fresco de la flor/fruto (Figura 7), y con 11 meq/L en el peso de la raíz (Figura 8).

Cuadro 11. Peso fresco de la parte aérea (hoja/tallo), flor/fruto, corona y raíz de fresa (*Fragaria x ananassa* Duch) en condiciones de ambiente controlado con uso de lámparas LED a diferentes intensidades lumínicas en interacción con distintos niveles de Ca en la solución nutritiva.

Peso fresco				
Intensidad lumínica ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Parte aérea (g)	Flor/Fruto (g)	Corona (g)	Raíz (g)
250	11.6 A	3.8 A	6.1 A	25.0 A
300	9.0 B	2.3 B	3.7 B	20.0 B
600	3.9 C	1.3 C	3.5 B	13.6 C
ANOVA	P= <.0001	P= <.0001	P= <.0001	P= <.0001
Ca (meq)				
7	8.7 B	3.5 A	4.5 B	19.2 B
9	9.4 A	2.4 B	4.9 A	20.4 A
11	6.4 C	1.4 C	3.8 C	18.9 B
ANOVA	P= <.0001	P= <.0001	P= <.0001	P= 0.0197
Interacción	P= <.0001	P= <.0001	P= 0.7166	P= <.0001

Promedios seguidos de la misma letra indica diferencias no significativas según la prueba LSD con $p < 0.05$

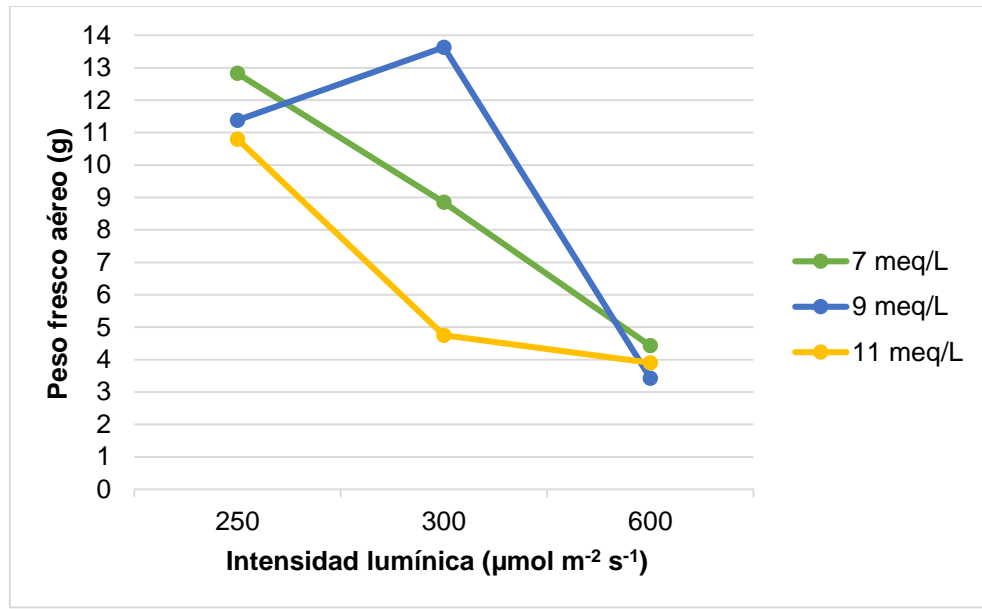


Figura 6. Efecto del balance de las lámparas LED a diferentes intensidades lumínicas en el peso fresco aéreo (hoja y tallo) de la planta de fresa (*Fragaria x ananassa* Duch) en un sistema vertical, en función de la concentración de Ca en la solución nutritiva.

Matysiak *et al.*, (2021) reportan un mayor peso fresco de la parte aérea de 148 g en el cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.) con una intensidad lumínica de 75 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, por lo que nuestros resultados no concuerdan con los autores al tener mejor peso con intensidades de 250 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Prasad *et al.*, (2022) informan que la producción de fresa en túnel con la combinación de sustrato de turba y varios hongos, obtuvieron un peso fresco de 25.42 g de la parte aérea de por lo que nuestros datos fueron inferiores, esto puede deberse a que la utilización de hongos como sustrato mejoró el peso fresco de la parte aérea.

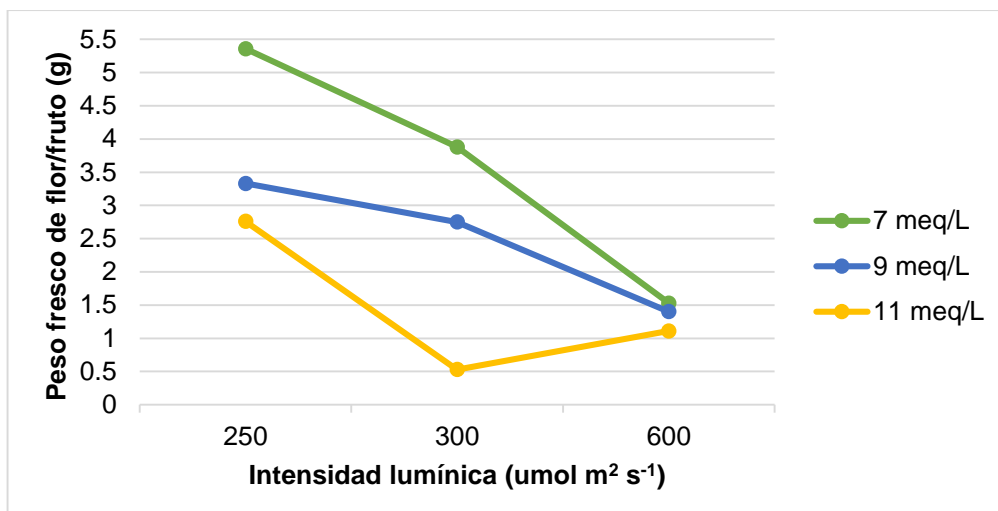


Figura 7. Efecto del balance de las lámparas LED a diferentes intensidades lumínicas en el peso fresco del flor y fruto de la planta de fresa (*Fragaria x ananassa* Duch) en un sistema vertical, en función de la concentración de Ca en la solución nutritiva.

Rangel (2011) informa que obtuvieron mayor peso fresco de flores de anturio (*Anthurium andraeanum*) con intensidades de $290 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ por lo que nuestros resultados concuerdan al tener mejor peso fresco con intensidades similares de $250 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

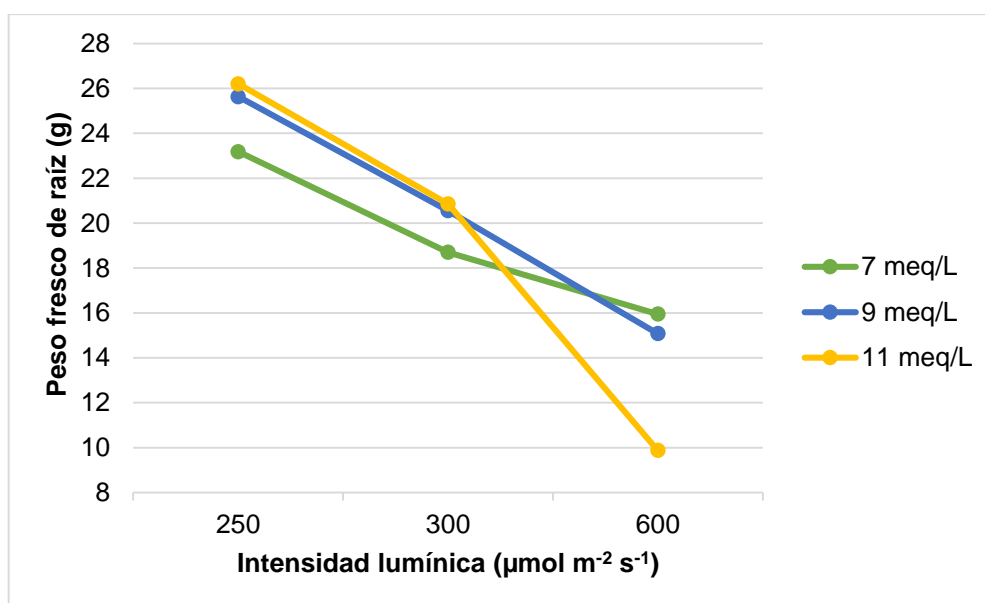


Figura 8. Efecto del balance de las lámparas LED a diferentes intensidades lumínicas en el peso fresco de la raíz de la planta de fresa (*Fragaria x ananassa* Duch) en un sistema vertical, en función de la concentración de Ca en la solución nutritiva.

Guiamba *et al.*, (2022) reportan que, al utilizar intensidades lumínicas de 150, 200 y 250 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ obtuvieron mayor peso fresco de raíz (16.80 g) con 250 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ por lo que nuestros resultados son similares al tener mayor peso fresco de raíz con la misma intensidad lumínica. Así mismo Avendaño-Abarca *et al.*, (2022) obtuvieron mayor peso seco de raíz (34.3 g) con una intensidad de 420.6 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ con un balance (LA20: LV20: LR60) por lo que nuestros resultados difieren a tener mejor peso fresco con 250 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (LA12: LV25: LR62).

4.2.3 Peso seco

Las intensidades lumínicas tuvieron un efecto significativo sobre el peso seco de las partes vegetativas de las plantas (Cuadro 12), el cual fue similar a los mostrado para el peso fresco (Cuadro 11). Similarmente, los niveles de Ca afectaron el peso seco, pero en este caso no hubo efectos significativos sobre el peso seco de la raíz (Cuadro 12). La interacción también mostro tendencias similares a lo indicado para el peso fresco (Figuras 6-8).

Cuadro 12. Peso seco de la parte aérea (hoja/tallo), flor/fruto, corona y raíz de la fresa (*Fragaria x ananassa* Duch) en condiciones de ambiente controlado con uso de lámparas LED a diferentes intensidades lumínicas en interacción con distintos niveles de Ca en la solución nutritiva.

Peso seco				
Intensidad lumínica ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Parte aérea (g)	Flor/Fruto (g)	Corona (g)	Raíz (g)
250	3.6 A	1.9 A	2.0 A	6.3 A
300	3.0 B	1.0 B	1.2 C	4.6 B
600	1.7 C	0.6 C	1.4 B	3.2 C
ANOVA	P= <.0001	P= <.0001	P= <.0001	P= <.0001
Ca²⁺ (meq)				
7	2.7 B	2.0 A	1.5 AB	4.72
9	3.3 A	1.0 B	1.6 A	4.72
11	2.5 B	0.5 C	1.4 B	4.73
ANOVA	P= 0.0003	P= <.0001	P= 0.0244	P= 0.9977
Interacción	P= <.0001	P= <.0001	P= 0.0010	P= 0.0015

Promedios seguidos de la misma letra indica diferencias no significativas según la prueba LSD con $p < 0.05$

Nava-Martínez *et al.*, (2009) reportan que en producción de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) bajo invernadero con diferentes concentraciones de 6, 9, 12 y 15 meq de Ca en la SN obtuvieron más peso seco aéreo con 6 meq, por lo que nuestros resultados contrastan al tener mayor peso seco con la concentración intermedia de 9 meq. Así mismo Prasad *et al.*, (2022) reportaron que bajo producción de fresa en túnel obtuvieron un peso seco de la parte aérea de 12.45 g y de corona 2.84 g por lo que nuestros datos fueron inferiores bajo ambiente controlado.

Avendaño-Abarca *et al.*, (2022) reportan que obtuvieron mayor peso seco de corona y raíz de la planta de fresa con una intensidad lumínica de $420.6 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ con un balance (LA20: LV20: LR60) por lo que nuestros resultados no coinciden al tener mejores pesos secos con una intensidad de $250 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (LA12: LV25: LR62).

Guiamba *et al.*, (2022) reportan que, al utilizar intensidades lumínicas de 150, 200 y $250 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ obtuvieron mayor peso seco de raíz (2.60 g) con $250 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ por lo que nuestros resultados son similares al tener los mayores pesos con la misma intensidad.

4.2.4 Variables de calidad (Firmeza y sólidos solubles totales)

Las intensidades lumínicas y niveles de Ca en la SN no tuvieron efecto significativo en la firmeza del fruto, pero si hubo efecto en el contenido de SST (Cuadro 13). En general, los SST fueron más altos entre mayor fue la intensidad lumínica y mayor la concentración de Ca en la SN (Cuadro 13). La interacción de las intensidades lumínicas y Ca en la SN fue significativa en cuanto al contenido de SST (Cuadro 13), la cual muestra que la tendencia a elevarse los SST al subir la intensidad lumínica ocurre con excepción de cuando el Ca en la SN fue de 9 meq/L (Figura 9).

Cuadro 13. Firmeza y sólidos solubles totales del fruto de fresa (*Fragaria x ananassa* Duch) en condiciones de ambiente controlado con uso de lámparas LED a diferentes intensidades lumínicas en interacción con distintos niveles de Ca en la solución nutritiva.

Intensidad lumínica ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Firmeza del fruto (kg/cm)	Sólidos solubles totales (°Brix)
250	926.3	7.9 B
300	939.4	8.3 A
600	920.0	8.2 AB
ANOVA	P= 0.459	P= 0.086
Ca (meq)		
7	925.2	7.8 B
9	933.3	8.33 A
11	927.2	8.36 A
ANOVA	P= 0.867	P= 0.0021
Interacción	P= 0.313	P= 0.0006

Promedios seguidos de la misma letra indica diferencias no significativas según la prueba LSD con $p < 0.05$

Avendaño-Abarca *et al.*, (2022) reportan que al utilizar intensidades lumínicas similares de 434.9, 420.6 y 427.5 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ pero con balances distintos de luz azul, verde y roja no afectaron la firmeza del fruto de fresa (*Fragaria x ananasa* D.) por lo que nuestros resultados concuerdan al no ser afectada la firmeza en diferentes intensidades lumínicas y balances similares de luces.

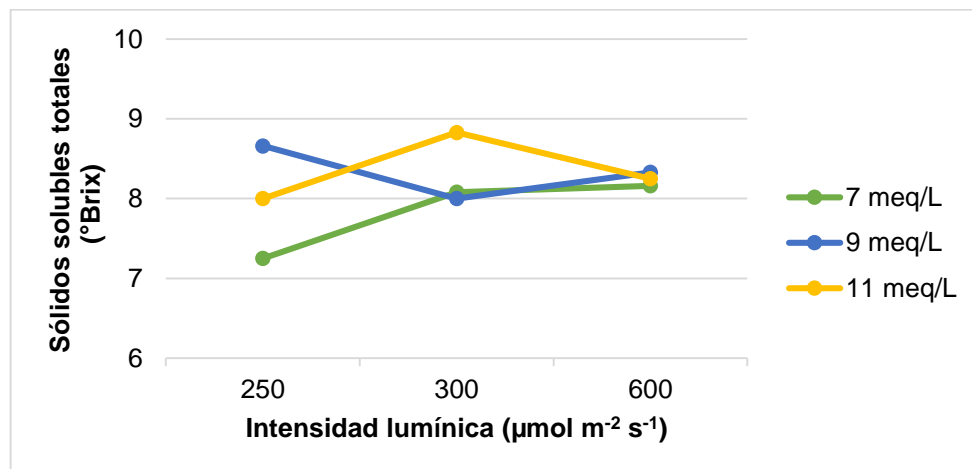


Figura 9. Efecto del balance de las lámparas LED a diferentes intensidades lumínicas en sólidos solubles totales del fruto de fresa (*Fragaria x ananassa* Duch) en un sistema vertical, en función de la concentración de Ca en la solución nutritiva.

Avendaño-Abarca *et al.*, (2022) reportan que con una intensidad lumínica de $427.5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ con un balance (LA12: LV27: LR61) obtuvieron mayor SST en el fruto de fresa de 12.79°Brix por lo que nuestros resultados no concuerdan al tener los mejores SST (8.3°Brix) con $300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (LA13: LV26: LR60).

Escorcia (2018) reporta que con concentraciones de 2.5 a 6.5 meq de Ca en la SN pueden llegar a tener SST de 6.58 a 7.15°Brix por lo que nuestros resultados superan estos valores con concentraciones más altas de Ca. El rango de los $^\circ\text{Brix}$ obtenidos en los frutos de nuestro experimento 7.9 a 8.3 concuerda con Roudeillac y Trajkovski, (2003) quien menciona que el intervalo recomendable en poscosecha es mínimo de 7 y máximo de 12.

4.3 Variables nutrimentales del fruto

La intensidades lumínicas tuvieron un efecto significativo en la concentración de Ca^{2+} , K^+ y NO_3^- en los frutos de fresa cosechados, así como los diferentes niveles de Ca en la SN (Cuadro 14) con una concentración de 7 meq y 11 meq se tuvo mayor concentración de Ca^{2+} en el fruto, mientras que con 9 meq resultó inferior; por otro lado, con 9 meq resultó una mayor concentración de K^+ , mientras que con 7 meq fue menor, por último con una concentración de 11 meq se obtuvo mayor concentración de NO_3^- en el fruto, mientras que con los demás tratamientos se obtuvo una menor concentración. La interacción de las intensidades lumínicas y niveles Ca en la SN fueron significativos (Cuadro 14).

Cuadro 14. Concentración nutrimental de Ca^{2+} , K^+ y NO_3^- en fruto de fresa (*Fragaria x ananassa* Duch) en condiciones de ambiente controlado con uso de lámparas LED a diferentes intensidades lumínicas en interacción con distintos niveles de Ca en la solución nutritiva.

Intensidad lumínica ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Ca^{2+} (ppm)	K^+ (ppm)	NO_3^- (ppm)
250	21.7 B	1514.1 B	248.3 B
300	23.2 A	1548.3 B	258.0 A
600	17.0 C	1673.3 A	250.5 B
ANOVA	P= <.0001	P= <.0001	P= 0.0039
Ca (meq)			
7	21.0 A	1506.6 C	246.6 B
9	19.4 B	1645.8 A	243.3 B
11	21.6 A	1583.3 B	266.9 A
ANOVA	P= <.0001	P= 0.0002	P= <.0001
Interacción	P= <.0001	P= <.0001	P= <.0001

Promedios seguidos de la misma letra indica diferencias no significativas según la prueba LSD con $p < 0.05$

Avendaño-Abarca *et al.*, (2022) reportan que con una intensidad lumínica de $427.5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ con un balance (LA12: LV27: LR61) obtuvieron mayor concentración de Ca^{2+} en el fruto de fresa por lo que no concuerda con nuestros resultados al tener la mayor concentración con $300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (LA13: LV26: LR60).

Matysiak *et al.*, (2021) informan que el contenido nutrimental de Ca^{2+} fue similar en la planta de lechuga romana (*Lactuca sativa* L.) var. Longifolium sin intervenir la SN, por lo que en nuestros resultados no concuerdan al tener mejor concentración nutrimental de Ca^{2+} en el fruto con niveles altos de Ca en la SN.

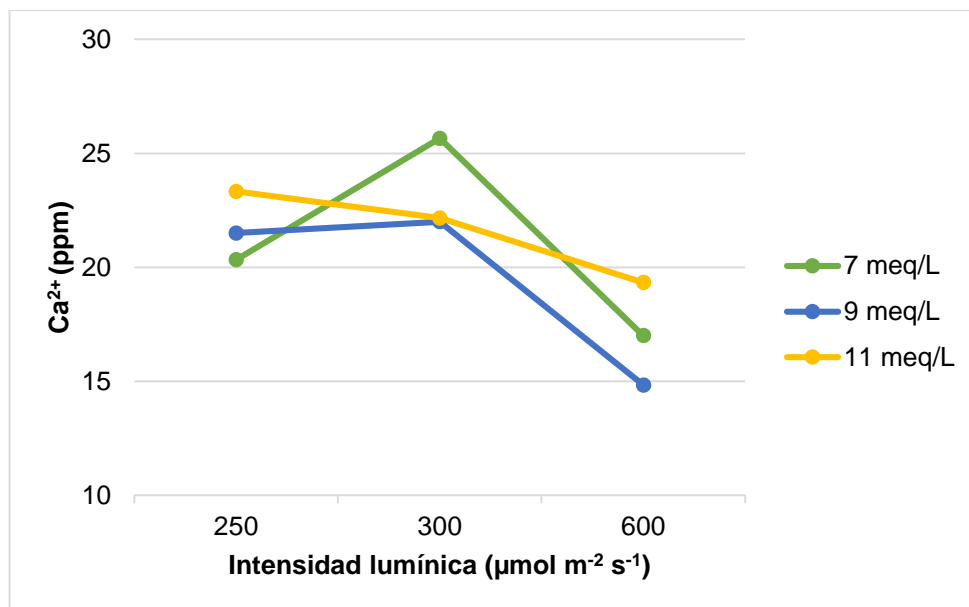


Figura 10. Efecto del balance de las lámparas LED a diferentes intensidades lumínicas en la concentración nutrimental de Ca^{2+} en el fruto de fresa (*Fragaria x ananassa* Duch) en un sistema vertical, en función de la concentración de Ca en la solución nutritiva.

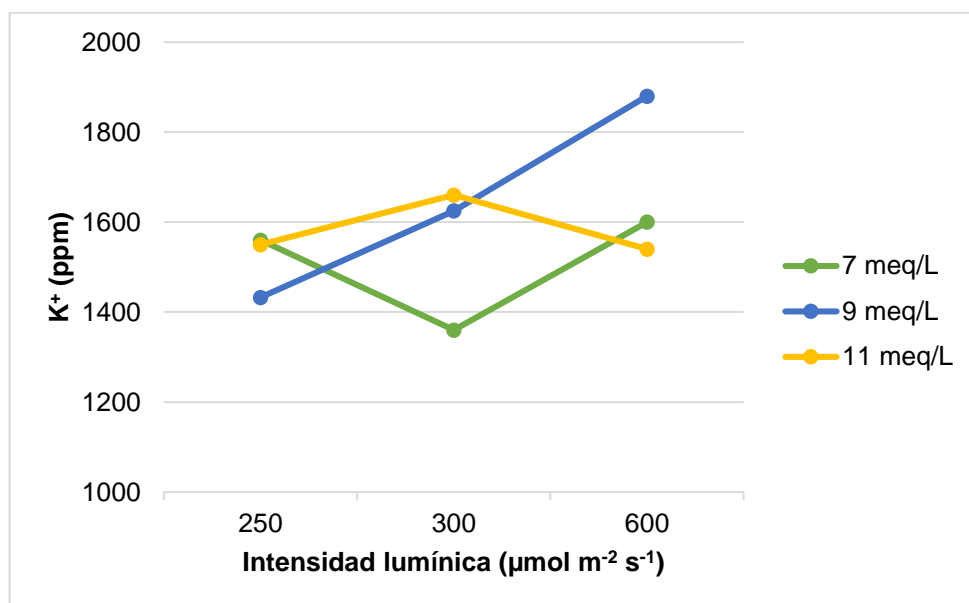


Figura 11. Efecto del balance de las lámparas LED a diferentes intensidades lumínicas en la concentración nutrimental de K^+ en el fruto de fresa (*Fragaria x ananassa* Duch) en un sistema vertical, en función de la concentración de Ca en la solución nutritiva.

Avendaño-Abarca *et al.*, (2022) reportan que al utilizar intensidades lumínicas similares de 434.9, 420.6 y 427.5 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ pero con distintos balances de luz azul, verde y roja no afectó la concentración de K^+ en el fruto, por lo que nuestros resultados no concuerdan al tener mejor concentración con intensidades lumínicas altas de 600 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

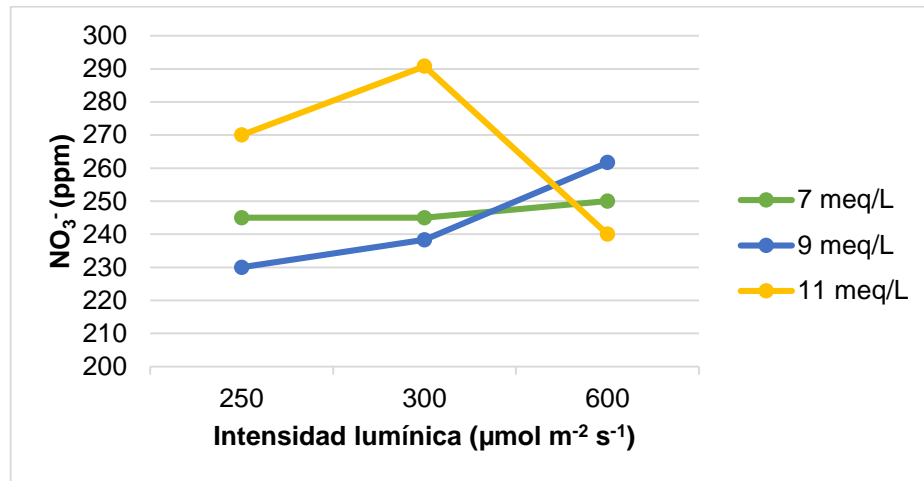


Figura 12. Efecto del balance de las lámparas LED a diferentes intensidades lumínicas en la concentración nutrimental de NO_3^- en el fruto de fresa (*Fragaria x ananassa* Duch) en un sistema vertical, en función de la concentración de Ca en la solución nutritiva.

Avendaño-Abarca *et al.*, (2022) reportan que al utilizar intensidades lumínicas similares de 434.9, 420.6 y 427.5 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ pero con distintos balances de luz azul, verde y roja no afectó la concentración de NO_3^- en el fruto de fresa, por lo que nuestros resultados no concuerdan al tener mejor concentración con 300 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Así mismo He *et al.*, (2015) informa que en col verde china (*Brassica alboglabra*) al tener intensidades de 300, 600 y 1200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ obtuvieron mayor concentración de NO_3^- con la intensidad lumínica de 300 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ a lo que es similar a nuestros resultados.

La interacción entre las intensidades lumínicas con los niveles de Ca en la SN muestra que al ir elevando la intensidad se presenta una reducción en el Ca^{2+} en los frutos, excepto cuando la SN contenía 7 meq de Ca (Figura 10). Esto puede deberse a un efecto de concentración del elemento nutrimental ya que en este

tratamiento se produjeron bajos rendimientos por lo que el Ca absorbido pudo concentrarse al haber menos frutos. La mayor concentración de K^+ se presenta en frutos de plantas tratadas 9 meq de Ca en la SN y $600 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Figura 11), mientras que la mayor concentración de NO_3^- se presentó en plantas con $300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y 11 meq de Ca (Figura 12), lo cual coincide con las plantas que produjeron el mayor rendimiento (Figura 2).

V. CONCLUSIONES

De acuerdo a lo planteado en ésta investigación, se puede concluir que la fresa cultivada en condiciones de agricultura vertical en ambiente controlado bajo diferentes niveles de intensidad lumínica, así como de concentraciones de Ca en la solución nutritiva dio como resultado que a una concentración de 11 meq/L con una intensidad lumínica de $300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ fue la óptima. Lo anterior se relacionó a un mayor rendimiento de fruto, así como a un alto contenido de sólidos solubles totales y NO_3^- , sin embargo, la biomasa de la parte vegetativa disminuyó.

VI. LITERATURA CITADA

- Abdallah, A. F. (2015). Algunos aspectos sobre nutrición de la fresa hidropónica. 2 p.
- An, S. K., Kim, Y. J., & Kim, K. S. (2013). Inhibition of inflorescence initiation in immature *Doritaenopsis* Queen Beer 'Mantefon' by photoperiod and temperature. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 54, 223-227 p.
- Aquino, M. A. Z. (2015). Manual de hidroponía. 52 p.
- Avendaño-Abarca, V. H., Alvarado-Camarillo, D., Valdez-Aguilar, L. A., Sánchez-Ortíz, E. A., González-Fuentes, J. A., & Cartmill, A. D. (2022). Response of strawberry to the substitution of blue light by green light in an indoor vertical farming system. *Agronomy*, 13(1), 99 p.
- Beltrano, J., y Gimenez, D. O. (2015). Cultivo en hidroponía. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP). 180 p.
- Benke, K., & Tomkins, B. (2017). Future food-production systems: vertical farming and controlled-environment agriculture. *Sustainability: Science, Practice and Policy*, 13(1), 13-26 p.
- Bogotá, C. D. C. (2015). Manual de fresa. Programa de apoyo agrícola y agroindustrial. 1-11 p.
- Bolda, M., Dara, S., Soto, J., Sánchez, M., Peterson, K., y Barnum, L. (2015). Manual de producción de fresa para los agricultores de la Costa central. California, Estados Unidos.
- Bures, S., Gavilán, M. U., y Kotiranta, S. (2018). Iluminación artificial en agricultura. 46 p.

- Butturini, M., & Marcelis, L. F. (2020). Vertical farming in Europe: Present status and outlook. *Plant Factory*, 77-91 p.
- Dixon, E. K., Strik, B. C., Fernandez-Salvador, J., & DeVetter, L. W. (2019). *Strawberry nutrient management guide for Oregon and Washington*. Oregon State University Extension Service.
- Dussi, M.C. (2007). Intercepción y distribución lumínica en agroecosistemas frutícolas. En: Sozzi, G.O. (ed.). 2007. Árboles frutales: ecofisiología, cultivo y aprovechamiento. Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires. 200- 241 p.
- Edger, P. P., Poorten, T. J., VanBuren, R., Hardigan, M. A., Colle, M., McKain, M. R., & Knapp, S. J. (2019). Origin and evolution of the octoploid strawberry genome. *Nature genetics*, 51(3), 541-547 p.
- Eigenbrod, C., & Gruda, N. (2015). Urban vegetable for food security in cities. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 35, 483-498 p.
- Enríquez, G. (2005). Manual práctico de alumbrado. México: Limusa. 4- 14 p.
- Escorcía, L. A. (2018). Incremento de la calidad de fresa mediante concentraciones de K y Ca en la solución nutritiva. Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Nayarit. 30 p.
- Espino, L. F. D., González, P. A. D., Jofre, A. E., y Martínez, G. T. O. M. (2017). Fresa, deficiencias y síntomas nutricionales “una guía visual para fertilizar”. Folleto técnico, (36), 34 p.
- Ferrante, A., & Mariani, L. (2018). Agronomic management for enhancing plant tolerance to abiotic stresses: High and low values of temperature, light intensity, and relative humidity. *Horticulturae*, 4(3), 21 p.

- Ferrarezi, R. S., Weaver, G. M., Van Iersel, M. W., & Testezlaf, R. (2015). Subirrigation: Historical overview, challenges, and future prospects. *HortTechnology*, 25(3), 262-276 p.
- Flores-Pérez, S., Castillo-González, A. M., Valdez-Aguilar, L. A., & Avítia-García, E. (2021). Use of different proportions of red and blue LEDs to improve the growth of *Lilium* spp. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 12(5), 835-847 p.
- Fussy, A., & Papenbrock, J. (2022). An overview of soil and soilless cultivation techniques chances, challenges and the neglected question of sustainability. *Plants*, 11(9), 1153 p.
- Gonzalías, Y. R., y Lasso, E. R. (2016). Desarrollo de un sistema de iluminación artificial LED para cultivos en interiores-vertical farming (VF). *Informador técnico*, 80(2), 111-120 p.
- Goswami, B., & Yadav, V. (2022). Soil-less culture (hydroponics) a review. *Just Agric*, 2(12), 1-12 p.
- Guiamba, H. D. S. S., Zhang, X., Sierka, E., Lin, K., Ali, M. M., Ali, W. M., & Xu, Y. (2022). Enhancement of photosynthesis efficiency and yield of strawberry (*Fragaria ananassa* Duch.) plants via LED systems. *Frontiers in Plant Science*, 17 p.
- Harris, K. D., & Lavanya, L. (2016). Influence of foliar application of boron the quality of tomato. *Research Journal of Agriculture and Forest*, 4(7), 1-5 p.
- Hatfield, J. L., & Prueger, J. H. (2015). Temperature extremes: Effect on plant growth and development. *Weather and climate extremes*, 10, 4-10 p.
- He, J., Lim, L. I., & Qin, L. (2015). Growth irradiance effects on productivity, photosynthesis, nitrate accumulation and assimilation of aeroponically grown *Brassica alboglabra*. *Journal of Plant Nutrition*, 38(7), 1022-1035 p.

- Hidaka, K., Dan, K., Imamura, H., Miyoshi, Y., Takayama, T., Sameshima, K., & Okimura, M. (2013). Effect of supplemental lighting from different light sources on growth and yield of strawberry. *Environmental Control in Biology*, 51(1), 41-47 p.
- Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). (2017). Manual de buenas prácticas agrícolas y de producción para el cultivo de la fresa. 72 p.
- Juárez-Rosete, C. R. (2007). Comparación de tres sistemas de producción de fresa en invernadero. *Revista terra latinoamericana*, 25(1), 17-23 p.
- Khalil, N. H., & Hammoodi, J. K. (2021). Effect of nitrogen, potassium and calcium in strawberry fruit quality. *Journal of Agricultural and Statistical Sciences*. 16-1967 p.
- Kleszcz, J., Kmiecik, P., & Swierzawski, J. (2020). Vegetable and gardening tower of othmar ruthner in the voivodeship park of culture and recreation in chorzów the first example of vertical farming in poland. *Sustainability*, 12(13), 23 p.
- Kozai, T. (2016). *¿Por qué iluminación LED para la agricultura urbana?* 3-18 p.
- Kozai, T., & Niu, G. (2020). Role of the plant factory with artificial lighting (PFAL) in urban areas. In *Plant Factory*. 7-34 p.
- Kozai, T., Niu, G., & Takagaki, M. (2019). *Plant factory: an indoor vertical farming system for efficient quality food production*. Academic press. 35-68 p.
- Lakhiar, I. A., Gao, J., Syed, T. N., Chandio, F. A., & Buttar, N. A. (2018). Modern plant cultivation technologies in agriculture under controlled environment: A review on aeroponics. *Journal of plant interactions*, 13(1), 338-352 p.

- Linker, R., Kacira, M., & Arbel, A. (2011). Robust climate control of a greenhouse equipped with variable-speed fans and a variable-pressure fogging system. *biosystems engineering*, 110(2), 153-167 p.
- Maeda, K., & Ito, Y. (2020). Effect of different PPFs and photoperiods on growth and yield of everbearing strawberry 'Elan' in plant factory with white LED lighting. *Environmental Control in Biology*, 58(4), 99-104 p.
- Matysiak, B., Kaniszewski, S., Dyśko, J., Kowalczyk, W., Kowalski, A., & Grzegorzewska, M. (2021). The impact of LED light spectrum on the growth, morphological traits, and nutritional status of 'Elizium' romaine lettuce grown in an indoor controlled environment. *Agriculture*, 11(11), 1133 p.
- Mendoza-Paredes, J., Castillo-González, A. M., Avitia-García, E., Valdéz-Aguilar, L. A., y García-Mateos, M. D. R. (2021). Efecto de diferentes proporciones de luz LED azul: roja en plantas de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.). *Biotecnia*, 23(1), 110-119 p.
- Mir, M. S., Naikoo, N. B., Kanth, R. H., Bahar, F. A., Bhat, M. A., Nazir, A., & Ahngar, T. A. (2022). Vertical farming: The future of agriculture: A review. *Pharma Innov. J*, 11, 1175-1195 p.
- Morales, C. G., y Riquelme, J. (2017). Manual de manejo agronómico de la frutilla. 100 p.
- Muñoz A. J. C. (2017). Identificación y caracterización de genes implicados en la floración y el estolonado en fresa (*Fragaria x ananassa* Duch.). Tesis de doctorado, Universidad de Málaga. 53 p.
- Nava-Martínez, E., Villegas-Torres, O. G., Alia-Tejacal, I., López-Martínez, V., Acosta-Durán, C. M., Andrade-Rodríguez, M., y Guillén-Sánchez, D. (2009). Crecimiento de plántulas de tomate en soluciones nutritivas con

- diferente concentración de calcio. *Investigación Agropecuaria*, 6(2), 195-204 p.
- Ohyama, T. (2010). Nitrogen as a major essential element of plants. *Nitrogen Assim. Plants*, 37, 1-17 p.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2017). El estado mundial de la agricultura y la alimentación. 1-26 p.
- Pandav, A. K., Nalla, M. K., Aslam, T., Rana, M. K., & Bommes, J. C. (2016). Effect of foliar application of micronutrients on growth and yield parameters in Eggplant cv HLB 12. *significance*, 1(1.63), 1-55 p.
- Pandey, R. (2015). Mineral nutrition of plants. *Plant Biology and Biotechnology: Volume I: Plant Diversity, Organization, Function and Improvement*, 499-538 p.
- Prasad, R., Lisiecka, J., & Kleiber, T. (2022). Morphological and yield parameters, dry matter distribution, nutrients uptake, and distribution in strawberry (*Fragaria x ananassa* Duch.) cv. 'Elsanta' as influenced by spent mushroom substrates and planting seasons. *Agronomy*, 12(4), 854 p.
- Rangel, S. E. (2011). Intensidad luminosa y ácido giberélico en la producción de anturio para flor de corte. Tesis de doctorado, Colegio de postgraduados. 86 p.
- Rocha, N. A. (2014). Crecimiento y desarrollo de tres variedades de fresa en tres tipos de sustrato. Tesis de maestría, Centro de Investigación en Química Aplicada. 51 p.
- Roudeillac, P., & Trajkovski, K. (2003). Breeding for fruit quality and nutrition in strawberries. In *Euro Berry Symposium-COST-Action 836 Final Workshop 649*. 55-60 p.

- Sidhu, M. K., Raturi, H. C., Kachwaya, D. S., y Sharma, A. (2019). Role of micronutrients in vegetable production: A review. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 8(1S), 332-340 p.
- Swain, A., Chatterjee S., Viswanath, M., Roy, A., & Biswas A. (2021). Hydroponics in vegetable crops: A review. 10(6). 629-634 p.
- Trejo-Téllez, L. I., & Gómez-Merino, F. C. (2014). Nutrient management in strawberry: Effects on yield, quality and plant health. *Strawberries: Cultivation, Antioxidant Properties and Health Benefits*. Nova Science Publishers, Nathan Malone (Ed.), 239-67 p.
- Van Gerrewey, T., Boon, N., & Geelen, D. (2021). Vertical farming: ¿the only way is up? *Agronomy* 2022, (12), 2. 15 p.
- Yoshida, H., Mizuta, D., Fukuda, N., Hikosaka, S., & Goto, E. (2016). Effects of varying light quality from single-peak blue and red light-emitting diodes during nursery period on flowering, photosynthesis, growth, and fruit yield of everbearing strawberry. *Plant Biotechnology*, 33(4), 267-276 p.

6.1 Citas electrónicas

- Department of Agriculture (USDA). (2019, abril 01). Strawberries, raw. Recuperado el 09 de noviembre de 2022, de <https://fdc.nal.usda.gov/fdc-app.html#/food-details/167762/nutrients>
- EcuRed. (2019, mayo 08). Fresa de huerto. Recuperado el 15 de octubre de 2022, de https://www.ecured.cu/index.php?title=Fresa_de_huerto&oldid=3366555.
- Google Maps. (2023). Departamento de Ciencias del Suelo. Recuperado el 10 de enero de 2023, de

<https://verdecompacto.com/en/home/https://www.google.com.mx/maps/place/Departamento+de+Ciencias+del+suelo/@25.3536935>

Karma Verde Fresh (KVF). (2023). La agricultura vertical del futuro desarrollada en México. Recuperado el 05 de enero de 2023, de <https://karmaverdefresh.com/>

Lira, R. (2022, enero 22). Agricultura protegida vertical. Centro de Investigación en Química Aplicada. Recuperado el 4 de febrero de 2023, de <https://ciqa.edu.mx/AgriculturaPV.aspx>

Mordor intelligence. (2023). Mercado agrícola vertical de México: crecimiento, tendencias, impacto de COVID-19 y pronósticos (2022 - 2028). Recuperado el 04 de enero de 2023, de <https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/mexico-vertical-farming-market-industry>

SADER. (2022, octubre 22). ¿Qué quiere la niña fresa? México y su producción nacional. Recuperado el 30 de noviembre de 2022, de <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/que-quiere-la-nina-fresa-mexico-y-su-produccion-nacional>

Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). (2019, septiembre 11). Berries mexicanas, consentidas en el mundo. Recuperado el 2 de octubre de 2022, de <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/berries-mexicanas-consentidas-en-el-mundo-226756>

Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). (2017). Planeación agrícola nacional 2017-2030. Fresa mexicana. Recuperado el 05 de octubre de 2022, de <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/257075/Potencial-Fresa.pdf>

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2018, diciembre 07). Fresa mexicana: un producto con reconocimiento a nivel internacional. Recuperado el 05 de octubre de 2022, de <https://www.gob.mx/agricultura/aguascalientes/articulos/fresa-mexicana-un-producto-con-reconocimiento-a-nivel-internacional?idiom=es>

SIAP. (2016, abril 29). Hidroponía ¿Sabes qué es y cómo funciona? Recuperado el 4 de diciembre de 2022 de <https://www.gob.mx/siap/articulos/hidroponia-sabes-que-es-y-como-funciona>

SIAP. (2022). Panorama Agroalimentario. Recuperado el 4 de diciembre de 2022, de https://nube.siap.gob.mx/gobmx_publicaciones_siap/pag/2022/Panorama-Agroalimentario-2022

SIAP. (2023, enero 07). Ninguna como la muy fresa. Recuperado el 8 de octubre de 2022, de <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/ninguna-como-la-muy-fresa>

Verde Compacto (Verdecompacto). (2020, septiembre 16). Making vertical farming accessible to grow more food anytime anywhere. Recuperado el 10 de enero de 2023, de <https://verdecompacto.com/en/home/>