



MEDIO AMBIENTE
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES



IMTA
INSTITUTO MEXICANO
DE TECNOLOGÍA DEL AGUA

**COORDINACION DE DESARROLLO PROFESIONAL E
INSTITUCIONAL**

SUBCOORDINACIÓN DE POSGRADO

T E S I S

**ELEMENTOS VALORATIVOS PARA ESTABLECER
BIOSISTEMAS EN EDIFICACIONES, USANDO MODELOS
NUMERICOS**

que para obtener el grado de
Maestro en
Ciencias y Tecnología del Agua

presenta
Daniel Fuentes Morales

Tutor: Dr. Jorge Flores Velázquez

Jiutepec, Morelos

2021





Con fundamento en los artículos 21 y 27 de la Ley Federal del Derecho de Autor y como titular de los derechos moral y patrimoniales de la obra titulada “ELEMENTOS VALORATIVOS PARA ESTABLECER BIOSISTEMAS EN EDIFICACIONES, USANDO MODELOS NUMÉRICOS”, otorgo de manera gratuita y permanente al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, autorización para que fijen la obra en cualquier medio, incluido el electrónico, y la divulguen entre su personal, estudiantes o terceras personas, sin que pueda percibir por tal divulgación una contraprestación.

NOMBRE Y FIRMA DEL ESTUDIANTE

Daniel Fuentes Morales

Jiutepec, Morelos a 30 de julio de 2021





MAESTRÍA EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍA DEL AGUA

Ante el Jurado integrado por:

- Presidente: Dr. Ariosto Aguilar Chávez
Secretario: Dr. Rodrigo Roblero Hidalgo
Vocal 1: Dr. Jorge Flores Velázquez
Vocal 2: Dr. Noé Velázquez López
Vocal 3: Dr. Cruz Ernesto Aguilar Rodríguez

Tutor de tesis

Dr. Jorge Flores Velázquez

Jiutepec, Morelos, México, agosto 2021
Instituto Mexicano de Tecnología de Agua



Resumen

En el mercado existen diversas lámparas LED para cultivos y microcontroladores que pueden ser adquiridos a bajo costo, sin embargo, en México se carece de investigaciones sobre su uso en la producción de lechuga en el interior de edificios. El objetivo de este estudio fue evaluar un sistema de agricultura vertical en el interior de una edificación, usando lámparas LED comerciales, cloud computing, hardware y software libre. La lechuga se sometió a tres intensidades de luz con diferentes espectros de acuerdo a lámparas LED comerciales en una granja vertical automatizada con Arduino donde se tomaron datos de temperatura y humedad del interior del edificio. Después de 30 días de crecimiento se midió la altura de la planta, largo de la hoja, ancho de la hoja, número de hojas y peso fresco, con dichas mediciones se realizó un análisis de varianza unidireccional (ANOVA) y se empleó el método de comparación múltiple de Duncan mediante un algoritmo diseñado en Python. De acuerdo a los resultados el mayor peso fresco se observó para una intensidad de luz de 5700 luxes. En el tratamiento de 2100 luxes se observó la mayor altura de la planta y fue el tratamiento con mayor consumo energético. El bajo costo de Arduino y el módulo esp8266 los hacen ideales para automatizar y monitorear una granja vertical. La producción de lechugas en el interior de edificios urbanos es técnicamente viable, sin embargo, las lámparas comerciales utilizadas en el estudio carecen de la intensidad de luz suficiente para un desarrollo correcto del cultivo.

Palabras clave: Hidroponía, fotoperiodo, agricultura de precisión, IoT, agricultura inteligente

Contenido

Capítulo 1 Introducción.....	2
Objetivos.....	4
Objetivo general:	4
Objetivos específicos:.....	4
Capítulo 2 Marco teórico	5
2.1. Agricultura Urbana.....	5
2.1.1. Muros verdes	5
2.1.2. Techos verdes	5
2.1.3. Granjas Verticales.....	6
2.2 Componentes de una granja vertical.....	8
2.2.1. Sistema de monitoreo y control.....	8
2.2.2. Sistema de calefacción, ventilación y aire acondicionado	10
2.2.3. Sistema de producción	10
2.2.4. Sistema de iluminación LED	15
2.3. Requerimientos agronómicos de la lechuga	17
2.3.2. Temperatura y humedad del aire	19
2.3.2. Solución nutritiva.....	19
2.3.3. Temperatura de la solución nutritiva	21
2.3.4. PH.....	21
2.3.5. CE	21
2.3.6. Oxígeno disuelto	21
2.3.7. Iluminación	22
Capítulo 3 Materiales y métodos	26
3.1. Sistema productivo	27
3.2. Sistema de iluminación	28
3.3. Sistema de monitoreo y control	29
3.3.1. Sistema IoT.....	30
3.3.2. Servidor y Usuario	31
3.4. Análisis estadístico.....	33
Capítulo 4 Resultados: Análisis y discusión	34
4.1. Software para el monitoreo de variables y análisis estadístico	34
4.2. Sistema de monitoreo y control	36

4.3. Lechuga Romana.....	38
4.3.1. Clima.....	38
4.3.2. Desarrollo morfológico.....	39
4.3.3. Consumo hídrico.....	41
4.3.4. Consumo eléctrico.....	41
4.4. Lechuga Sangría	42
4.4.1. Clima.....	42
4.4.2. Desarrollo morfológico.....	43
4.4.3. Consumo hídrico.....	45
4.4.4. Consumo eléctrico.....	46
Capítulo 5 Conclusiones.....	47
Capítulo 6 Limitaciones y Recomendaciones.....	48
Literatura citada	49

Lista de Figuras

Figura 1. Sistemas de los que está compuesta una graja vertical.	8
Figura 2. Sistemas de monitoreo y control.....	9
Figura 3. Arquitectura Cliente-Servidor.....	10
Figura 4. Medios de germinación.....	13
Figura 5. Clasificación de sustratos empleados en sistemas hidropónicos.	13
Figura 6. Lámparas o tiras LED conectadas en paralelo.....	15
Figura 7. Lámparas o tiras LED conectadas en serie.....	15
Figura 8. Fuente de alimentación DC 12 V de 2 A con protección IP 44.	16
Figura 9. Fuente de alimentación DC 5 V de 20 A con protección IP20.	16
Figura 10. Fuente de alimentación DC 5 V de 20 A con protección IP67.	17
Figura 11. Butterhead lettuce.....	18
Figura 12. Crisphead lettuce.....	18
Figura 13. Cos lettuce.....	18
Figura 14. Cutting lettuce.....	19
Figura 15. Medidores de pH y sensor.....	21
Figura 16. Espectro de absorción de los principales pigmentos.....	23
Figura 17. Estructura molecular de la clorofila a y b.....	24
Figura 18. Composición de la graja vertical de este estudio.....	26
Figura 19. Granja vertical desarrollada.....	27
Figura 20. Plántulas de lechuga sangría cultivada en espuma agrícola.....	28
Figura 21. Funcionamiento del sistema de monitoreo y control de bajo costo basado en Arduino.....	30
Figura 22. Gabinete de control del sistema IoT de bajo costo basado en Arduino.....	30
Figura 23. Arquitectura Cliente-Servidor.....	31
Figura 24. Servidor de la aplicación web.....	32
Figura 25. Arquitectura de la aplicación web.....	32
Figura 26. Diagrama de flujo para el análisis ANOVA y Duncan.....	33
Figura 27. Software para el procesamiento de datos tomados por Arduino.....	34
Figura 28. Comparación entre RStudio y el software desarrollado.....	35
Figura 29. Resultados de análisis Duncan en el software desarrollado.....	35
Figura 30. Datos en tiempo real para monitorear la fábrica de plantas.....	36
Figura 31. Graficas de los datos obtenidos por los sensores en las últimas 24 horas.....	37

Figura 32. Datos que muestran el sistema de oxigenación encendido.	37
Figura 33. Datos que muestran el sistema de iluminación encendido.	38
Figura 34. Temperatura y humedad en el interior (A) y exterior (B) del edificio para un ciclo de lechuga de 40 días.	39
Figura 35. Tratamientos con luces led de lámparas comerciales en México a los que se sometió la lechuga romana.	39
Figura 36. Efectos morfológicos por la de la intensidad de luz.	40
Figura 37. Rendimiento (A) y consumo de agua (B) de la lechuga.	41
Figura 38. Temperatura y humedad en el interior (A) y exterior (B) del edificio para un ciclo de lechuga de 40 días.	43
Figura 39. Tratamientos con luces LED de lámparas comerciales en México a los que se sometió la lechuga sangría.....	43
Figura 40. Efectos morfológicos por la de la intensidad de luz.	45
Figura 41. Rendimiento (A) y consumo de agua (B) de la lechuga.	45

Lista de Tablas

Tabla 1. Módulos de bajo costo.....	9
Tabla 2. Medios de germinación.....	12
Tabla 3. Composición de solución A para hortalizas de hoja y de Yamazaki para lechuga.	20
Tabla 4. Composición de solución B para hortalizas de hoja y de Yamazaki para lechuga.	20
Tabla 5. Tipos y presencia de clorofilas en los organismos fotosintéticos	22
Tabla 6. Rendimientos obtenidos en una granja vertical en interiores para una intensidad de luz determinada, un fotoperiodo y un espectro de onda, reportados por estudios recientes.....	25
Tabla 7. Composición mineral de la solución nutritiva.	28
Tabla 8. Tratamientos a los que se sometió la lechuga.....	29
Tabla 9. Sensores que contiene la granja vertical.	31
Tabla 10. Intensidad de luz Vs crecimiento de la lechuga 30 días después del trasplante (n = 4).	40
Tabla 11. Peso fresco de lechuga orejona cultivada durante 30 días en la granja vertical, consumo de electricidad de las lámparas LED y la productividad de peso fresco por kWh.....	42
Tabla 12. Intensidad de luz Vs crecimiento de la lechuga 30 días después del trasplante (n = 5).	44
Tabla 13. Peso fresco de lechuga sangría cultivada durante 30 días en la granja vertical, consumo de electricidad de las lámparas LED y la productividad de peso fresco por kWh.....	46

Notación

AC	Corriente Alterna
CE	Conductividad eléctrica
Chl-a	Clorofila a
Chl-b	Clorofila b
DC	Corriente Directa
HR	Humedad Relativa
HVAC	Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado
IoT	Internet de las Cosas
LED	Light emitting diodes
NFT	Nutrient Film Technique
OD	Oxígeno disuelto
pH	Potencial de hidrógeno
EE	Error estándar

Capítulo 1

Introducción

Se estima que para el 2050 el 70 por ciento de la población del mundo vivirá en zonas urbanas y pasará de 7 mil millones de personas a más de 9 mil millones (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos, 2012), por lo que se requerirá aproximadamente un 50% más de alimentos (Pinstrup-Andersen, 2018). En México se estima que la población llegará a 150.8 millones de personas (de Anda & Shear, 2017). Se ha propuesto el uso de granjas verticales urbanas para atender la creciente demanda de alimentos haciendo uso eficiente de los recursos (Pinstrup-Andersen, 2018; Benke & Tomkins, 2017; Beacham *et al.*, 2019).

En las granjas verticales se estima el uso de hasta un 97% menos de agua durante un año en comparación a la agricultura tradicional, debido al uso de sistemas hidropónicos y un control del microclima en el interior de los edificios permitiendo reducir la evapotranspiración (Sills & Serbin, 2018). Producir cultivos de forma vertical permite obtener un mayor rendimiento al hacer un uso eficiente del suelo (Eigenbrod & Gruda, 2015). El uso de luces LED permite que se cultiven alimentos en almacenes, edificios y casas, contribuyendo en la no deforestación de nuevas áreas para la producción de alimentos (Sills & Serbin, 2018).

La lechuga es una de las hortalizas más cultivadas en el mundo con un alto valor nutrimental (Still, 2007) y por sus requerimientos agronómicos se cultiva en sistemas bajo tecnologías disruptivas en agricultura urbana o en interiores (Specht *et al.*, 2014). Para su producción en granjas verticales es necesario encontrar la intensidad de luz, longitud de onda y fotoperíodo de las luces LED que permitan obtener el máximo rendimiento con el mínimo consumo de energía (Loconsole *et al.*, 2019). Zhang *et al.* (2018) recomiendan usar una intensidad de luz de $250 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (PPFD-Photosynthetic photon flux density) con un fotoperíodo de $16/8 \text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$ (luz/oscuridad), de acuerdo al crecimiento y consumo de energía de las luces LED usadas en su estudio de lechuga de hoja morada (*Lactuca sativa* L. cv. Ziwei). En otro estudio el mejor crecimiento se obtuvo con una intensidad de luz de 290 PPFD y un fotoperíodo de $6/2 \text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$, para intensidades de luz más bajas, el mejor crecimiento se

observó con la combinación de 230 PPFD y los fotoperiodos de 18/6 h.d⁻¹ y 9/3 h.d⁻¹ (Kang *et al.*, 2013).

Otro factor importante que influye en el desarrollo de la lechuga es la temperatura, al ser un cultivo de estación fría, si es expuesto a temperaturas altas se reduce la acumulación de biomasa, se produce el alargamiento del tallo y se desarrollan cabezas más sueltas, si no se reduce la temperatura se provocará atornillado y emisión de tallo floral (Saavedra *et al.*, 2017; Al-said *et al.*, 2018). Durante la germinación la temperatura optima es de 15 °C a 20 °C (Resh, 2013). Después del trasplante las temperaturas óptimas varían de 17 a 28 °C en el día y de 3 a 12 °C en la noche (Wurr *et al.*, 1992).

Además de los factores ambientales la automatización de una granja vertical es un factor importante a tomar en cuenta ya que la agricultura de precisión usa sensores y software con el fin de optimizar el uso de recursos y obtener la mayor producción (Shafi *et al.*, 2019), en este sentido es importante monitorear los cultivos, el Internet de las Cosas (IoT, Inthernet Of Things) lo permite hacer de manera remota a través de aplicaciones web (Chin & Audah, 2017). En el mercado podemos encontrar sistemas comerciales de monitoreo y control de granjas verticales basados en IoT pero en el caso de granjas pequeñas que suministran productos frescos a restaurantes, las de autoconsumo y las de fines académicos no existe un sistema accesible (Ruscio *et al.*, 2019). Las TIC basadas en hardware y software libres han dado lugar a una solución de alta fiabilidad y bajo costo en términos de inversión y operación (Fernández *et al.*, 2019), una opción viable es desarrollar un sistema basado en Arduino ya que es el ecosistema de hardware y software de código abierto más comercial (Cuauhtemoc, 2019). Chin y Audah (2017) desarrollaron un sistema basado en el microcontrolador BeagleBone Black (BBB) y Thingspeak una plataforma basada en la nube. Ruscio *et al.* (2019) desarrollaron un sistema basado en Raspberry Pi 3 y una plataforma web desarrollada en mysql, php y javascript.

En el mercado existen diversas lámparas LED que no fueron diseñadas para producir lechuga, sin embargo, se pueden adquirir a un bajo costo, en México se carece de investigaciones sobre su uso en granjas verticales establecidas en climas cálidos. Para contribuir al manejo de cultivos en esas condiciones se plantea como objetivo analizar el impacto de la temperatura e intensidad de luz en la producción de lechuga sangría hidropónica en el interior de un edificio usando una granja vertical instrumentada a bajo costo.

Objetivos

Objetivo general:

Evaluar un sistema de agricultura vertical en el interior de una edificación, usando lámparas LED comerciales, cloud computing, hardware y software libre.

Objetivos específicos:

- Implantar un sistema de agricultura vertical en interiores monitoreado y automatizado con Arduino.
- Evaluar el comportamiento de la lechuga con diferentes intensidades de luz artificial de lámparas LED comerciales.

Capítulo 2

Marco teórico

Este capítulo proporciona el marco teórico de esta tesis, incluidos los antecedentes de la producción de lechuga en fábrica de plantas con luces LED y hallazgos relacionados presentados en la literatura revisada.

2.1. Agricultura Urbana

2.1.1. Muros verdes

Algunos de los beneficios que podemos encontrar al utilizar este tipo de sistemas son los siguientes:

Confort térmico: Las capas de los muros verdes ayudan a reducir la velocidad del viento afectando la resistencia térmica del edificio ayudando a disminuir los costos en calefacción y refrigeración (Perini *et al.*, 2011).

Reducción de ruido: De acuerdo a la cobertura vegetal y el grosor del muro ayudan a la reducción del ruido (Rakhshandehroo *et al.*, 2015).

Rendimiento: La producción de cultivos en muros se puede incrementar considerablemente comparado con la producción tradicional, llegando a oscilar entre 1 y 5 veces la tasa de productividad promedio (Nagle *et al.*, 2017).

2.1.2. Techos verdes

La mejora del confort interno de los edificios fue la principal ventaja en la instalación de los techos verdes, en climas fríos contribuyeron al aislamiento térmico del techo, mientras que en climas cálidos protegieron el techo del sobrecalentamiento debido a su mayor exposición solar en verano. Actualmente los techos verdes han traído otras mejoras al considerar su papel como ecosistema urbano. Se han llevado a cabo un número relativamente grande de experimentos y modelos para investigar el comportamiento de los techos verdes como un sistema integrado de medio ambiente y construcción (Contreras & Villegas, 2019; López, *et al.*, 2020; Theodosiou, 2009).

Algunos de los beneficios que podemos encontrar son los siguientes:

Manejo de escurrimiento de aguas pluviales: El aumento del cambio de uso de suelo a zonas pavimentadas como producto de la creciente urbanización mal planificada han contribuido a las inundaciones al verse saturados los drenajes de las grandes ciudades (Jha *et al.* 2012). Los techos verdes son una alternativa para disminuir la escorrentía provocada por la lluvia ya que la cubierta de plantas retiene un porcentaje de la precipitación anual que puede variar del 10 al 60% (Shafique *et al.*, 2018). Los techos verdes reducen de mejor manera la escorrentía para tormentas de corta duración y alta intensidad que para tormentas de larga duración y baja intensidad (Berghage *et al.*, 2009).

Mejora de la calidad del aire: Las capacidades de fijación de carbono y liberación de oxígeno dependen de las plantas utilizadas en el techo verde. Cuando se mantiene una cobertura vegetal del 50%, la concentración de CO₂ en el aire puede mantenerse en 320 ppm. Los techos verdes son capaces de remover hasta 85 kg/ha/año de contaminantes del aire (O₃, NO₂, PM₁₀, SO₂) (Yang *et al.*, 2008). Esta técnica debe ser implementada con otras medidas de control de la contaminación debido a su alto costo de construcción y mantenimiento.

Reducción de ruido: La absorción de ruido depende de la estratigrafía utilizada, se ha demostrado que el coeficiente de absorción acústica es mayor en techos verdes a comparación a techos de concreto (Pittaluga *et al.*, 2011). En un rango de frecuencias de 50-2000 Hz los techos verdes aumentan un aislamiento acústico hasta de 13 dB (Connelly & Hodgson, 2008).

2.1.3. Granjas Verticales

General Electric (2018) definen la agricultura vertical como: “Producción de ambiente controlado en interiores (CEP), donde el productor puede controlar estrictamente cada elemento: luz, agua, temperatura, CO₂, nutrientes, etc., para maximizar el rendimiento de su cosecha elegida”.

Algunos de los beneficios que podemos encontrar son los siguientes:

Agua: Con la posibilidad de controlar el microclima en el interior del edificio la evapotranspiración disminuirá y junto con la implementación de sistemas hidropónicos o aeropónicos se hace más eficiente el uso del agua. Se necesita hasta un 97% menos de agua durante un año en una granja vertical que en las condiciones al aire libre (Sills & Serbin, 2018).

Uso de suelo: La producción vertical permite obtener un mayor rendimiento utilizando menos superficie (Eigenbrod & Gruda, 2015). El uso de luces LED permite

que se cultiven alimentos en edificios abandonados y hogares, dedicando el espacio no utilizado previamente a un propósito, esto contribuye en la no deforestación de nuevas áreas para la producción de alimentos y tener productos frescos en menor tiempo, reduciendo costos de transporte (Sills & Serbin, 2018).

Uso de químicos: Con el uso de hidroponía en la agricultura vertical se evita el escurrimiento de fertilizantes. Esto elimina la progresión de los problemas ambientales relacionados con el escurrimiento agrícola. Dado que las granjas verticales están en el interior, los granjeros pueden controlar casi por completo las condiciones dentro de la granja y, por lo tanto, contener cualquier subproducto dañino del proceso de cultivo. Las plagas y, posteriormente, los pesticidas no se encuentran dentro de las instalaciones agrícolas verticales, porque las plagas no pueden acceder a los cultivos en una cantidad lo suficientemente prolífica como para ser un problema. Los fertilizantes y pesticidas son a menudo una parte costosa de la agricultura tradicional y, dado que no son un problema en la agricultura vertical, el dinero se puede aplicar a los sistemas de iluminación o acuaponía en la industria agrícola vertical (Sills & Serbin, 2018).

Rendimiento: Producir cultivos de forma vertical permite obtener un mayor rendimiento al hacer un uso eficiente del suelo (Eigenbrod & Gruda, 2015). Cuando se compara con un invernadero tradicional, una granja vertical permite más rendimiento debido a que los niveles de luz, temperatura, humedad y dióxido de carbono (CO₂) se pueden optimizar sin verse afectados por el clima.

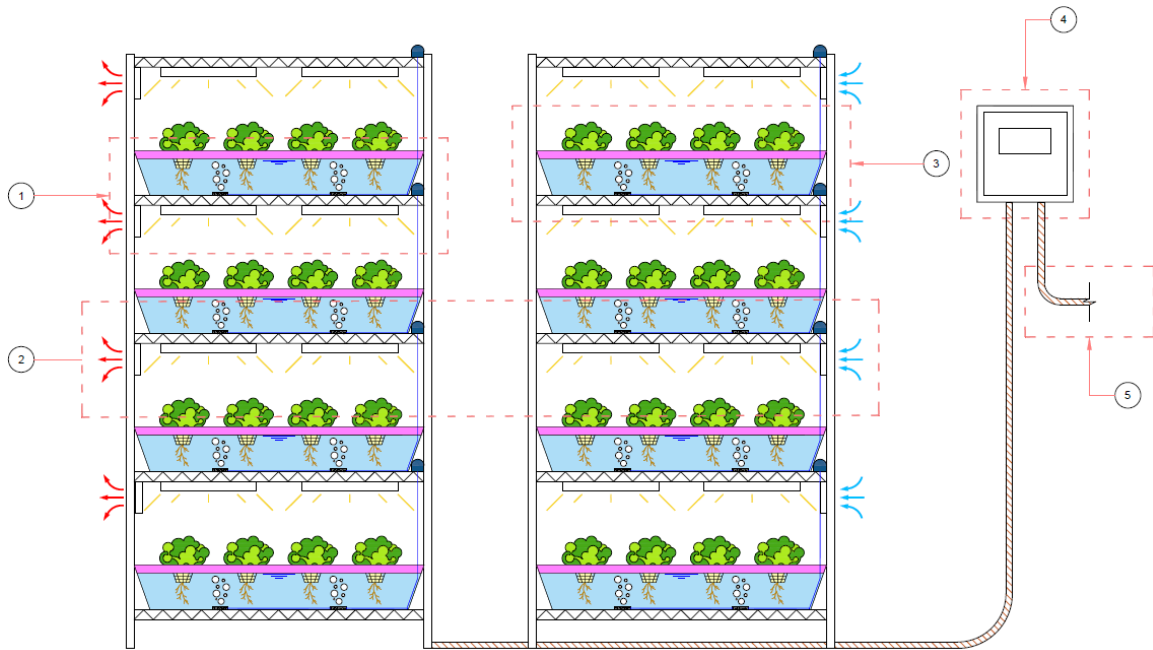
Algunas de las desventajas que podemos encontrar son las siguientes:

Costo inicial: La inversión inicial de una granja vertical suele ser alta debido a la tecnología empleada y a la edificación. Si la producción se lleva a pequeña escala dentro de casas, restaurantes o universidades el costo de la estructura se puede reducir usando las instalaciones previamente construidas. A mediana escala se pueden usar bodegas abandonadas o contenedores marítimos en desuso. En producciones a gran escala el costo de la edificación suele ser alto en algunas zonas urbanas (Benke & Tomkins, 2017; Beacham, *et al.*, 2019).

Costo de energía eléctrica: Debido al uso de luz artificial el costo de energía eléctrica puede ser elevado de acuerdo al país en donde se produzca el cultivo, pudiendo no ser rentable la implementación de esta tecnología. Actualmente se siguen desarrollando LEDs más eficientes que consuman menos energía eléctrica y generen menos calor. Para controlar el microclima del edificio suele usarse un HVAC (Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado) que deriva en el aumento del consumo eléctrico.

2.2 Componentes de una granja vertical

La tecnología es sin duda uno de los aspectos más importantes en una granja vertical ya que permite automatizar el proceso de producción reduciendo los costos de mano de obra además del aumento del rendimiento del cultivo y la mejora en su calidad (Higgins *et al.*, 2017). Una granja vertical está compuesta de los siguientes sistemas: monitoreo y control, iluminación LED, productivo, HVAC y de energía (Figura 1).



1. Iluminación LED 2. HVAC 3. Productivo 4. Monitoreo y control 5. Energía

Figura 1. Sistemas de los que está compuesta una granja vertical.

2.2.1. Sistema de monitoreo y control

A. Componentes

Un sistema basado en IoT consiste en conectar la granja vertical a internet a través de un microcontrolador y enviar los datos recolectados por los sensores a un servidor que se encargará de almacenarlos en bases de datos con el fin de ser procesados y visualizados a través de una página web en cualquier dispositivo (Figura 2).

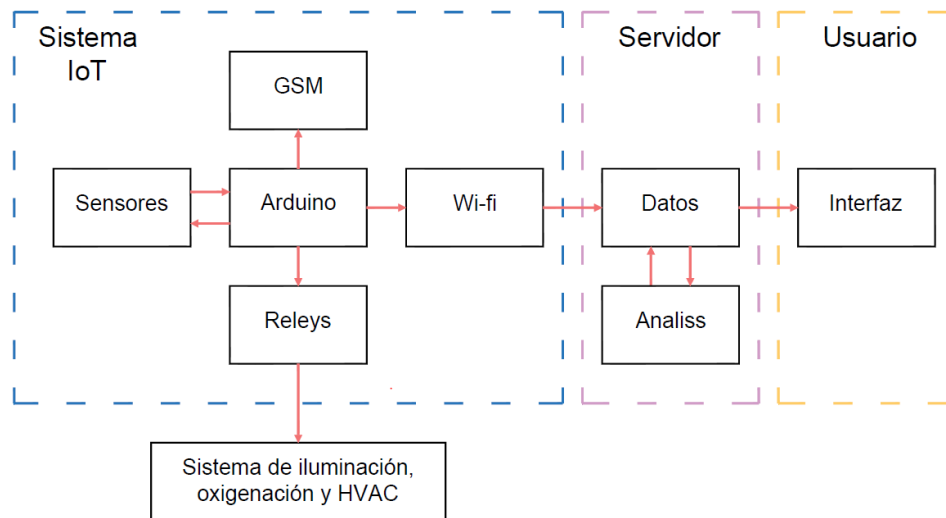


Figura 2. Sistemas de monitoreo y control.

En el mercado se pueden encontrar sensores de bajo costo para el desarrollo del sistema de monitoreo y control (Tabla 1).

Tabla 1. Módulos de bajo costo.

Sensor	Función	Precisión
LM2596	Regulador de voltaje	
LM35	Temperatura	$\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$
Dht22	Temperatura y humedad	$\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\pm 3.5\%$
Dsb1820	Temperatura del agua	$\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$
BH1750	Intensidad de luz	$\pm 0.5\text{ lx}$
DS3231	Fecha y hora	2 ppm
HC-SR04	Distancia	$\pm 3\text{ mm}$
ESP8266	Wifi	
SIM8001	GSM	
HC-05 y HC-06	Bluetooth	

B. Protocolo HTTP

Este protocolo se usa con el fin de intercambiar o transferir hipertexto y es un protocolo de solicitud-respuesta basado en una arquitectura cliente-servidor (Figura 3). Este protocolo es la base de la comunicación de datos a través de la red mundial (Wilde, 1999).

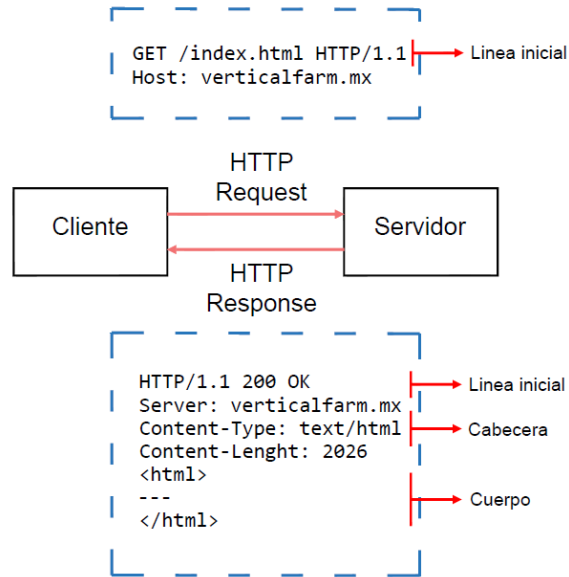


Figura 3. Arquitectura Cliente-Servidor.

2.2.2. Sistema de calefacción, ventilación y aire acondicionado

Con el fin de obtener la mejor calidad y rendimiento del cultivo el microclima al interior del edificio se controla mediante un sistema HVAC, el sistema controla la temperatura y humedad del edificio aportando calor o enfriando el aire del interior, también realiza la renovación del aire, se debe diseñar de tal manera que funcione en condiciones normales e inesperadas (Zhang & Schuluman, 2017).

2.2.3. Sistema de producción

2.2.3.1. Raíz flotante

El método consiste en colocar la planta en un sustrato dentro de una canastilla las cuales se colocan en láminas de espuma de poliestireno que flotan en un contenedor lleno de solución nutritiva. La oxigenación del agua se lleva a cabo mediante una bomba de aire y se pueden colocar piedras difusoras para una mejor absorción del aire por parte de las raíces. Este sistema suele emplearse en cultivos de porte bajo y suele emplearse para la producción de lechuga.

En cultivos de periodo corto como la lechuga la solución nutritiva puede no ser reemplazada, sin embargo, es necesario estar monitoreando el potencial de hidrogeno (pH) y la conductividad eléctrica (CE) durante su ciclo, si se presenta un cambio significativo la solución deberá ser reemplazada(sustituida), en algunos cultivos se recomienda reemplazar la solución nutritiva cada 5 a 10 días (Benton, 2014).

2.2.3.2. *Nutrient Film Technique (NFT)*

En este sistema, la planta se coloca con sustrato dentro de una canastilla, las cuales son insertadas sobre un canal el cual puede ser de distintos materiales (PVC) y formas (Circular, Rectangular, U), los extremos del canal son sellados con un tapón en el cual ingresará la solución nutritiva a través de un orificio, formando una fina película de agua en el fondo, para su movimiento el canal deberá tener cierta pendiente y con ayuda de una bomba la solución nutritiva será recirculada. La fina película de agua será la encargada de transportar oxígeno a la raíz del cultivo. Si el canal es muy pequeño suelen presentarse problemas de encharcamiento de agua impidiendo la oxigenación de la raíz y provocando un mal desarrollo del cultivo.

Algunas de las principales enfermedades que se presentan en la producción de lechuga con esta técnica son: pudrición de la raíz por *Pythium*, pudrición bacteriana, pudrición negra del cuello, cercospora mancha foliar y quemadura en la punta de la hoja (Koohakan *et al.*, 2008). En áreas de clima cálido, el hongo *Pythium* se puede evitar manteniendo la temperatura de la solución nutritiva por debajo de 25 °C (Benton, 2014).

2.2.3.3. *Aeroponics*

Es la tecnología más reciente que se ha desarrollado en agricultura y se basa en suspender las raíces del cultivo en un recipiente lleno de nutrición vegetal fluida. Estas condiciones permiten a la planta absorber de mejor manera los nutrientes y el oxígeno. Algunas desventajas de este método es el costo del sistema, la obstrucción de los rociadores y el mantenimiento (Gopinath *et al.*, 2017).

2.2.3.3. *Aquaponics*

Esta tecnología es la unión de la acuicultura y la hidroponía en donde las plantas aprovechan las excretas de los peces como nutrientes (Gómez *et al.*, 2015).

En este sistema se puede emplear la técnica de raíz flotante o NFT, el agua que ingresa al estanque de los peces debe ser filtrada y oxigenada con una bomba de aire y piedras difusoras, el agua que ese extrae de este estanque debe pasar por un filtro antes de ingresar a las plantas. En esta técnica el sistema de filtrado juega un papel importante ya que se debe mantener la calidad de agua necesaria para los peces y plantas (Danner *et al.*, 2019).

2.2.3.4. *Medios de germinación*

Es importante seleccionar un adecuado medio para germinar nuestro cultivo ya que de este depende que la raíz se desarrolle de manera adecuada.

Tabla 2. Medios de germinación.

Medio	Cultivo
Charola de germinación de 50 cavidades	Zarzamora, frambuesa, fresa, papaya, uva, arándano, maracuyá
Charola de germinación de 200 cavidades	Hortalizas
Foamy agrícola	Hortalizas
Cubos de lana de roca	Hortalizas, flores

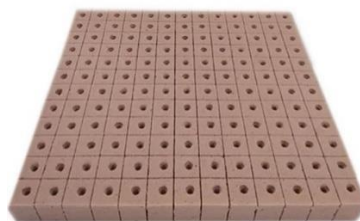
Al usar Foamy Agrícola las semillas de lechuga germinaran más rápido debido a la ausencia de una capa de sustrato que les impida emerger, si son cubiertas con perlita el tiempo de germinado será mayor.

En caso de usar charolas se deben de utilizar de 200 cavidades para que la raíz colonice por completo la cavidad con sustrato, en este tipo de charolas se recomienda usar peat moss, si se usan charolas de 50 cavidades la raíz no crecerá de manera adecuada.

Cualquier que sea el medio usado para germinar semillas de lechuga, estas deberán ser sometidas a 2 días de oscuridad para obtener una germinación más rápida, posterior a este periodo deberán ser sometidas a la luz LED para evitar el alargamiento del tallo, si la intensidad de luz no es la adecuada las plántulas sufrirán de hilamiento a causa de la búsqueda de luz.



Charola de germinación de 200 cavidades



Placa de foamy agrícola con 144 cubos



Charola de germinación de 50 cavidades



Lana de roca en cubos

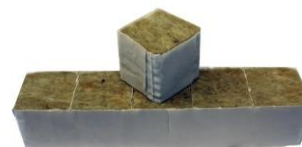


Figura 4. Medios de germinación.

2.2.3.5. *Sustratos*

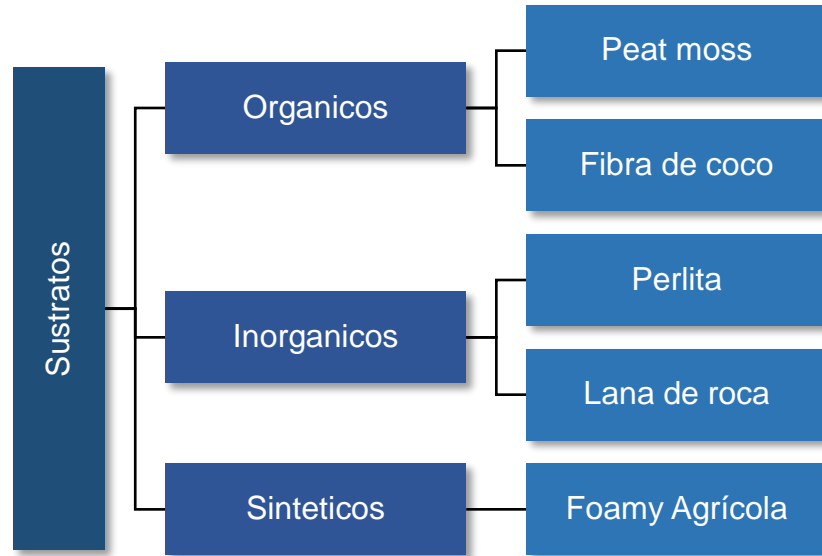


Figura 5. Clasificación de sustratos empleados en sistemas hidropónicos.

2.2.3.5.1. Peat moss

Es uno de los sustratos más usados debido a su bajo costo, propiedades y fácil manejo. Suele combinarse con otros sustratos como perlita.

Los pantanos elevados se forman en ambientes fríos y muy lluviosos. Agua de lluvia, sin sales, es retenida en la superficie por musgos y residuos vegetales, creando un ambiente saturado. En los pantanos elevados podemos distinguir una capa profunda con más descomposición de color oscuro (turba marrón) y una menos profunda con poca descomposición de un color claro (turba rubia). Ambas turbas se caracterizan por una buena estabilidad estructural, muy baja disponibilidad de nutrientes y pH ácido mientras difieren principalmente en su estructura (Maucieri *et al.*, 2019). En algunos países existe un impulso para reducir el uso de turba reducir los efectos ambientales.

En el caso de trasplantar a un sistema hidropónico es necesario lavar la raíz para retirar el sustrato, lo que puede dañarla.

2.2.3.5.2. Fibra de Coco

Se obtiene de las cáscaras fibrosas de los cocos y es un subproducto de la copra y de la industria de extracción de fibras, está compuesta casi exclusivamente de lignina (Maucieri *et al.*, 2019). Una de las ventajas es que al ser un recurso renovable puede reducir el uso de la turba y ayudar al medio ambiente.

Este sustrato combina la retención de agua de la vermiculita con la retención de aire de la perlita. Rallado y esterilizado al vapor, el coco ofrece a las plantas un medio de enraizamiento ideal que también ofrece protección contra enfermedades de las raíces y hongos. El coco es un recurso renovable siendo más amigable para el medio ambiente a diferencia de otros sustratos. (Keith, 2003)

2.2.3.5.3. Perlita

La perlita es un mineral de origen volcánico que se expande hasta 20 veces su volumen original haciéndola muy ligera, esto se debe a que contiene agua en su interior que se evapora al ser sometida a temperaturas altas. Está compuesta principalmente de dióxido de silicio (SiO_2) entre 70-75% y 12-15% de óxido de aluminio (Al_2O_3) (Maucieri *et al.*, 2019). Tiene una excelente retención de oxígeno lo que la hace ideal como sustrato para sistemas hidropónicos.

2.2.3.5.4. Rockwool

La lana de roca se ha utilizado como aislante térmico en los edificios debido a su retención de aire en su interior, al no ser combustible también sirve como protección contra incendios en los edificios. Se vende en forma de cubos o barras. Su fabricación consiste en fundir roca basáltica a 1600 °C y ser sometida a fuerza centrífuga para formar fibras que son comprimidas (Resh, 2013). Tiene una excelente retención de agua y oxígeno, además tiene un buen drenaje por lo que es ampliamente utilizado en invernaderos. Es ideal contra patógenos debido a su esterilidad. En granjas verticales se ha utilizado para la producción de canabbis. Este sustrato tiene un precio más elevado a la perlita, peat moss y foamy agrícola.

2.2.3.5.5. Foamy Agrícola

El foamy agrícola es una espuma fenólica utilizada en la producción de hortalizas, la cual actúa como un medio físico para dar soporte a la planta. Retiene 80% de agua y 20% de aire en su interior lo que permite que las raíces se desarrollen adecuadamente. Su capilaridad es adecuada teniendo una altura capilar aproximadamente de 2.7 cm, dada su densidad el agua se difunde en forma de cono. Es biodegradable, por lo que en suelo puede durar hasta 2 años, en el caso de sistemas hidropónicos su estructura no sufre descomposición alguna debido a la ausencia de microorganismos que llevan a cabo esta función. Se utiliza como medio de producción por semilla o vegetativa (estacas o esquejes) y para el desarrollo de todo tipo de hortalizas. Comparado con otros productos el Foamy agrícola no pierde

su volumen, se tiene una mayor densidad de siembra y de cultivo, reduce un 20% el gasto de agua, está diseñado para que la raíz colonice por completo el Foamy, las raíces son gruesas y con más “pelos” absorbentes, mejora la sanidad en los cultivos reduciendo la incidencia de hongos o bacterias. Es estéril e inerte por lo que se puede utilizar en cualquier sistema hidropónico (NFT, NGS, Raíz flotante, Sustrato). Debido a su estructura se puede colocar directamente en el sistema haciendo más fácil el trasplante a comparación de otros sustratos donde es necesario lavar la raíz. Los orificios del Foamy se pueden rellenar con perlita con el fin de darle un mejor soporte a la plántula.

2.2.4. Sistema de iluminación LED

2.2.4.1. Conexión

Hay que tener en cuenta y mantener siempre la polaridad en las conexiones. Invertir la polaridad puede resultar en el mal funcionamiento o nulo funcionamiento de la instalación.

Por lo general, se conectan múltiples lámparas o tiras LED en paralelo (Figura 6) para obtener suficiente nivel de iluminación requerido por el cultivo, no hay límite de conexión de lámparas o tiras en paralelo siempre y cuando la fuente de alimentación sea capaz de suministrar la potencia requerida.

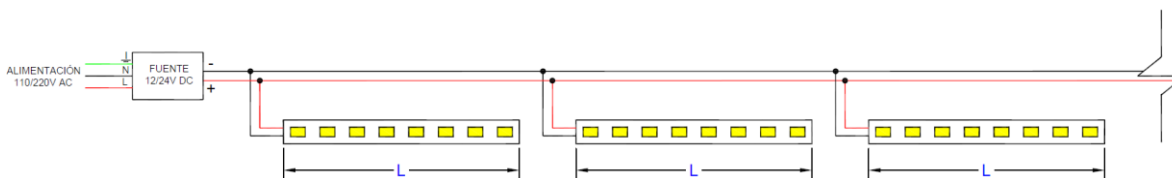


Figura 6. Lámparas o tiras LED conectadas en paralelo.

Suelen colocarse lámparas o tiras LED en serie (Figura 7) para cubrir el área de producción. La longitud máxima de los tramos de tira está en función del voltaje de trabajo de la misma. Una tira LED a 12V soporta una longitud máxima de conexión hasta 5 metros, una tira a 24V permite hasta 10 metros y una tira led a 230V hasta 50 metros. En caso de lámparas el fabricante deberá especificar si es posible colocarlas en serie y el número de estas.

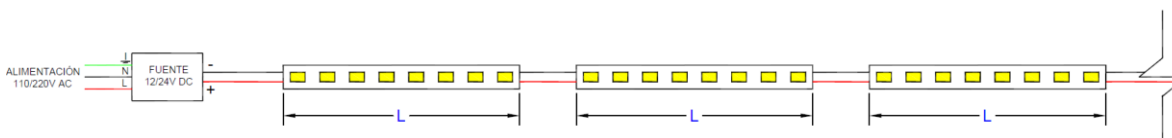


Figura 7. Lámparas o tiras LED conectadas en serie.

2.2.4.2. Fuente de alimentación

El controlador LED suministra una corriente constante al grupo de tiras LED o lámparas de acuerdo con la conexión en serie/paralelo y se selecciona como convertidor AC-DC o DC-DC de acuerdo con el tipo de voltaje de entrada. Algunas lámparas comerciales incluyen en su interior la fuente de alimentación. Los tipos de fuentes de alimentación que podemos encontrar en el mercado son los siguientes:

Compacto: Fuentes de Alimentación modelo compacto con grado de protección IP44, son para donde su funcionamiento en carga tiene un uso diario de no más de 4-5 horas.



Figura 8. Fuente de alimentación DC 12 V de 2 A con protección IP 44.

Modelo de gran rendimiento IP20: Fuentes de Alimentación modelo gran rendimiento de aluminio con grado de protección IP20, son para un uso profesional, para instalaciones donde su funcionamiento en carga tiene un uso diario de entre 12-24 horas.



Figura 9. Fuente de alimentación DC 5 V de 20 A con protección IP20.

Modelo de gran rendimiento IP67: Fuentes de alimentación modelo gran rendimiento de aluminio con grado de protección IP67, son para un uso profesional, para instalaciones donde su funcionamiento en carga tiene un uso diario de entre 16-24 horas y además están instaladas en ambientes húmedos o en el exterior, donde están contacto con la lluvia, humedad o ambientes de mucha polución.



Figura 10. Fuente de alimentación DC 5 V de 20 A con protección IP67.

Es necesario destacar algunas recomendaciones en la selección de una fuente de alimentación.

Suministrar más tensión de la necesaria puede averiar algún componente ya que no están diseñadas para soportar más tensión de la indicada. Con menos tensión no funcionara el sistema, pero ningún componente se verá comprometido, sin embargo, puede haber casos donde si se averíen. Los componentes se diseñan para que trabajen dentro de un margen razonable de variación de la tensión de alimentación. Si la fuente no cuenta con ningún tipo de regulación están diseñadas para suministrar la tensión de salida con el consumo de corriente nominal, de esta manera si el consumo está fuera del nominal la tensión variara, de contar con regulación la tensión se mantiene constante sin importar el consumo a menos de superar la corriente de diseño.

Si la fuente es capaz de proporcionar más corriente de la necesaria, la fuente seguirá funcionando sin sobrecargarse, sin embargo, si la fuente proporciona menos corriente de la necesaria puede sufrir una sobrecarga y de no contar con la protección adecuada puede averiarse. Si cuenta con protección electrónica la corriente limitara el máximo indicado en la fuente y las lámparas no funcionarán de forma óptima.

2.2.4.3. Material reflectante

En el caso de granjas pequeñas la iluminación es más eficiente cuando se utiliza una cubierta reflectante de Mylar en las paredes ya que este refleja la luz al cultivo, el Mylar refleja hasta el 98% de la luz que lo ilumina (Resh, 2013).

2.3. Requerimientos agronómicos de la lechuga

De acuerdo a las diferentes variedades de lechuga se pueden definir dos supergrupos, el primero se caracteriza por un periodo vegetativo largo y encabezamiento considerable, conformado por los morfotipos: Butterhead, Crisphead, Latin (Excepto Gallega), y partes del grupo Cutting, el segundo grupo se

caracteriza por un periodo vegetativo corto y sin atornillado, está compuesto por: Stalk, Cos y Cutting (de Vries y van Raamsdonk, 1994).

- 1) **Butterhead lettuce** (var. *capitata*): Un tipo de encabezado con hojas suaves y tiernas, comido crudo (Kristkova *et al.*, 2008).



Figura 11. Butterhead lettuce.

- 2) **Crisphead lettuce (Iceberg lettuce)** (var. *capitata* L. *nidus jäggeri* Helm) (Iceberg type, Eissalat, Batavia): Un tipo de encabezado con hojas gruesas y crujientes y venación de hojas flabeladas, que se come crudo (Kristkova *et al.*, 2008).



Figura 12. Crisphead lettuce.

- 3) **Cos lettuce (Romanie lettuce)** (var. *longifolia* Lam., var. *romana* Hort. in Bailey) (Römischer Salat, Laitue romaine): Tienen cabezas sueltas con hojas alargadas que tienen una nervadura central (Kristkova *et al.*, 2008). Es de estación fría y su periodo de crecimiento es de 42 a 100 días de acuerdo al clima (Bayley, 2020).



Figura 13. Cos lettuce.

- 4) **Cutting lettuce** (var. *acephala* Alef., syn. var. *secalina* Alef., syn. var. *crispa* L.) (Gathering lettuce, Loose-leaf, Picking lettuce, Schnittsalat, Laitue à couper): Esta variedad puede tener hojas enteras, rizadas o con flecos, desde los márgenes no lobulados hasta los márgenes profundamente incisos. Las hojas son alargadas o anchas, habiendo varios tonos de verde y varios patrones e intensidades de pigmentación de antocianinas (Kristkova *et al.*, 2008).



Figura 14. Cutting lettuce.

2.3.2. Temperatura y humedad del aire

La temperatura es un parámetro esencial que influye en el desarrollo de cultivos. La lechuga al ser un cultivo de estación fría, si es expuesto a temperaturas altas se reduce la acumulación de biomasa, se produce el alargamiento del tallo y se desarrollan cabezas más sueltas, si no se reduce la temperatura se provocará atornillado y emisión de tallo floral (Saavedra, 2017; Al-said *et al.*, 2018).

Durante la germinación la temperatura óptima es de 15 °C a 20 °C, se debe mantener la humedad relativa (HR) entre 60% a 80% y el dióxido de carbono a 1,000 ppm durante el día (Resh, 2013). Después del trasplante las temperaturas óptimas varían de 17 a 28 °C en el día y de 3 a 12 °C en la noche (Wurr *et al.*, 1992). Sin embargo, estas temperaturas son generales, cada variedad de lechuga, tiene requerimientos diferentes de temperatura.

2.3.2. Solución nutritiva

En la producción de lechuga se debe llevar a cabo una nutrición adecuada con el fin de reducir los costos de producción y contaminación ambiental (Conversa *et al.*, 2004).

La nutrición de las plantas consiste en una mezcla de dos soluciones, una solución A con los elementos mayores (Tabla 3) y una solución B con elementos menores (Tabla 4), en el mercado se pueden encontrar diversas soluciones con diferentes concentraciones para diversas hortalizas.

Tabla 3. Composición de solución A para hortalizas de hoja y de Yamazaki para lechuga.

Elemento	Concentración (mg·L ⁻¹)	Concentración (mg·L ⁻¹)
Nitrógeno (N)	180	92.2
Fosforo (P)	41	15.4
Potasio (K)	172	156.2
Calcio (Ca)	158	40.1
Magnesio (Mg)	25	12.1
Azufre	55	16.1

Tabla 4. Composición de solución B para hortalizas de hoja y de Yamazaki para lechuga.

Elemento	Concentración (mg·L ⁻¹)	Concentración (mg·L ⁻¹)
Hierro (Fe)	1.5	2.4
Manganeso (Mn)	0.7	0.14
Boro (B)	0.13	2.8
Cobre (Cu)	0.06	0.01
Zinc (Zn)	0.14	0.02
Molibdeno (Mo)	0.05	0.0052

Para realizar la solución nutritiva suele emplearse una solución madre que de acuerdo al fabricante indicará las instrucciones para su elaboración, en el caso de una solución general para hortalizas de hoja en un contenedor de capacidad de 5 litros, se agregan 3 litros de agua y se mezclan los elementos de la solución A hasta solubilizar y se agrega más agua para completar la capacidad de 5 litros. Este proceso es fundamental para balancear la solución nutritiva. El mismo proceso se repite para la solución B. Estos dos contenedores serán las soluciones madres concentradas, las cuales solo se usará una proporción para preparar una cantidad determinada de solución nutritiva. Estas soluciones madre duran 2 años no expuestas al sol. Para los primeros 10 días de siembra en la solución nutritiva se emplean 2.5 mm de solución madre A y B por cada litro de agua, posterior a los 10 días se utilizan 5.0 mm de A y B. Para cantidades menores a 10 mL se debe emplear una pipeta graduada, para valores superiores se puede emplear un vaso de precipitados o una probeta graduada. Las indicaciones descritas pueden variar de acuerdo al producto adquirido.

2.3.3. Temperatura de la solución nutritiva

Además de mantener una temperatura óptima del aire es importante optimizar la de la raíz. Al mantener una temperatura de raíz a 24 °C se maximiza el crecimiento de la lechuga y se minimizan los daños de temperaturas elevadas del aire (Thompson *et al.*, 1998, p. 363). La lechuga se cultiva tradicionalmente como un cultivo de clima frío, pero, al optimizar la temperatura de la zona de la raíz, la producción de lechuga se puede cultivar en áreas geográficas más cálidas.

2.3.4. PH

La mayoría de las plantas prefieren una condición ligeramente ácida entre 5.8 y 6.5. El pH afecta la capacidad de las plantas para absorber los elementos de la solución nutritiva (Resh, 2013, p. 61). Para obtener el pH existen diversos medidores, los cuales varían en precio en función a su precisión, en el caso de granjas pequeñas se puede incluso usar tiras de papel de pH. En el caso de una granja vertical automatizada se pueden usar sensores (Figura 11).



Figura 15. Medidores de pH y sensor.

Debido a los cambios de PH que se presentan en el ciclo del cultivo, para aumentar el pH en el mercado se puede encontrar un compuesto a base de Carbonato de potasio (K_2CO_3), Hidróxido de potasio (KOH) y Silicato (Si) llamado pH up para la disminución se encuentra un compuesto a base de Ácido Nítrico (HNO_3), Ácido Fosfórico (H_3PO_4) y Reguladores orgánicos llamado pH up.

2.3.5. CE

Generalmente, una solución nutritiva puede tener una CE de 1.5 a 3.0 mMhos. Una recomendación es evitar una CE superior a 4.0 mS / cm ya que la planta morirá (Gopinath *et al.*, 2017). Se debe monitorear constantemente la solución nutritiva, ya que la CE disminuirá con el paso del tiempo y en algún momento, a menudo dentro de un mes, la CE caerá lo suficiente como para justificar el cambio de toda la solución nutritiva.

2.3.6. Oxígeno disuelto

La concentración crítica de oxígeno disuelto (OD) para un buen desarrollo de la lechuga es inferior a 2.1 mg L⁻¹ (Goto *et al.*, 1996). Los niveles de oxígeno disuelto

deben estar por encima de 4-5 mg L⁻¹; de otra manera pueden aparecer deficiencias de nutrientes debido a que los sistemas de raíces absorben un bajo rendimiento. Agregar oxígeno a la solución es especialmente importante cuando la temperatura del agua es superior a 23 °C, ya que estas altas temperaturas pueden estimular el atornillado de lechuga (Maucieri *et al.*, 2019). Si se presentan temperaturas inferiores a 12 °C se puede suministrar oxígeno disuelto altamente concentrado entre 20 a 30 mg L⁻¹ para mejorar el crecimiento de la planta (Suyantohadi *et al.*, 2010).

2.3.7. Iluminación

Una vez seleccionado el cultivo es necesario tomar en cuenta los tres siguientes factores: la intensidad de luz, la longitud de onda y el fotoperiodo, los dos primeros factores determinaran el tipo de lámpara LED a utilizar y el ultimo es independiente pudiendo ser controlado por medio del sistema de automatización de la granja vertical.

1.3.7.1 Longitud de onda

Los organismos fotosintéticos convierten la energía solar en energía química mediante pigmentos fotosintéticos los cuales son: los carotenoides, las clorofilas y las ficobilinas (Pareek *et al.*, 2017). Entre los diferentes tipos de clorofila que existen en los organismos fotosintéticos la clorofila a y b son los componentes principales de las plantas (Tabla 5).

Tabla 5. Tipos y presencia de clorofilas en los organismos fotosintéticos

Clorofila	Presencia	Referencia (s)
Clorofila a	Todos los organismos fotosintéticos oxigenados incluyendo cianobacterias, algas y embriofitos	Kume et al. (2018)
Clorofila b	Plantas superiores, diversas algas y proclorofitos	Xu et al. (2001)
Clorofila c	Algas pardas y diatomeas	Pareek et al. (2017)
Clorofila d	Acaryochloris sp. creciendo en algas rojas	Murakami et al. (2004)
Clorofila f	Cianobacterias	Chen et al. (2010); Miyashita et al (2014)

La clorofila a y b (Chl a y Chl b) presentan dos picos de absorción de luz visible, uno en la región roja (435 y 470 nm) y otro en la región azul (675 y 650) (Caffarri *et al.*, 2009) (Figura 16).

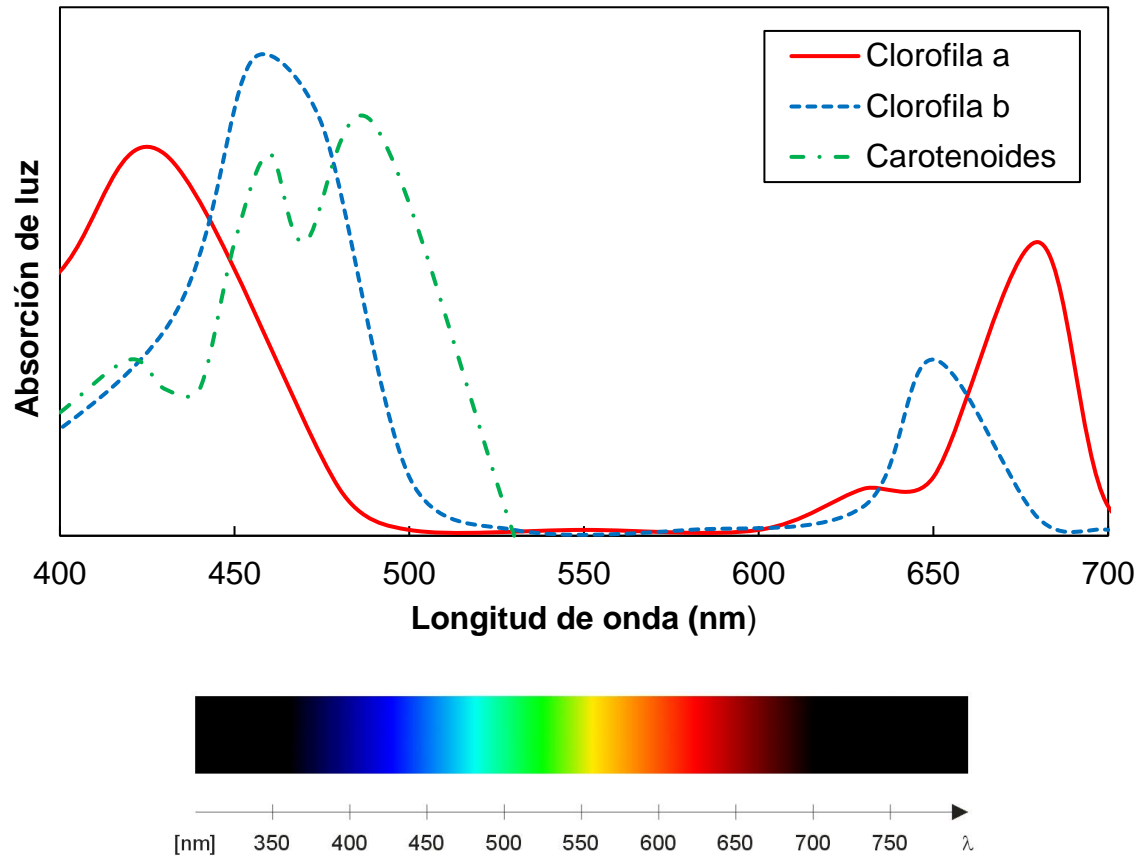


Figura 16. Espectro de absorción de los principales pigmentos.

La estructura molecular de la clorofila a y b son muy similares y se caracterizan por tener un anillo de clorina con un ion de magnesio en el centro (Croft & Chen, 2018). La diferencia entre la Chl a y b es que la clorofila a contiene un grupo CHO y la Chl b un grupo CH₃ en la posición C-7 (Pareek *et al.*, 2017).

Clorofila a

La fórmula molecular de la Chl a es C₅₅H₇₂MgN₄O₅. Contiene un anillo de clorina en el que un ion de magnesio está rodeado centralmente por cuatro átomos de nitrógeno. La Chl a posee una larga cola hidrofóbica que ancla la molécula a proteínas hidrofóbicas alternativas dentro de la membrana tilacoide del plastidio (Pareek *et al.*, 2017).

Chl b

La fórmula química de la Chl b es C₅₅H₇₀MgN₄O₆. La Chl b a diferencia de la clorofila a tiene un grupo CHO en lugar de CH₃ en la posición C-7. La Chl b ayuda a la clorofila a en el proceso de fotosíntesis. Este pigmento tiene un color amarillo en su estado natural, pero absorbe la luz azul de todo el espectro solar. Para la clorofila b,

el pico de absorción característico se observó a 453 nm y 625 nm in vitro y a 480 nm y 650 nm in vivo (Pareek *et al.*, 2017).

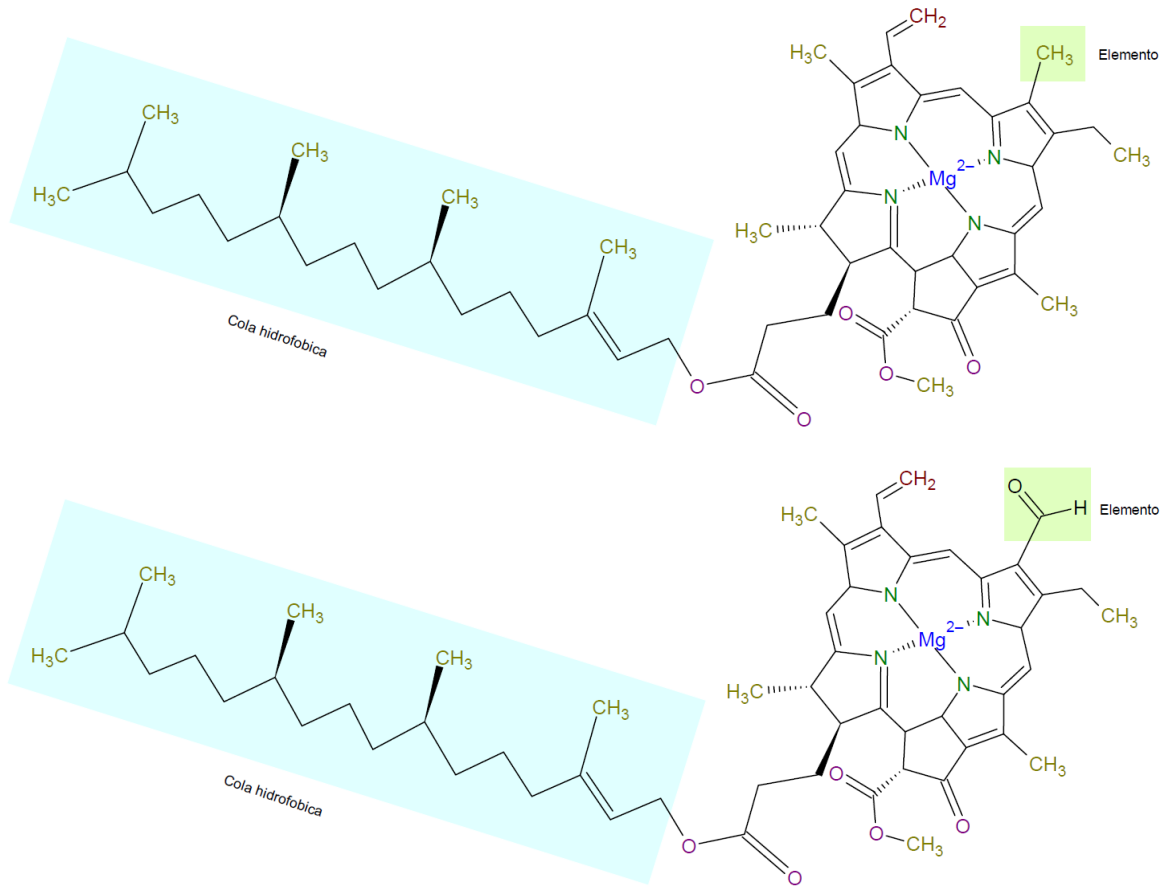


Figura 17. Estructura molecular de la clorofila a y b.

Efectos de longitud de onda en el crecimiento de lechuga

No existe una proporción clara de luz roja y azul que deba emplearse en la producción de lechuga, algunas relaciones comunes son: 9:1, 4:1, 2:1 (Tahera *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2017), diversas lámparas comerciales combinan estas relaciones con luz blanca, infrarroja, ultravioleta y espectro completo.

La luz roja incentiva el crecimiento vertical de la lechuga (Zhang *et al.*, 2017) y se obtiene un impacto negativo en la biomasa, el contenido de clorofila, el contenido de carotenoides y los niveles de antioxidantes (Tahera *et al.*, 2019). El uso de luz azul con un bajo porcentaje de luz roja (9:1, 5-9%) mejora la biomasa y la acumulación total de clorofila y un tratamiento de luz roja con un bajo porcentaje de luz roja (9:1, 9-17%) estimula el contenido de carotenoides y niveles de antioxidantes (Tahera *et al.*, 2019), una combinación adecuada de luz roja y azul aumenta significativamente

la vitamina C, el azul soluble, la proteína soluble y la GDH en comparación del uso de luz blanca (Zhang *et al.*, 2017).

1.3.7.2 Fotoperiodo

El crecimiento y morfogénesis de las plantas está influenciado por la duración y periodicidad de la luz artificial. Con el fin de simular el día y la noche se somete el cultivo a un periodo de luz y a uno de oscuridad para la lechuga suele emplearse un fotoperiodo de 18 horas de luz y 6 de oscuridad formando un ciclo por día, otros fotoperiodos que se pueden utilizar son: 12/12 h·d⁻¹ (1 ciclo), 16/8 h·d⁻¹ (1 ciclo), 9/3 h·d⁻¹ (2 ciclos), 6/2 h·d⁻¹ (3 ciclos) (Kang *et al.*, 2013; Tahera *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2017).

1.3.7.3 Intensidad

El aumento de la intensidad de luz aumenta el crecimiento de la planta, sin embargo, existe un límite ya que el exceso de absorción de luz causa estrés fotooxidativo. Se debe conocer la relación adecuada entre el consumo eléctrico y la intensidad suficiente para obtener buenos rendimientos. Existen diversos estudios donde se ha sometido la lechuga a diversas intensidades de luz (Tabla 6).

Tabla 6. Rendimientos obtenidos en una granja vertical en interiores para una intensidad de luz determinada, un fotoperiodo y un espectro de onda, reportados por estudios recientes.

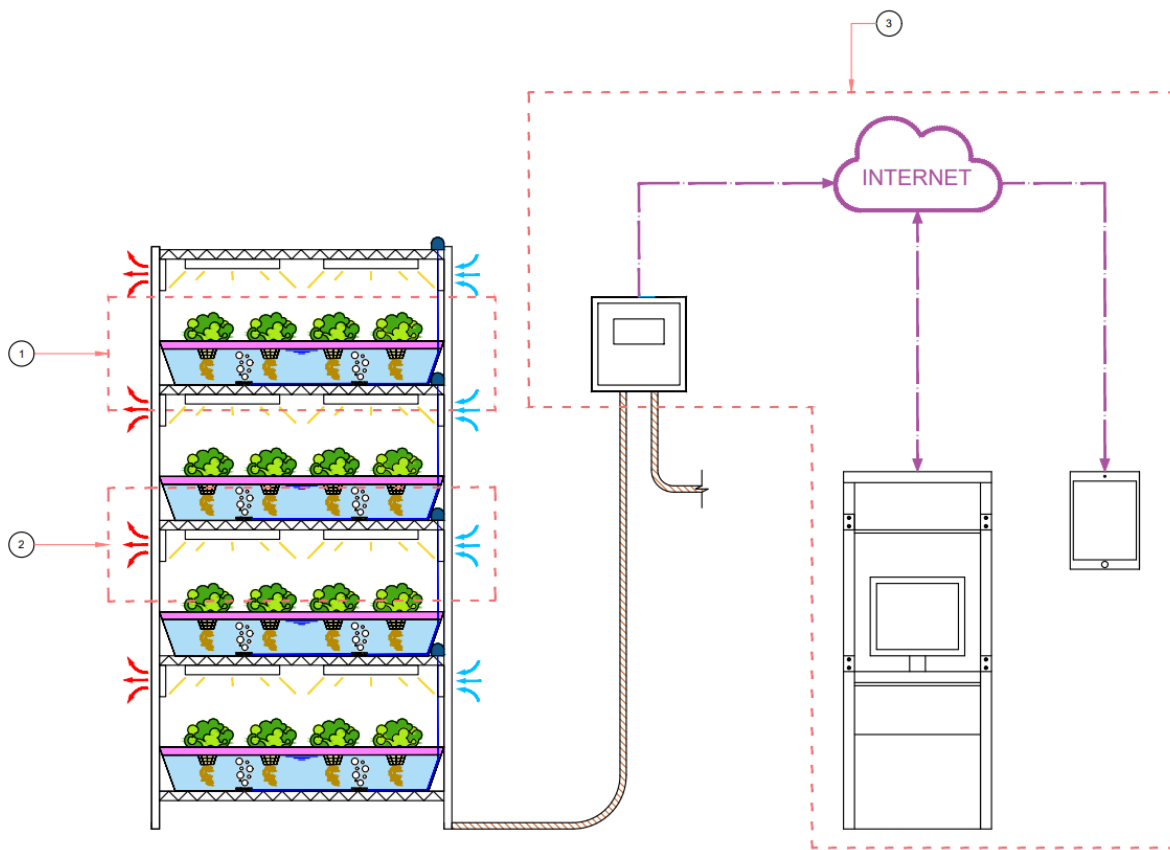
Variedad	Intensidad	Longitud de onda ^a	Fotoperiodo	Peso fresco máximo (g·plant ⁻¹)	Referencia
Lactuca sativa L.	290 PPFD	R:B:W 8:1:1:1	18/6	81.28	Kang <i>et al.</i> (2013)
Lactuca sativa L. cv. Ziwei	250 PPFD	R:B 2.2:1	16/8	42.7	Zhang <i>et al.</i> (2018)
Lactuca sativa L. var. longifolia	194.54 PPFD	R:G + Y:B 69.9:17.0:13.1	14/8	300	Loconsole <i>et al.</i> (2019)
	200 PPFD	91% R + 9% B	16/8	78.45	Naznin <i>et al.</i> (2019)
<i>Lactuca sativa</i> L., cv. Frill Ice	200 PPFD		14/10	97.9	Lu <i>et al.</i> (2019)

a) Las fuentes de luz se abrevian de la siguiente manera: LED-Rojo = R, LED-Verde = G, LED-Azul = B, LED-Blanco = W, LED-Amarillo = Y.

Capítulo 3

Materiales y métodos

La granja vertical empleada en este estudio está compuesta de los siguientes sistemas: productivo, iluminación LED y monitoreo y control (Figura 18).



1. Sistema productivo 2. Sistema de iluminación 3. Sistema de monitoreo y control

Figura 18. Composición de la granja vertical de este estudio.

A continuación, se describe los materiales y métodos empleados en cada sistema de la granja vertical.

3.1. Sistema productivo

Se diseñó y construyó un prototipo de granja vertical conformada por un estante de 5 niveles (LargoxAnchoxAlto, 40.4x90.4x183.6 cm). Se instaló un sistema hidropónico de raíz flotante compuesto por depósitos de plástico de 39 l con placas de poliestireno de 1" y canastillas hidropónicas de 2". Para la oxigenación se colocó sistema de aireación compuesto por bombas de aire de 80 l (1588, Aquakril, México) y manguera flexible de silicón traslúcido con difusores de aire. Cada nivel contaba con ventiladores de 6" de 117 VCA con 14 W de potencia (Steren, México) para extraer el aire caliente de las lámparas LED (Figura 19).

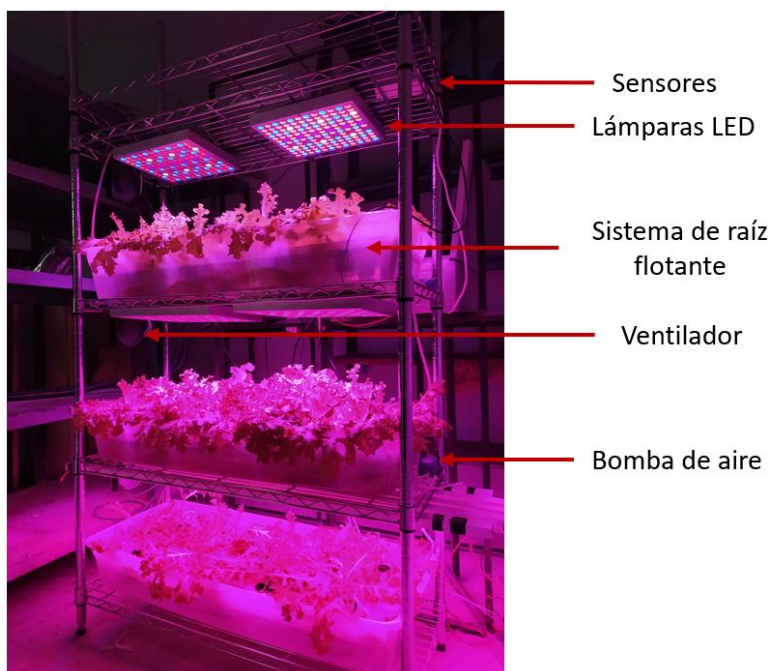


Figura 19. Granja vertical desarrollada.

El estudio se realizó en el interior de un edificio ubicado en Morelos, México, construido a base de block y cemento, que son materiales típicos de la región. Se germinaron semillas de lechuga sangría (*Lactuca sativa*) en espuma agrícola de 144 cavidades (peat FOAM, CDMX, México, Figura 20) durante 10 días en la granja vertical con una intensidad de luz de 8500 luxes proporcionada por lámparas LED (Venoya International Co., Lt, Hong Kong, China) a un fotoperiodo de 18/6 h.d⁻¹. Se trasplantaron 8 plántulas por balsa a una densidad de 20x20 cm, donde se le dio seguimiento al cultivo durante 30 días para completar un ciclo de 40 días. El mismo procedimiento se llevó a cabo para lechuga orejona (*Lactuca sativa* L. var. longifolia) con el fin de evaluar que variedad se adapta mejor a las condiciones de la zona.



Figura 20. Plántulas de lechuga sangría cultivada en espuma agrícola.

La nutrición de las plantas se llevó a cabo con una solución nutritiva para producción de hortalizas de hoja (Hid Cme, México) compuesta por una solución *A* con los macronutrientes y una solución *B* con micronutrientes (Tabla 7). Para los primeros 10 días de siembra se emplearon 2.5 mL de *A* y *B* por cada litro de agua, esta cantidad de solución madre se midió mediante una pipeta graduada clase *A* (Sileii, Civeq), posterior a los 10 días se utilizaron 5.0 mL de *A* y *B* por cada litro de agua, la medición se realizó con un vaso de precipitados (Pyrex). Después del trasplante la solución nutritiva se reemplazó completamente cada 10 días. El pH de la solución nutritiva se mantuvo en el rango de 5.5-6.5 midiéndose con tiras reactivas.

Tabla 7. Composición mineral de la solución nutritiva.

Macro	mg.L ⁻¹	Micro	mg.L ⁻¹
N	180	Fe	1.5
P	41	Mn	0.7
K	172	B	0.13
Ca	158	Cu	0.06
Mg	25	Zn	0.14
S	55	Mo	0.05

3.2. Sistema de iluminación

Después del trasplante, las plantas fueron sometidas a un fotoperiodo de 18/6 h.d⁻¹ con tres tratamientos de intensidades y espectro de luz de acuerdo a lámparas LED comerciales en México (Tabla 8). Las lámparas comerciales cuentan con un driver en su interior con el fin de conectarlas a la red de 127 V, en el caso de las tiras LED se conectaron con un driver de 12V y 20 A (TF12V10A, ÁguiLed, México). Todos los tratamientos estuvieron sometidos a la temperatura del interior del edificio. Se

utilizó un wattímetro (HER-432, Steren, México) para medir el consumo de energía de cada tratamiento y se estimó el peso fresco obtenido por cada kwh .

Tabla 8. Tratamientos a los que se sometió la lechuga.

Tratamiento	Intensidad de luz ¹ (luxes)	Espectro ²	Tipo de Iluminación
T1-2100	2100	80% R + 20% B	Tiras LED SMD5050 (Corp. Res Electronics, CDMX, México)
T2-5700	5700	71.6% R + 26.7% B + 0.85% IR + 0.85% UV	Lámpara de 30x30 cm (Venoya International Co., Lt, Hong Kong, China)
T3-6300	6300	62.5% R + 25% B + 4.2% W + 4.2% IR + 4.2% UV	Lámpara de 25x25 cm (ZGSGLLM, SUNPIN, Estados Unidos)

¹Intensidad de luz obtenida con un sensor BH1750 con una precisión de ± 0.5 lx.

²Las fuentes de luz se abrevian de la siguiente manera: LED-Rojo = R, LED-Azul = B, LED-Blanco = W, LED-Infrarrojo = IR y LED-Ultravioleta = UV.

3.3. Sistema de monitoreo y control

El sistema de monitoreo y control basado en IoT consistió en conectar la granja vertical a internet a través de Arduino y enviar los datos recolectados por los sensores a un servidor donde se almacenaron en bases de datos y se procesaron con el fin de visualizarse a través de una página web en cualquier dispositivo (Figura 2).

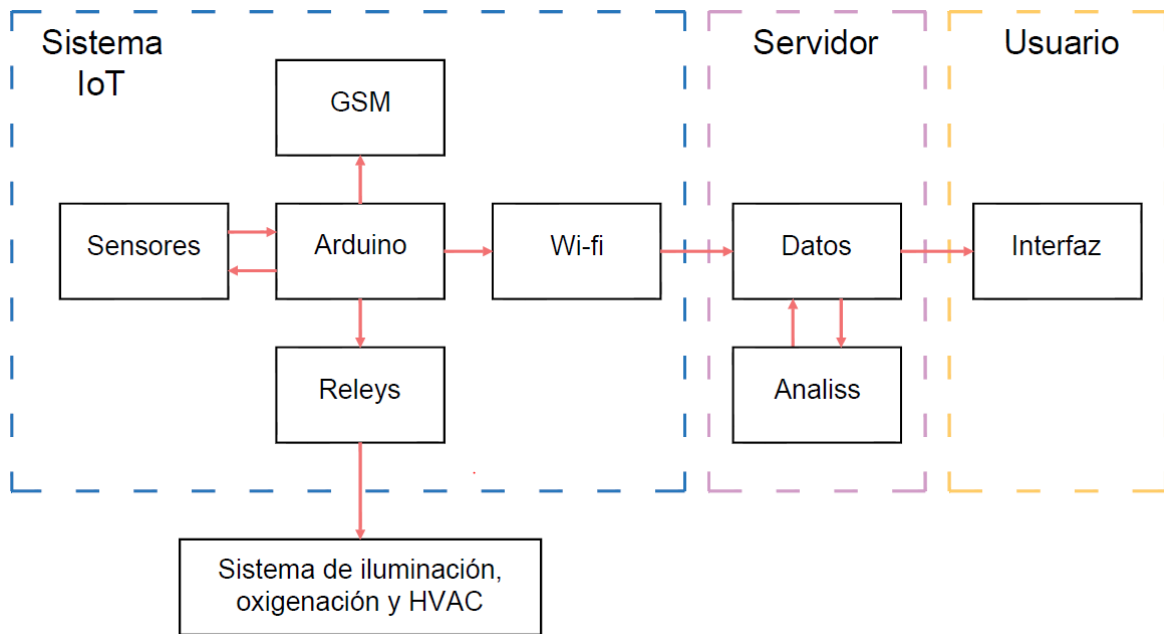


Figura 21. Funcionamiento del sistema de monitoreo y control de bajo costo basado en Arduino.

3.3.1. Sistema IoT

Las horas lumínicas y el tiempo de encendido de la ventilación y aeración del agua se controlaron mediante un relevador de estado sólido de 8 canales. Se instalaron sensores para el monitoreo de variables climáticas (Tabla 9) y se colocó una pantalla LCD 16x2 con el fin de visualizarlas. Todos los dispositivos fueron controlados mediante una placa de microcontrolador Arduino Mega 2560 basada en el ATmega2560.

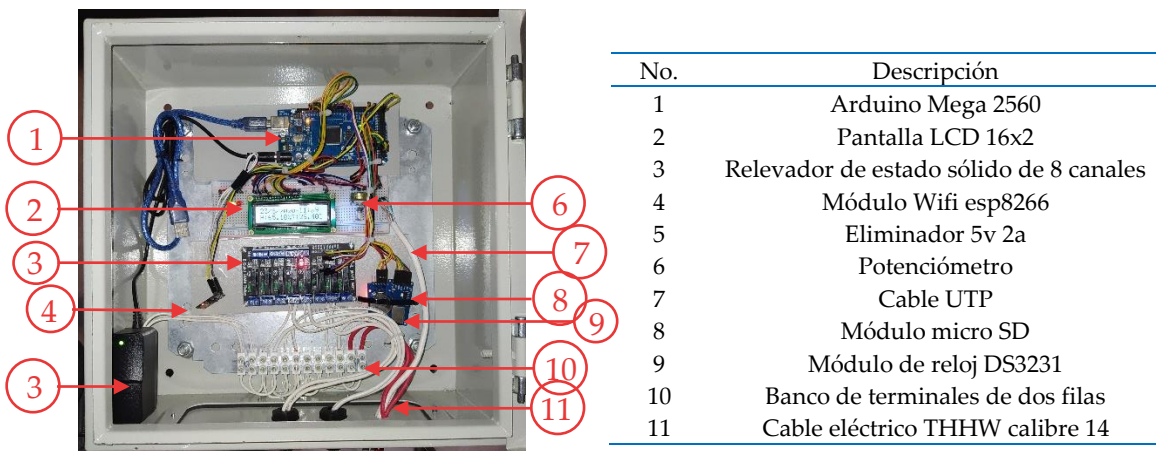


Figura 22. Gabinete de control del sistema IoT de bajo costo basado en Arduino.

Tabla 9. Sensores que contiene la granja vertical.

Sensor	Variable	Precisión
Dht22	Temperatura y humedad ambiente	±0.5 °C ±3.5 %
Dsb1820	Temperatura de la solución	±0.5 °C
BH1750	Intensidad de luz	±0.5 lx
DS3231	Fecha y hora	2ppm

La fábrica de plantas se conectó a internet a través de un módulo Wi-Fi (esp8266) con el fin de enviar los datos recolectados por los sensores e informar si se encontraba encendido o apagado el sistema de iluminación, ventilación y oxigenación. El envío de datos se realizó mediante el protocolo HTTP (Figura 23).

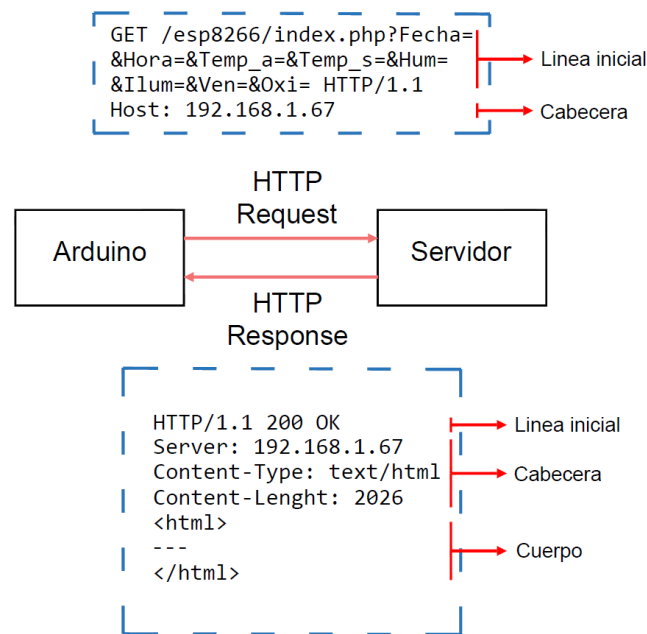


Figura 23. Arquitectura Cliente-Servidor.

3.3.2. Servidor y Usuario

Se instaló un servidor (Dell Optiplex 790) al cual se puede acceder de manera remota mediante una ip pública (Figura 24), en él se recibieron los datos enviados por Arduino a través de un script realizado en php y se almacenaron en una base de datos formada por archivos csv, posteriormente estos fueron procesados por Python 3.8 para obtener datos promedio de cada 60 min durante las últimas 24 (Back-end) y a través de Javascript se generaron gráficas dinámicas de los datos para finalmente ser visualizados a través de una página web realizada en html 5 y css 3 (Front-end, Figura 25).

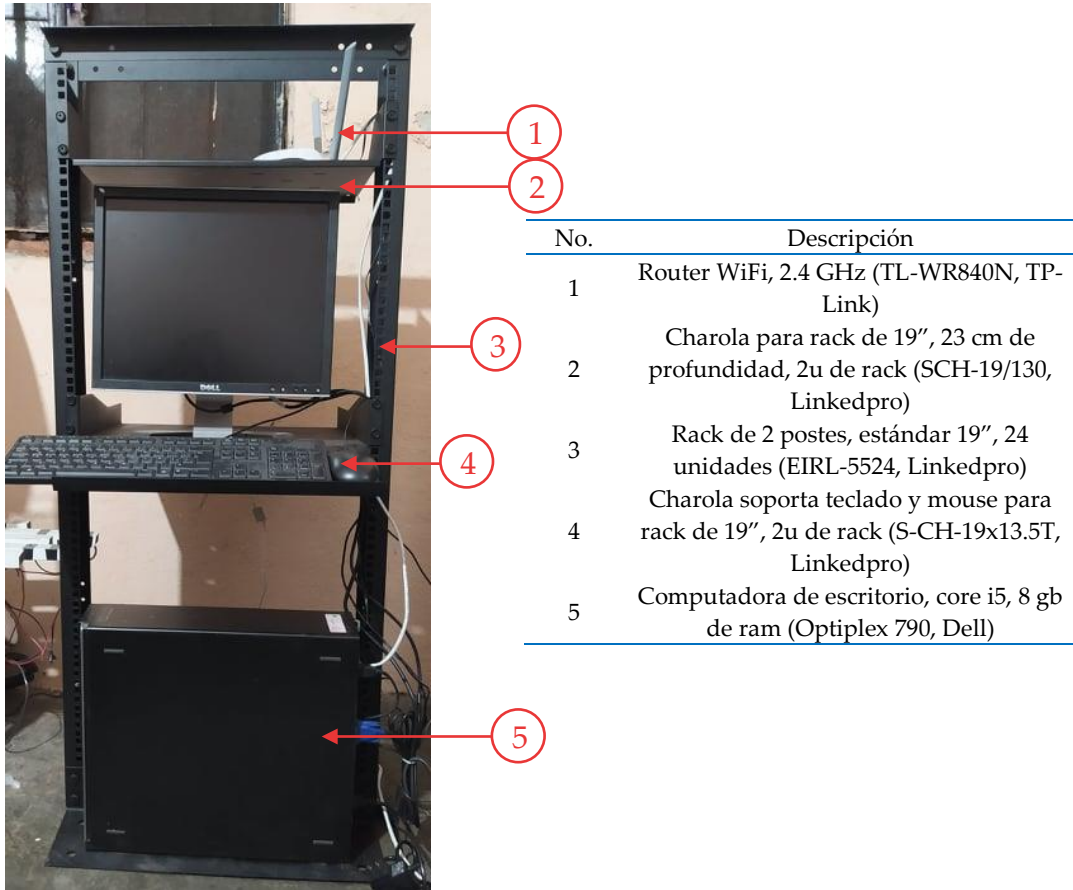


Figura 24. Servidor de la aplicación web.

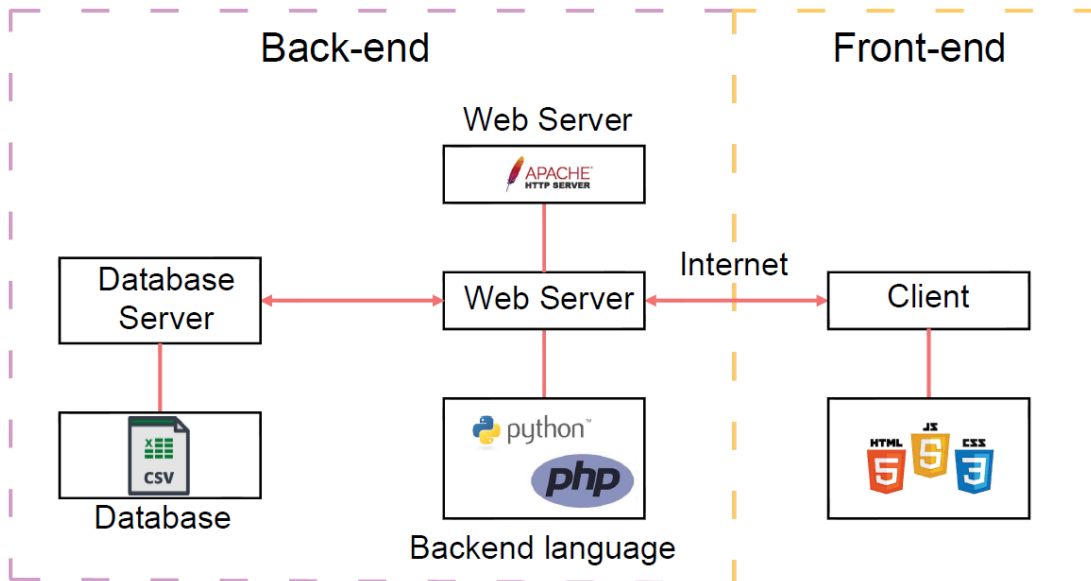


Figura 25. Arquitectura de la aplicación web.

Con el fin de comparar las variables climáticas del exterior con la del interior del edificio se accedió a los datos tomados por la estación meteorológica automática de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, México) que se encuentra en las instalaciones del Instituto Mexicano de Tecnología del agua (IMTA. Jiutepec, Mor, Mex), la cual hace el seguimiento de las siguientes variables meteorológicas: Temperatura, Humedad Relativa y Radiación. Los datos obtenidos tanto en el interior y exterior se procesaron en un algoritmo desarrollado en Python 3.4 (PSF, EUA).

3.4. Análisis estadístico

Al finalizar el ciclo del cultivo se seleccionaron aleatoriamente 5 plantas por tratamiento y se midió con una regla la altura de la planta (desde la base de la corona hasta el borde superior de la hoja más larga), largo y ancho de todas las hojas. Con una balanza (BAPRE-3, Rhino, CDMX, México) con una precisión de 0.2 g se midió el peso fresco de cada planta.

Los resultados experimentales se sometieron a un análisis de varianza unidireccional (ANOVA) y a una prueba de rango múltiple de Duncan con un nivel de significancia $p = 0.05$ mediante un algoritmo desarrollado en Python 3.4 (PSF, EUA, Figura 26).

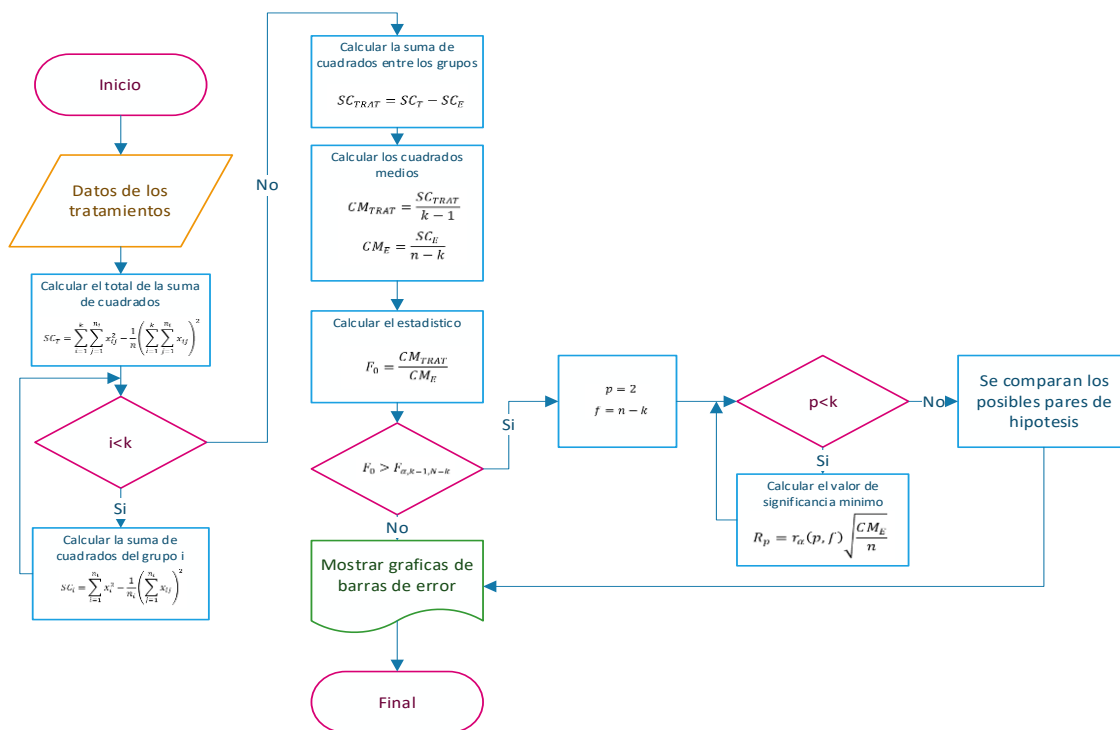


Figura 26. Diagrama de flujo para el análisis ANOVA y Duncan.

Capítulo 4

Resultados: Análisis y discusión

4.1. Software para el monitoreo de variables y análisis estadístico

Los datos almacenados por los sensores en archivos csv fueron procesados de manera correcta por el algoritmo, mostrando las gráficas correspondientes de los valores medios diarios de temperatura y humedad.

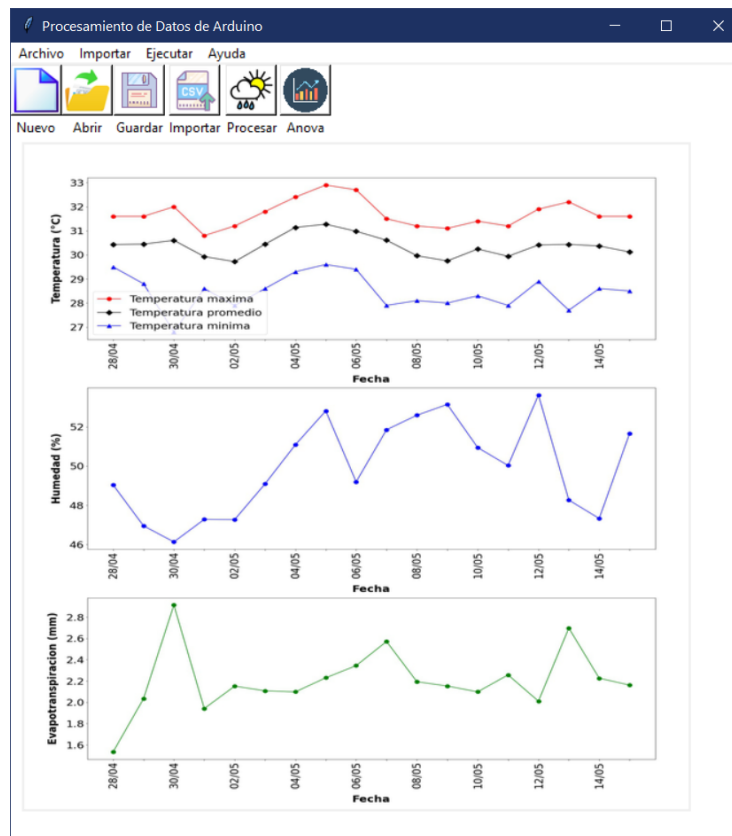
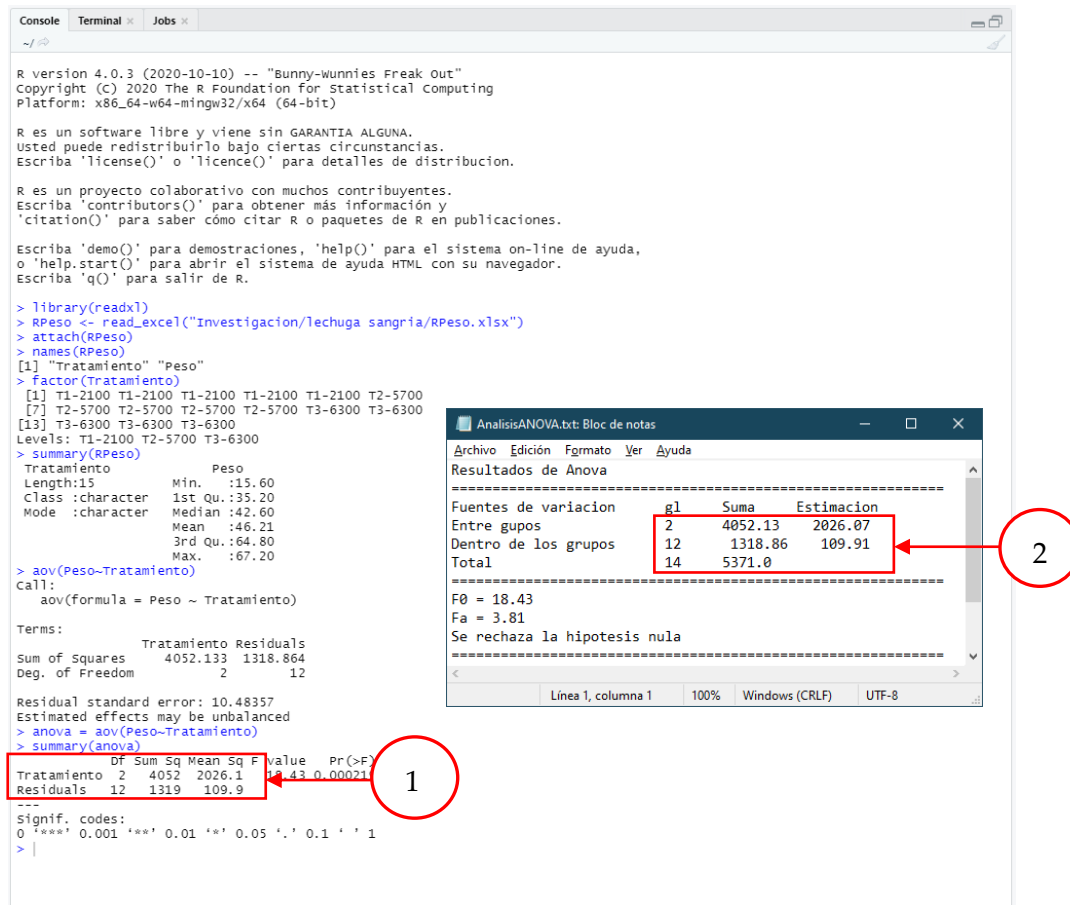


Figura 27. Software para el procesamiento de datos tomados por Arduino.

Se puede observar que el software muestra de forma adecuada los resultados del análisis ANOVA en comparación con Rstudio.



1. Rstudio 2. Software desarrollado

Figura 28. Comparación entre RStudio y el software desarrollado.

En caso de rechazarse la hipotesis nula el software desarrollado realizo de manera adecuada el análisis Duncan.

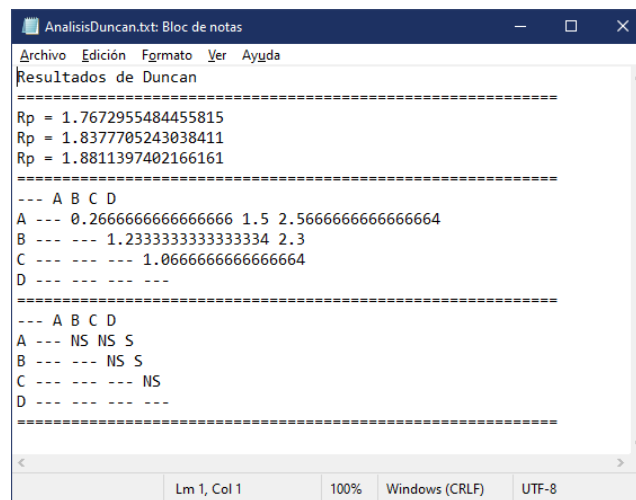


Figura 29. Resultados de análisis Duncan en el software desarrollado.

4.2. Sistema de monitoreo y control

Al acceder a la página web desde el dominio asignado se observó que se mostraban los datos enviados por Arduino con un retraso de 1 minuto ya que es el tiempo que necesita el microcontrolador para recolectar los datos, enviarlos y recibir respuesta del servidor.

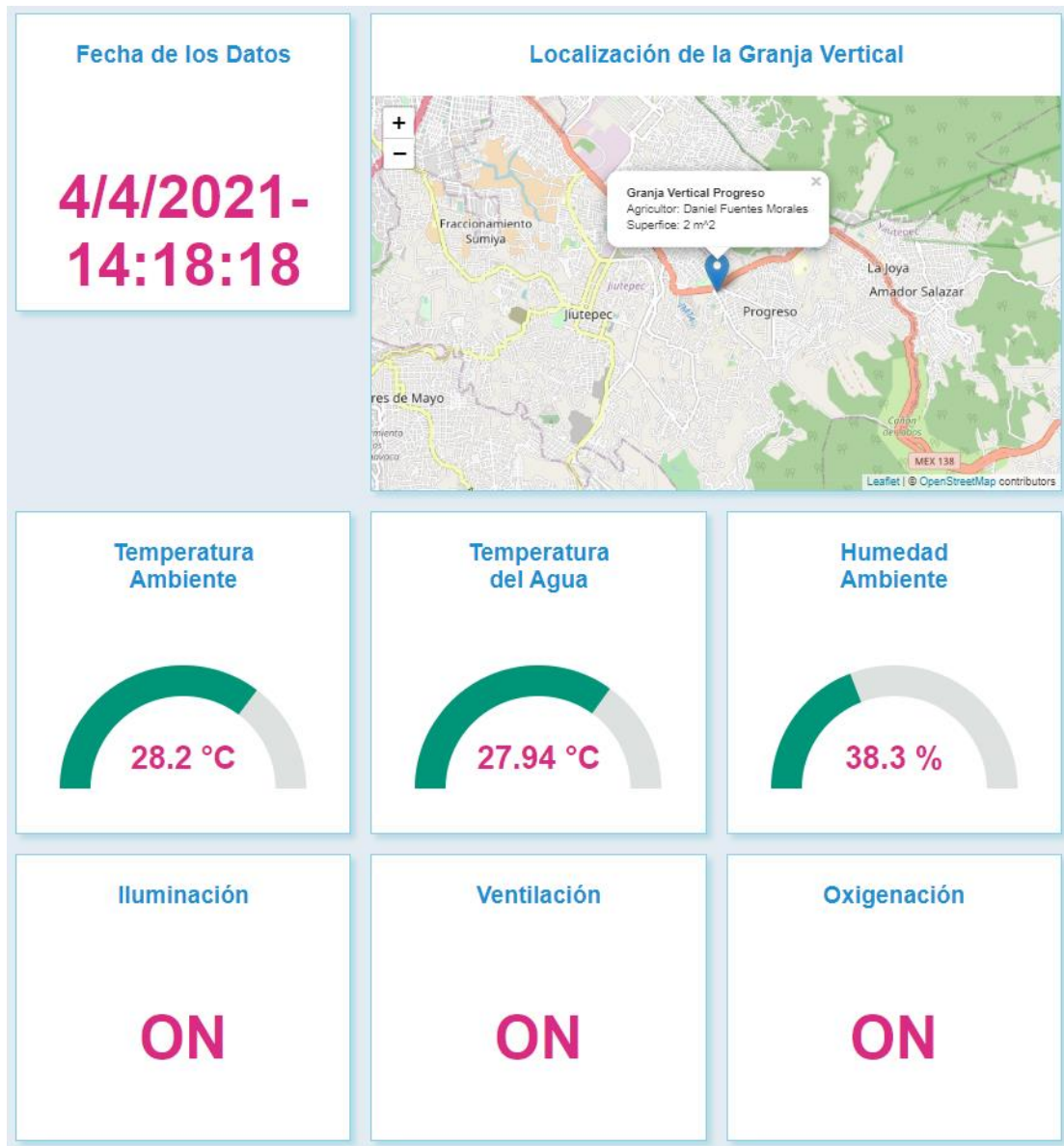


Figura 30. Datos en tiempo real para monitorear la fábrica de plantas.

Los datos se almacenaron de manera adecuada en el servidor y el script desarrollado en Python los procesó correctamente guardando los datos de las últimas 24 horas los cuales se pudieron visualizar en gráficas en la aplicación web.

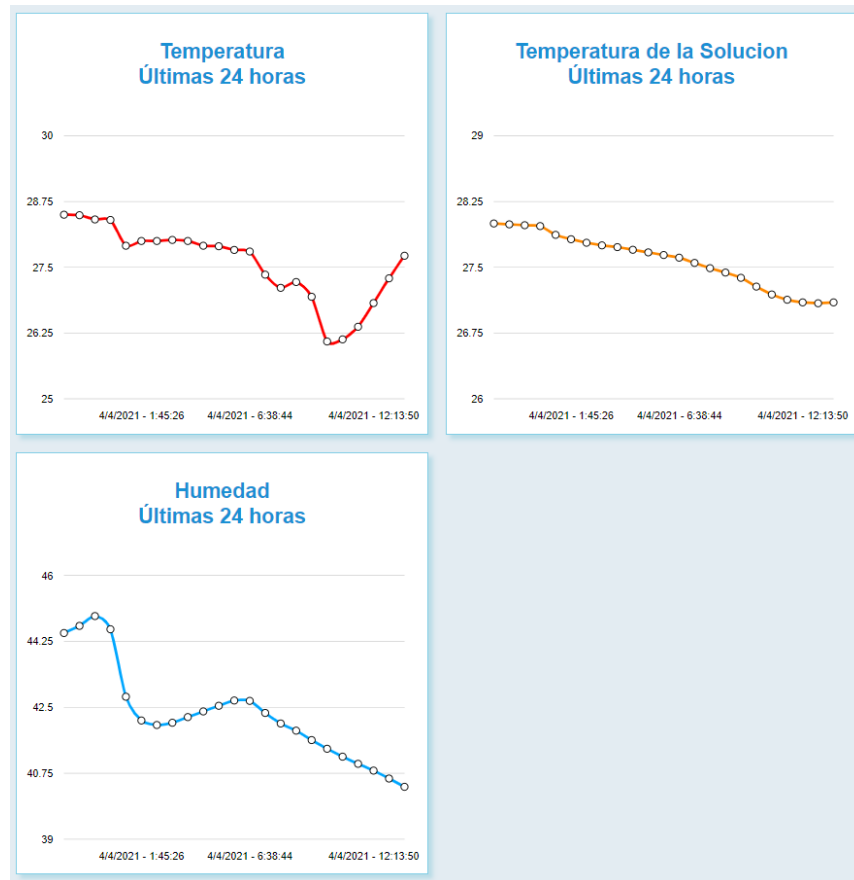


Figura 31. Graficas de los datos obtenidos por los sensores en las últimas 24 horas.

Los datos se guardaron en la base de datos conformada por un archivo csv de la siguiente manera: Fecha, Hora, Temp_a, Temp_s, Hum, Ilum, Ven y Oxi. En la **Figura 32** se muestra un fragmento de los datos almacenados en el servidor en donde se puede observar el correcto funcionamiento de Arduino al encender el sistema de oxigenación durante 24 minutos como fue establecido, encendiéndose el sistema al pasar de estado OFF a ON a las 0:0:44 y apagarse al pasar de ON a OFF a las 0:24:31.

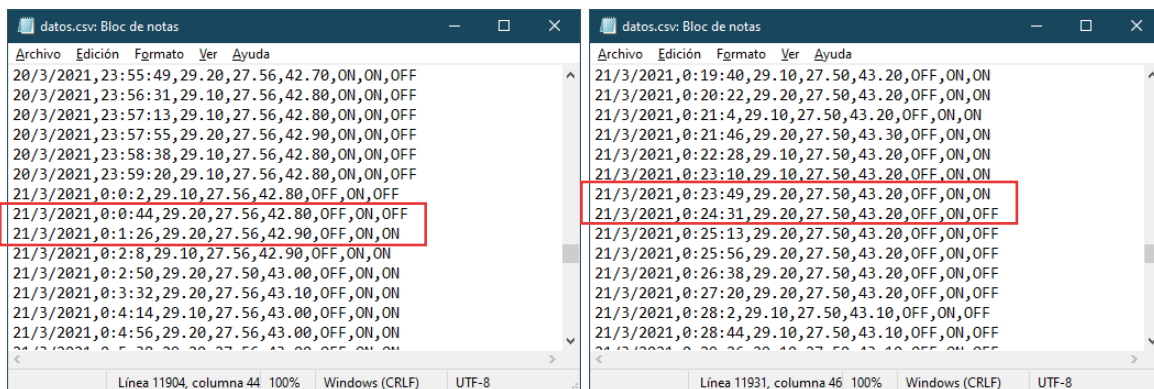


Figura 32. Datos que muestran el sistema de oxigenación encendido.

El sistema de iluminación se encendió de acuerdo al fotoperiodo 18/6 h.d⁻¹ (luz, oscuridad) establecido previamente (Figura 33), apagándose el sistema por seis horas al pasar de estado ON a OFF a las 23:59:36 y encendiéndose al pasar de OFF a ON a las 6:0:50.

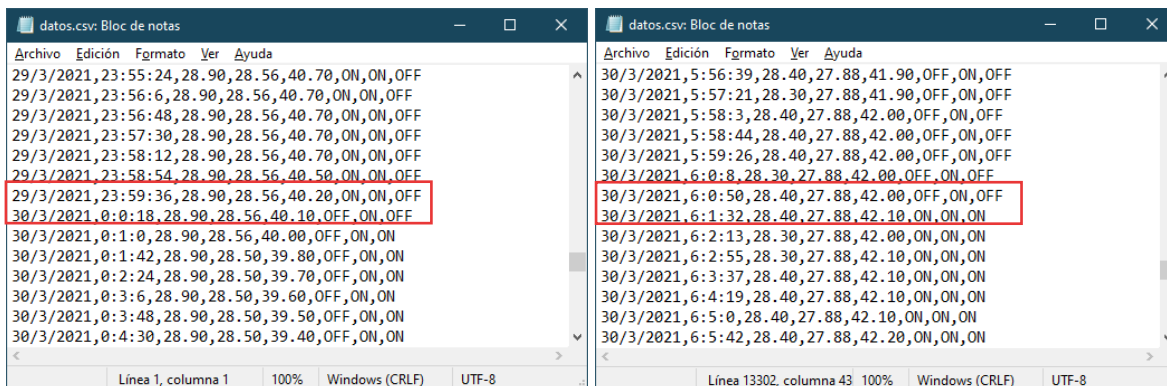


Figura 33. Datos que muestran el sistema de iluminación encendido.

4.3. Lechuga Romana

4.3.1. Clima

La temperatura promedio en el interior del edificio se mantuvo en los 28 °C con una variación de ± 2 °C y la HR se mantuvo en 70% con una variación de $\pm 10\%$ (Figura 34 A). En el caso del exterior la temperatura mostró mayor variación oscilando desde los 15 a los 34°C, la HR tuvo una variación de 40 a 100% (Figura 34 B). Se puede observar que el edificio es capaz de reducir la variación de la temperatura del exterior además de conservar la humedad, favoreciendo un buen crecimiento del cultivo, sin embargo, la temperatura del interior del edificio en el ciclo de la lechuga se encontró en el rango de 25 a 31 °C siendo el límite superior 3 °C mayor al rango de 17 a 28 °C el cual Wurr *et al.* (1992) menciona que es el óptimo para un buen crecimiento de la lechuga, de esta manera se induce que fue una de las consecuencias de alargamiento de tallo y desarrollo de cabezas más suelta. En el periodo de germinación la HR se encontró entre 60 a 80% encontrándose dentro del rango recomendado por Resh (2013) que va de 60 a 80%.

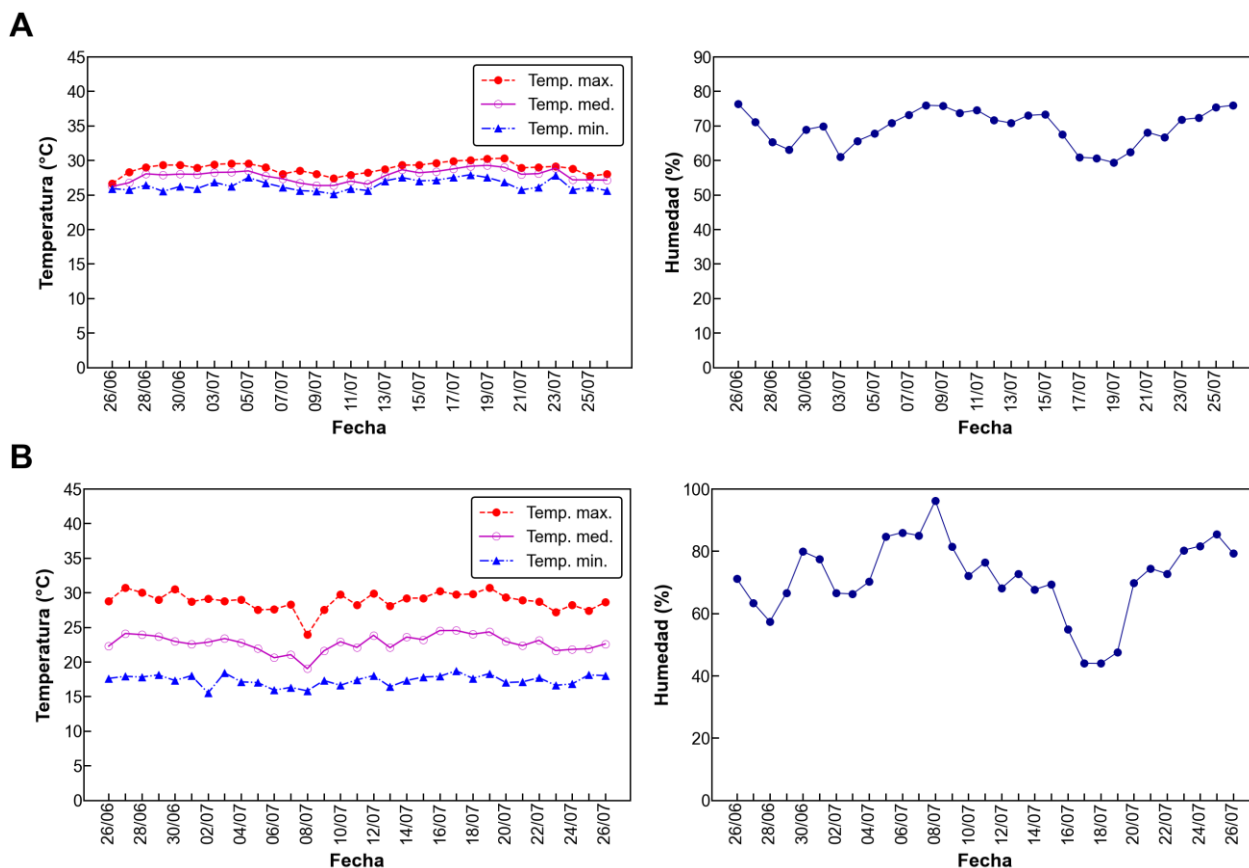


Figura 34. Temperatura y humedad en el interior (A) y exterior (B) del edificio para un ciclo de lechuga de 40 días.

4.3.2. Desarrollo morfológico

En la Figura 35 se observan los tratamientos a los que fue sometida la lechuga de acuerdo a las lámparas comerciales.



Figura 35. Tratamientos con luces led de lámparas comerciales en México a los que se sometió la lechuga romana.

Se encontró que las características agronómicas de la lechuga fueron significativamente afectadas por la intensidad de luz (Tabla 10). Solo la media del largo de la hoja fue estadísticamente diferente entre los grupos experimentales por

lo que se obtuvo que el tratamiento T2-5700 y T3-6300 son significativamente diferentes al tratamiento T1-2100. Los demás parámetros fisiológicos no mostraron diferencia debido a que la planta en el tratamiento T1-2100 al recibir menos luz desarrollo más taño y hojas motivo por el cual las medidas son semejante a la de los tratamientos T2-5700 y T3-6300.

Tabla 10. Intensidad de luz Vs crecimiento de la lechuga 30 días después del trasplante (n = 4).

Tratamiento	No. De Hojas	Altura de Planta ¹ (cm)	Hoja	
			Largo (cm)	Ancho (cm)
T1-2100	16.50±1.5	29.75±2.5	13.88±1.1 a ²	6.01±1.0
T2-5700	20.00±0.4	30.38±0.5	17.40±0.6 bc	8.59±0.4
T3-6300	17.25±1.5	32.38±2.5	17.02±0.1 b	7.66±7.66

¹Los datos son valores medios ± Error Estándar (EE) de 4 plantas por tratamiento

²Letras diferentes en la misma columna fueron significativamente diferentes por el método de comparación múltiple de Duncan ($p \leq 0.05$).

Las mejores características agronómicas se obtuvieron para el tratamiento T2-5700 cuyo espectro esta compuesto principalmente de luz azul y roja con una relación 2.7:1 (Figura 36).



Figura 36. Efectos morfológicos por la de la intensidad de luz.

Se puede observar que las medidas fisiológicas de las hojas no son suficiente para determinar la diferencia entre las medias de los grupos experimentales, por lo que

es necesario tomar otros parámetros como el peso fresco y el peso seco de la planta y de la raíz.

4.3.3. Consumo hídrico

Comparando el peso entre los grupos experimentales (Figura 37) se puede observar que se obtuvo un mejor rendimiento en el tratamiento T2-5700 y T3-6300 a comparación del T1-2100. El mayor consumo de agua se presentó para el tratamiento T2-5700 (Figura 37). El consumo hídrico del tratamiento T1-2100 y T3-6300 fueron menores al tratamiento T2-5700 ya que se correlacionan con el rendimiento obtenido.

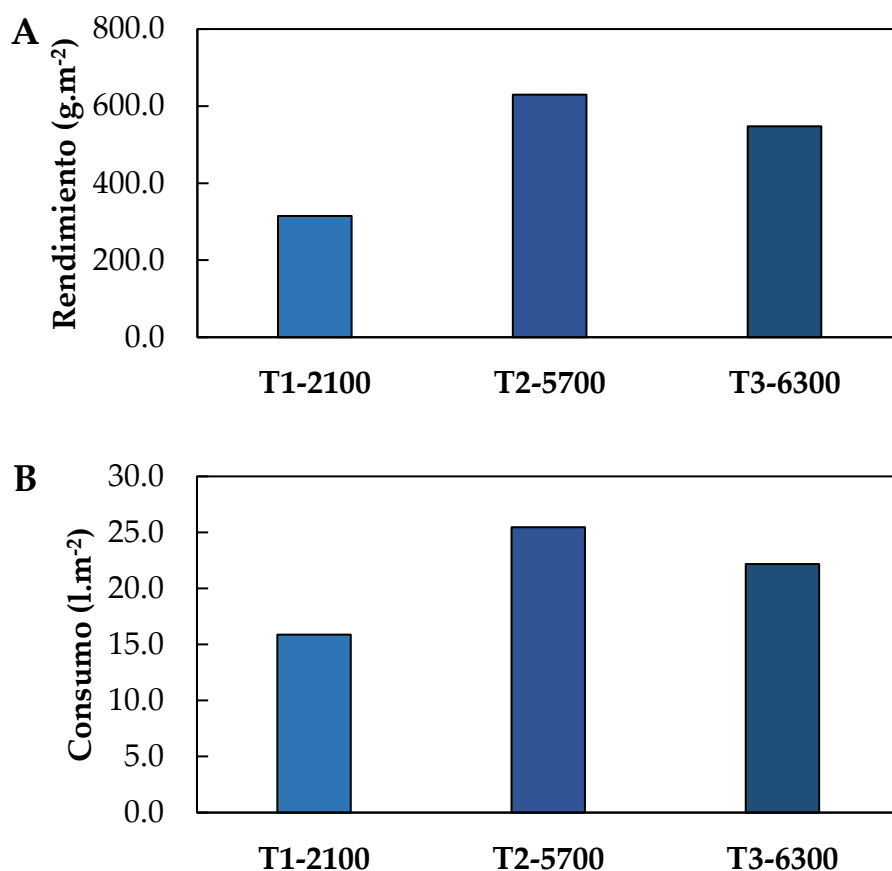


Figura 37. Rendimiento (A) y consumo de agua (B) de la lechuga.

4.3.4. Consumo eléctrico

Debido al bajo rendimiento y al alto consumo de energía del driver empleado en las tiras LED, el tratamiento T1-2100 es el menos eficiente para la producción de lechuga y el más eficiente es el tratamiento T2-5700 (Tabla 11), Saengtharatip *et al.* (2017) obtuvieron una productividad de 117 g.kwh⁻¹ para leds con 77.5% de luz roja, 20.7% luz azul y 1.2% de rojo lejano, la lechuga se sometió a un periodo de 35 días con una intensidad de 200 $\mu\text{mol.m}^{-2}\text{s}^{-1}$ y 14 horas de luz, se puede observar que la

productividad es mayor a la obtenida en este estudio, se intuye que se debe principalmente a la intensidad de luz, al ser mayor a la proporcionada por las lámparas leds comerciales en México.

Tabla 11. Peso fresco de lechuga orejona cultivada durante 30 días en la granja vertical, consumo de electricidad de las lámparas LED y la productividad de peso fresco por kWh.

Tratamiento	Peso fresco (g·m ⁻²) [1]	Consumo eléctrico (kwh·m ⁻²) [2]	Productividad (g·kwh ⁻¹) [3]=[1]/[2]
T1-2100	314.9	61.3	5.1
T2-5700	629.8	17.9	35.2
T3-6300	547.6	15.8	34.6

4.4. Lechuga Sangría

4.4.1. Clima

La temperatura promedio en el interior del edificio se mantuvo en los 25 °C con una variación de ±5 °C y la HR se mantuvo en 60% con una variación de ±10% (Figura 38 A). En el caso del exterior la temperatura mostró mayor variación oscilando desde los 10 a los 30°C, la HR tuvo una variación de 40 a 70% (Figura 38 B). Se puede observar que el edificio es capaz de reducir la variación de la temperatura del exterior además de conservar la humedad, favoreciendo un buen crecimiento del cultivo, sin embargo, la temperatura del interior del edificio en el ciclo de la lechuga se encontró en el rango de 22 a 31 °C siendo el límite superior 3 °C mayor al rango de 17 a 28 °C el cual Wurr *et al.* (1992) menciona que es el óptimo para un buen crecimiento de la lechuga, de esta manera se induce que fue una de las consecuencias de alargamiento de tallo y desarrollo de cabezas más suelta. En el periodo de germinación la HR se encontró entre 55 a 70% siendo inferior al recomendado por Resh (2013) que va de 60 a 80%.

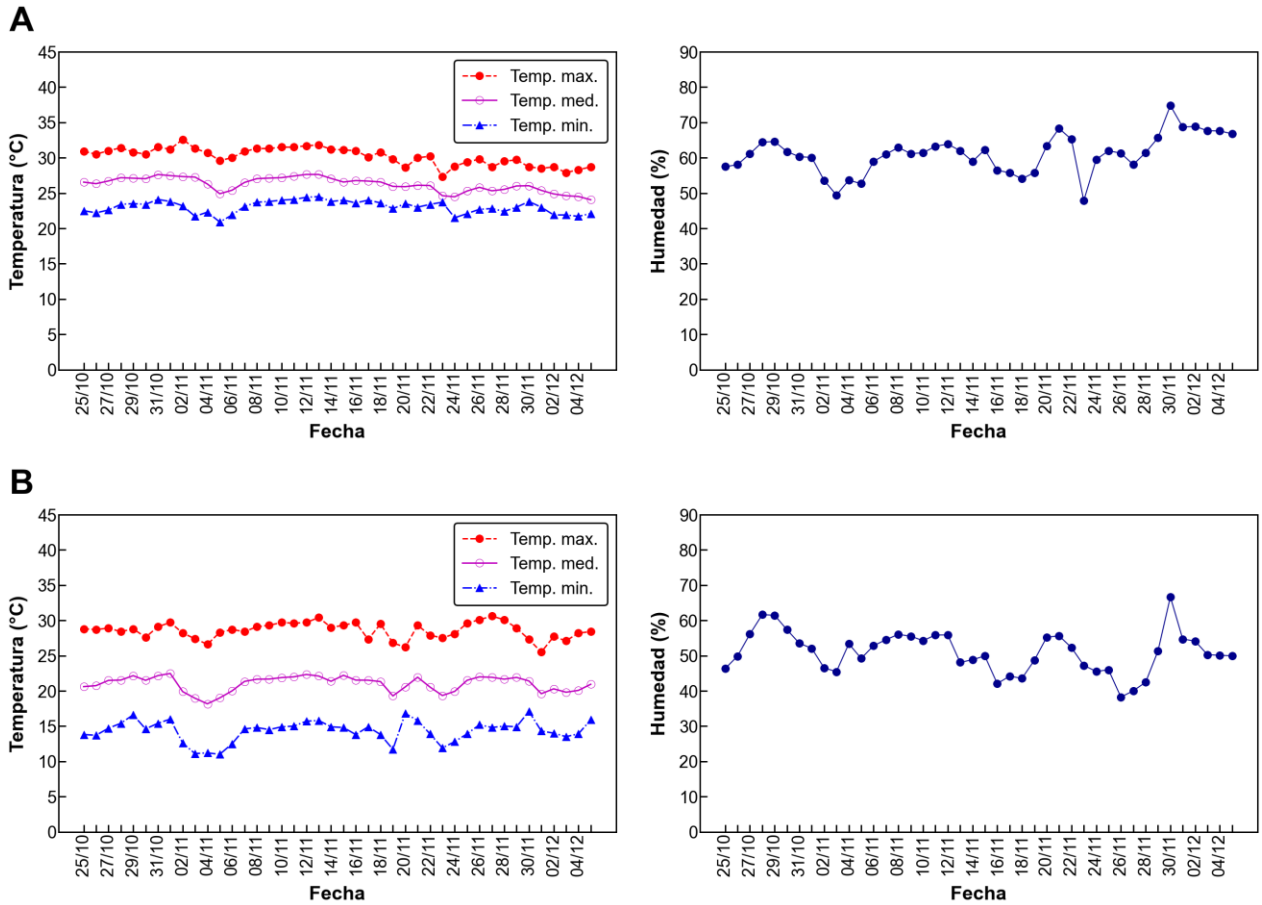


Figura 38. Temperatura y humedad en el interior (A) y exterior (B) del edificio para un ciclo de lechuga de 40 días.

4.4.2. Desarrollo morfológico

En la Figura 39 se observan los tratamientos a los que fue sometida la lechuga de acuerdo a las lámparas comerciales.



Figura 39. Tratamientos con luces LED de lámparas comerciales en México a los que se sometió la lechuga sangría.

Se encontró que las características agronómicas de la lechuga fueron significativamente afectadas por la intensidad de luz (Tabla 12). La baja intensidad

de luz, así como la exposición a luz roja (R:B 4:1) del tratamiento T1-2100 se correlaciono con el alargamiento del tallo, estos resultados son congruentes con los obtenidos por Zhang *et al.* (2017) quienes reportan una altura mayor de lechuga cuando la cultivaron bajo luz roja en una relación de R:B 9:1 y 4:1. El ancho de las hojas se vio afectado significativamente por la baja iluminación del tratamiento T1-2100, siendo menor al tratamiento T2-5700 y T-6300. Una mayor intensidad de luz aumentó el crecimiento de la planta, obteniéndose el máximo peso fresco de 65.7 g para una intensidad de 5700 luxes. Esto es consistente con Kang *et al.* (2013) que obtuvieron mayor peso fresco con intensidades de luz más altas donde el máximo valor fue de 81.28 g con $290 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ PPFD usando un fotoperiodo de 18/6 y una relación R:B:W 8:1:1. En otro estudio realizado por Zhang *et al.* (2018) se obtuvo el mayor peso fresco para una intensidad de $250 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ PPFD el cual fue de 42.7 g con un fotoperiodo de 16/8 y una relación R:B 2.2:1. El peso fresco del tratamiento T1-2200 fue significativamente menor en comparación con el tratamiento T2-5700 y T3-6300.

Tabla 12. Intensidad de luz Vs crecimiento de la lechuga 30 días después del trasplante (n = 5).

Tratamiento	No. De Hojas	Altura de Planta ¹ (cm)	Hoja		Peso fresco (g)
			Largo (cm)	Ancho (cm)	
T1-2100	16.4±1.3 a ²	28.4±1.6 bc	19.1±1.0	11.5±0.9 a	25.5±5.9 a
T2-5700	20.8±0.2 c	23.5±0.3 a	20.8±0.3	15.8±0.2 bc	65.7±1.0 b
T3-6300	18.0±0.5 ab	27.8±0.7 b	21.2±0.3	15.5±0.6 b	47.5±5.5 c

¹Los datos son valores medios ± Error Estándar (EE) de 5 plantas por tratamiento

²Letras diferentes en la misma columna fueron significativamente diferentes por el método de comparación múltiple de Duncan ($p \leq 0.05$).

Las mejores características agronómicas se obtuvieron para el tratamiento T2-5700 cuyo espectro esta compuesto principalmente de luz azul y roja con una relación 2.7:1 (Figura 40). Zhang *et al.* (2018), encontraron que las características de calidad eran mejores para una relación adecuada de luz roja y azul en una relación R:B 2.2:1 en comparación con luz blanca.

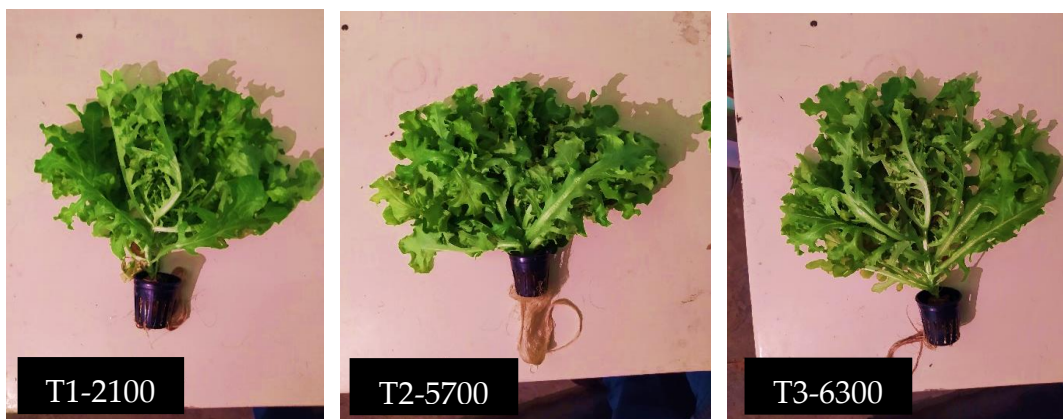


Figura 40. Efectos morfológicos por la de la intensidad de luz.

4.4.3. Consumo hídrico

El mayor consumo de agua se presentó para el tratamiento T2-5700 (Figura 41). El consumo de los dos tratamientos restantes es similar infiriendo que se debe a la alta evaporación del lugar, siendo mayor a la transpiración del cultivo. El consumo hídrico del tratamiento T1-2100 y T3-6300 fueron menores al tratamiento T2-5700 ya que se correlacionan con el rendimiento obtenido.

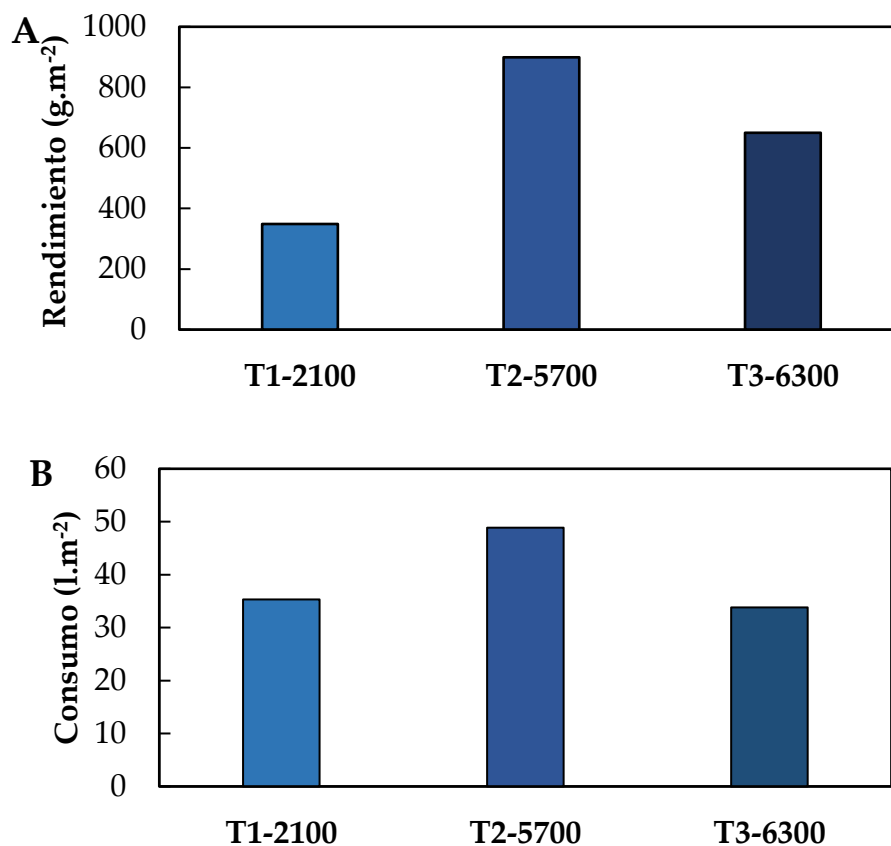


Figura 41. Rendimiento (A) y consumo de agua (B) de la lechuga.

4.4.4. Consumo eléctrico

Debido al bajo rendimiento y al alto consumo de energía del driver empleado en las tiras LED, el tratamiento T1-2100 es el menos eficiente para la producción de lechuga y el más eficiente es el tratamiento T2-5700 (Tabla 13), Saengtharapip *et al.* (2017) obtuvieron una productividad de $117 \text{ g}\cdot\text{kWh}^{-1}$ para leds con 77.5% de luz roja, 20.7% luz azul y 1.2% de rojo lejano, la lechuga se sometió a un periodo de 35 días con una intensidad de $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ y 14 horas de luz, se puede observar que la productividad es mayor a la obtenida en este estudio, se intuye que se debe principalmente a la intensidad de luz, al ser mayor a la proporcionada por las lámparas leds comerciales en México.

Tabla 13. Peso fresco de lechuga sangría cultivada durante 30 días en la granja vertical, consumo de electricidad de las lámparas LED y la productividad de peso fresco por kWh.

Tratamiento	Peso fresco ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) [1]	Consumo eléctrico ($\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}$) [2]	Productividad ($\text{g}\cdot\text{kWh}^{-1}$) [3]=[1]/[2]
T1-2100	348.8	61.3	5.7
T2-5700	899.2	17.9	50.3
T3-6300	650.0	15.8	41.1

Capítulo 5

Conclusiones

Se instalaron tres sistemas de manejo: Sistema de iluminación, ventilación y oxigenación, con el fin de evaluar la viabilidad técnica para la implantación de una fábrica de plantas caseras. Para el monitoreo se desarrolló una plataforma usando tecnología IoT, sensores de Arduino y programación en Python. Entre las conclusiones de este trabajo se cuenta la utilidad de la programación para el monitoreo y la viabilidad de los sensores para el registro de las variables comparativamente precisas con respecto a sensores comerciales, encendiendo en las horas preestablecidas. El módulo de reloj no presentó retrasos importantes en la hora por lo que lo convierte en un módulo confiable y preciso. El bajo costo de Arduino y el módulo esp8266 los hacen robustos para automatizar procesos y monitorearlos a través de internet. La pérdida de datos por fallas en la conexión con el servidor se pudo evitar al guardar los datos en una memoria microSD. Las alertas por SMS permitieron al supervisor de la granja vertical revisar los componentes del sistema en caso de alguna falla.

Con respecto a la evaluación de las luces LED con diferentes intensidades de luz, se concluye que una intensidad de 2100 luxes no fue suficiente para el correcto crecimiento de la lechuga y se pudo identificar que una intensidad de 5700 luxes con una relación R:B de 2.7:1 fue la condición óptima para obtener el mayor peso fresco con el menor consumo eléctrico además se obtuvieron menos problemas morfológicos.

La producción de lechugas en el interior de edificios urbanos es técnicamente viable, sin embargo, las lámparas comerciales utilizadas en el estudio carecen de la intensidad de luz suficiente para un desarrollo correcto del cultivo.

Capítulo 6

Limitaciones y Recomendaciones

El desarrollo de la industria PLANT FACTORY ha tenido un desarrollo a nivel empresarial, no obstante, se requiere investigación en las mismas áreas, pero a nivel tecnológico y económico accesible a nivel familiar. En ese sentido se recomienda utilizar lámparas comerciales que proporcionen una intensidad de luz superior a 5700 luxes. En México se pueden encontrar lámparas comerciales con LEDs LM301B creados por Samsung que prometen un alto rendimiento, se sugiere realizar experimentos con dichas lámparas. Debido a que se pretendió mostrar que es posible producir lechuga a bajo costo, la intensidad de las lámparas se midió en luxes, sin embargo, es conveniente medir en PPFD y encontrar una correcta conversión entre unidades e inclusive generar una tabla de conversión de acuerdo a la lámpara, con el fin de hacer una terminología accesible a usuarios potenciales.

No obstante, este estudio, presenta algunas limitaciones tales como el tamaño de la muestra, que podría ampliarse. Otro aspecto sensible es la precisión de los sensores, por lo que será recomendable realizar una prueba de precisión entre las marcas de mayor tradición en el mercado como Campbell, Vaisala o Priva con los respectivos sensores de temperatura y humedad de Arduino para revisar el porcentaje de error y en consecuencia de confiabilidad

La evolución de los sistemas de producción ha ocasionado la adaptación de terminología y metodologías para estimar aspectos que en campo abierto son básicos; uno de estos son los modelos de evapotranspiración. Debido a que se encuentra en espacios cerrados y el medio de cultivo es confinado, el uso de variables ambientales para su cálculo es un tema confuso, hasta la transpiración mismo. Sin embargo, puede desarrollarse investigación que permita comprender el impacto de la evapotranspiración y las variaciones de sus variables para su cálculo: temperatura, humedad y radiación producida por las lámparas LED, sobre la producción de biomasa se puede maximizar el rendimiento del cultivo. Para este tema puede recurrirse a la dinámica de fluidos computacional (CFD) y su manejo con HVAC en condiciones normales e simuladas para el uso eficiente de los recursos.

Literatura citada

- Al-said, F., Hadley, P., Pearson, S., Kan, M. M. & iqbal, Q. (2018). Effect of high temperatura and exposure duration on stem elongation of iceberg lettuce. Pak. J. Agri. Sci., 55(1): 95-101.
- Andrew M. Beacham, Laura H. Vickers & James M. Monaghan (2019). Vertical farming: a summary of approaches to growing skywards. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 94(3), 277-283. Doi: <https://doi.org/10.1080/14620316.2019.1574214>.
- Bayley, D. (2020). Controlled Envionment Production of Romaine Lettuce (*Lactuca sativa*). Thesis.
- Beacham, A. M., Vickers, L. H. & Monaghan, J. M. (2019). Vertical farming: a summary of approaches to growing skywards. *J. Hortic. Sci. and Biotechnol.*, 94(3), 277-283.
- Benke K. & Tomkins B. (2017). Future food-production systems: vertical farming and controlled-environment agriculture, *Sustainability: Science, Practice and Policy*, 13(1), 13-26. Doi: <https://doi.org/10.1080/15487733.2017.1394054>.
- Benton, J. J. (2014). *Complete guide for growing plants hydroponically*. Sout Carolina, USA, CRC Press.
- Berghage, R.D., Beattie, D., Jarrett, A.R., Thuring, C., Razaei, F. & O'Connor, T.P. (2009). GreenRoofs for Stormwater Runoff Control. EPA 600-R-09-026. National Risk ManagementResearch Laboratory Office of Research and Development U.S. Environmental Protec-tion Agency, Cincinnati, OH. Citeseer.
- Caffarri, S., Kouřil, R., Kereïche, S., Boekema, E. J. & Croce, R. (2009). Functional architec-ture of higher plant photosystem II supercomplexes. *EMBO J*, 28(19), 3052–3063. Doi: <https://doi.org/10.1038/emboj.2009.232>.
- Chen M, Schilep M, Willows RD, Cai ZL, Neilan Ba, et al. (2010). A red-shifted chlorophyll. *Science*, 329, 1318-1319.

- Chin, Y. S. & Audah, L. (2017). Vertical farming monitoring system using the internet of things (IoT). AIP Conference Proceedings, 1883(1), 020021. Doi: <https://doi.org/10.1063/1.5002039>.
- Connelly, M. & Hodgson, M. (2008). Sound transmission loss of extensive green roofs – field test results. *Canadian Acoustics*, 36(3), 74-75.
- Contreras, B. O. & Villegas, G. P. A. (2019). Techos verdes para la gestión integral del agua: caso de estudio Chapinero, Colombia. *Tecnología y ciencias del agua*, 10(5), 282-318. Doi: <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-05-11>.
- Conversa, G., Santamaria, P. & Gonnella, M. (2004). Growth, yield, and mineral content of butter head lettuce (*Lactuca sativa* var. *capitata*) grown in NFT. *Acta Hort.*, 659, 621-628.
- Croft, H. & Chen, J. M. (2018). Leaf Pigment Content, Editor(s): Shunlin Liang, Comprehensive Remote Sensing, Elsevier, 117-142. Doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10547-0>.
- Cuauhtemoc, N., J. (2019). Arduino Board in the Automation of Agricultural Irrigation in Mexico, a Review. *EC Agriculture*, 5(9): 550-554.
- de Anda, J., & Shear, H. (2017). Potential of vertical hydroponic agriculture in Mexico. *Sustainability*, 9(1): 1-17.
- Danner, R.I., Mankasingh, U., Anamthawat-Jonsson, K. & Thorarinsdottir, R.I. (2019). Designing aquaponic productionsystems towards integration into greenhouse farming. *Water*, 11, 2123.
- De Vries IM & Van Raamsdonk LWD (1994). Numerical morphological analysis of Lettuce cultivars and species (*Lactuca* sect. *Lactuca*, Asteraceae) P1. *Syst. Evol.*, 193, 125-141.
- Eigenbrod, C. & Gruda, N. (2015). Urban vegetable for food security in cities. A review. *Agron. Sustain. Dev.*, 35, 483–498.
- Fernandez, A. L. M., Ramírez, F. J., Torres, R. M. & López, L. R. (2019). Proposal for the Design of Monitoring and Operating Irrigation Networks Based on IoT, Cloud Computing and Free Hardware Technologies. *Sensors*, 19(10), 2318. Doi: <https://doi.org/10.3390/s19102318>.
- Girardet, H. (2000). Cities, people, planet. Urban Development and Climate Change. Wiley, London, Uk.
- General Electric (2018). The future of farming is vertical.

- Gómez, M. F. C., Ortega, L. N. E., Trejo, T. L. I., Sánchez, P. R., Salazar, M. E. & Salazar, O. J. (2015). La acuaponía: alternativa sustentable y potencial para producción de alimentos en México. *AP Agro Productividad*, 8(3), 60-65.
- Gopinath, P., Vethamoni, P. I. & Gomathi, M. (2017) Aeroponics Soilless Cultivation System for Vegetable Crops. *Chem. Sci. Rev. Lett.*, 6(22), 838-849.
- Goto, E., Both, A. J., Albright, L. D., Langhans, R. W. & Leed, A. R. (1996). Effect of dissolved oxygen concentration on lettuce growth in floating hydroponics. *Proc. Int. Sym. Plant Production in Closed Exosystems. Acta Hort. ISHS*. 440.
- Jha, A. K, Bloch, R. & Lamond, J. (2012). Ciudades e Inundaciones: Guía para la gestión integrada del riesgo de inundaciones en ciudades en el siglo 21. The World Bank.
- Kang, J. H., Krishna Kumar, S., & Atulba, S. (2013). Light intensity and photoperiod influence the growth and development of hydroponically grown leaf lettuce in a closed-type plant factory system. *Hort. Environ. Biotechnol*, 54(6), 501-509.
- Keith, R. (2003). *How to hydroponics*. New York, USA, Futuregarden.
- Koohakan, P., Jeanaksorn, T. & Nuntagij, I. (2008). Major diseases of lettuce grown by comercial nutrient film technique in Thailand. *Sci. Tech. J.*, 8(2), 56-63.
- Kristkova, E., Dolezalova, I., Lebeda, A., Vinter, V. & Novotna, A. (2008) Description of morphological characters of lettuce (*Lactuca sativa* L.) genetic resources. *Hort. Sci.*, 35(3): 113-129.
- Kume, A., Akitsu, T. & Nasahara, K.N. (2018). Why is chlorophyll b only used in light-harvesting systems? *Journal of Plant Research*, 131, 961–972.
- Loconsole, D., Cocetta, G., Santoro, P. & Ferrante, A. (2019) Optimization of LED lighting and quality evaluation of romaine lettuce grown in an innovative indoor cultivation system. *Sustainability*, 11(3), 841.
- López, M. N. A., Barreto, C. W. J., Rodríguez, A. E. D. y Romero, C. J. R. (2020). Evaluación del impacto de un techo verde sobre la escorrentía urbana usando un modelo a escala. *Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia*, 1, 26-34.
- Lu, N., Saengtharapip, S., Takagaki, M., Maruyama, A. & Kikuchi, M. (2019) How Do White LEDs' Spectra Affect the Fresh Weight of Lettuce Grown under Artificial Lighting in a Plant Factory?—A Statistical Approach. *Agricultural Sciences*, 10: 957-974. Doi: <https://doi.org/10.4236/as.2019.107073>.
- Maucieri, C., Nicoletto, C., Van Os, E., Anseeuw, D., Van Havermaet, R. & Junge, R. (2019). Hydroponic technologies. In Goddek, S., Joyce, A., Kotzen, B. y Burnell,

- G. M. (Eds.). Aquaponics food production systems (pp. 77-110). Springer. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_4.
- Miyshita, H., Ohkubo, S., Komatsu, H., Sorimachi, Y., Fukayama, D., Fujinuma, D., Akutsu, S. & Kobayashi, M. (2014). Discovery of chlorophyll d in acaryochloris marina and chlorophyll f in a unicellular cyanobacterium, strain kc1, isolated from lake biwa. *Journal of Physical Chemistry & Biophysics*, 4(4), 1-9. Doi: <https://doi.org/10.4172/2161-0398.1000149>.
- Murakami, A., Miyashita, H., Iseki, M., Adachi, K. & Mimuro, M. (2004). Chlorophyll d in an epiphytic cyanobacterium of red algae. *Science*, 303: 1633. Doi: <https://doi.org/10.1126/science.1095459>.
- Nagle, L., Echols, S. & Tamminga, K. (2017) Food production on a living wall: pilot study. *Journal of Green Building*, 12(3), 23-37.
- Naznin, M. T.; Lefsrud, M., Gravel, V. & Azad, M. O. K. (2019). Blue Light added with Red LEDs Enhance Growth Characteristics, Pigments Content, and Antioxidant Capacity in Lettuce, Spinach, Kale, Basil, and Sweet Pepper in a Controlled Environment. *Plants*, 8(4), 93. Doi: <https://doi.org/10.3390/plants8040093>.
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos. (2012). *Environmental Outlook to 2050: The Consequences of Inaction*. Editorial OECD. Doi: <https://doi.org/10.1787/9789264122246-en>.
- Pareek, S., Sagar, N. A., Sharma, S., Kumar, V., Agarwal, T., González, A. G. A. & Yahia, E. M. (2018). Chlorophylls: Chemistry and Biological Functions. p. 269-284. In: *Fruit and Vegetable Phytochemicals: Chemistry and Human Health*.
- Perini K., Ottelé M., Fraaij A. L. A., Haas E. M. & Raiteri R. (2011). Vertical greening systems and the effect on air Flow and temperatura on the building envelope. *Building and Environment*, 46, 2287-2294. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.05.009>.
- Pinstrup-Andersen, P. (2018). Is it time to take vertical indoor farming seriously? *Global Food Security*, 17, 233–235.
- Pittaluga, I., Schenone, C. & Borelli, D. (2011). Proceedings of Meetings on Acoustics. *Acoustical Society of America*, 14, 1-13. Doi: <https://doi.org/10.1121/1.3654256>.
- Rakhshandehroo, M., Yusof, M., Johari, M., & Arabi, R. (2015). Living Wall (Vertical Greening): Benefits and Threats. In *Applied Mechanics and Materials* 747: 16-19.

- Resh, M. H. (2013). Hydroponic food production. A definitive guidebook for the advances home gardener and the comercial hydroponic grower. CRC Press Taylor & Francis Group.
- Ruscio, F., Paoletti, P. Thomas, J., Myers, P. & Fichera, S. (2019). Low-cost monitoring system for hydroponic urban vertical farms. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Agricultural and Biosystems Engineering*, 13(10), 267-271.
- Saengtharatip, S., Lu, N., Takagaki, M. & Kikuchi, M. (2018). Productivity and Cost Performance of Lettuce Production in Plant Factory Using Various Light-Emitting Diodes of Different Spectra. *ISSAAS Journal*, 24, 1-9.
- Saavedra, G. (2017). Germinación, crecimiento y desarrollo. p. 27-32. En: Saavedra, G. (Ed.). *Manual de producción de lechuga*. Instituto de investigaciones Agropecuarias.
- Sill, C. & Serbin, I. (2018). Vertical farming: a revolution to sustainable agriculture. University of Pittsburgh Swanson School of Engineering.
- Shafi, U., Mumtaz, R., García, N. J., Ali, H. S., Raza, Z. S. A. & Iqbal, N. (2019). Precision Agriculture Techniques and Practices: From Considerations to Applications. *Sensors*, 19, 3796. Doi: <https://doi.org/10.3390/s19173796>.
- Shafique, M., Kim, R. & Kyung-Ho, K. (2018). Green Roof for Stormwater Management in a Highly Urbanized Area: The Case of Seoul, Korea. *Sustainability*, 10(584): 1-14. Doi: <https://doi.org/10.3390/su10030584>.
- Specht, K., Siebert, R., Hartmann, I., Freisinger, U. B., Sawicka, M., Werner, A., Thomaier, S., Henckel, Walk, H. & Dierich, A. (2014). Urban agriculture of the future: an overview of sustainability aspects of food production in and on buildings. *Agric Hum Values*, 31, 33–51. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10460-013-9448-4>.
- Still, D.W. (2007). Genome Mapping and Molecular Breeding in Plants. p. 127-128. In: Kole, C. (Ed.). *Vegetables*. Vol. 5.
- Suyantohadi, A., Kyoren, T., Hariadi, M., Purnomo, M. H. & Morimoto, T. (2010). Effect of high concentrated dissolved oxygen on the plant growth in a deep hydroponic culture under a low temperature. *IFAC Proceedings*, 46(26), 251-255. Doi: <https://doi.org/10.3182/20101206-3-JP-3009.00044>.
- Theodosiou, T. (2009) Green roofs in buildings: thermal and environmental behaviour. *Earthscan*, 3, 271-288. Doi: 10.3763/aber.2009.0311.

- Wilde E. (1999). Hypertext Transfer Protocol (HTTP). In: Wilde's WWW. Springer, Berlin, Heidelberg. Doi: https://doi.org/10.1007/978-3-642-95855-7_4.
- Wurr D. C. E., J. R. Fellows & A. J. Hambidge (1992). Environmental factors influencing head density and diameter of crisp lettuce cv. Saladin. *J. Hort. Sci.*, 67(3), 395-401.
- Xu, H., Vavilin, D., & Vermaas, W. (2001). Chlorophyll b can serve as the major pigment in functional photosystem II complexes of cyanobacteria. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 98(24), 14168–14173. Doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.251530298>.
- Yang, J., Yu, Q. & Gong, P. (2008). Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago. *Atmospheric Environment*, 42, 7266-7273. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.07.00>.
- Zhang, X., He, D., Niu, G., Yan, Z. & Song, J. (2018). Effects of environment lighting on the growth, photosynthesis, and quality of hydroponic lettuce in a plant factory. *Int J. Agric. and Biol. Eng.*, 11(2): 33-40.
- Zhang, T., Shi, Y., Wang, Y., Liu, Y., Zhao, W., Piao, F. & Sun, Z. (2017). The effect of different spectral LED light on the phenotypics and physiological characteristics of lettuce (*Lactuca sativa*) at picking stage. *J. Biochem. Biotech.* 1(1), 14-19.