

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE AGRONOMÍA



INFLUENCIA DE LA INTENSIDAD Y CALIDAD DE LUZ EN EL CRECIMIENTO Y PROPIEDADES ANTIOXIDANTES EN CULTIVO DE LECHUGA (*LACTUCA SATIVA* L.) BAJO SISTEMA FÁBRICA DE PLANTAS

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

P R E S E N T A

VICTOR HUGO AVENDAÑO ABARCA

MARZO 2019

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE AGRONOMÍA



INFLUENCIA DE LA INTENSIDAD Y CALIDAD DE LUZ EN EL CRECIMIENTO Y PROPIEDADES ANTIOXIDANTES EN CULTIVO DE LECHUGA (*LACTUCA SATIVA* L.) BAJO SISTEMA FÁBRICA DE PLANTAS

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

P R E S E N T A

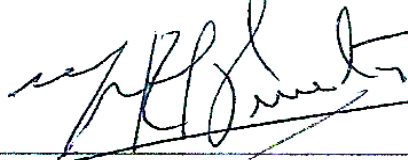
VICTOR HUGO AVENDAÑO ABARCA

MARZO 2019

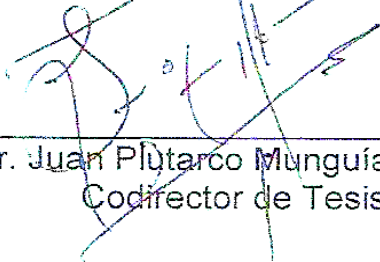
ESTA TESIS FUE REVISADA Y APROBADA POR EL
COMITÉ PARTICULAR COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE

DOCTOR EN CIENCIAS AGRÍCOLAS


COMITÉ PARTICULAR



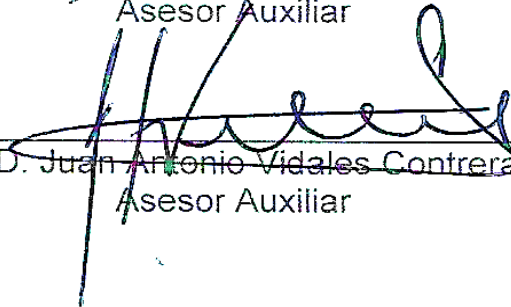
Dr. Humberto Rodríguez Fuentes
Director de Tesis



Dr. Juan Plutarco Munguía López
Codirector de Tesis



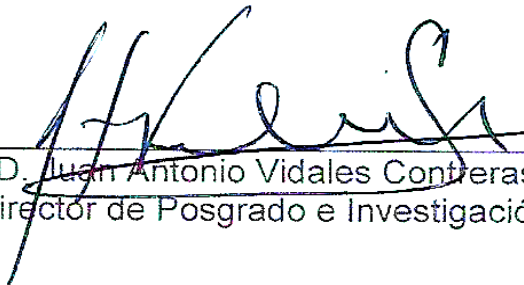
Dr. Alejandro Isabel Luna Maldonado
Asesor Auxiliar



Ph. D. Juan Antonio Vidales Contreras
Asesor Auxiliar



Dra. Julia Mariana Márquez Reyes
Asesor Auxiliar



Ph. D. Juan Antonio Vidales Contreras
Subdirector de Posgrado e Investigación

DEDICATORIA

Por la fortaleza que me ha brindado en los momentos difíciles y por su amor infinito, humildemente dedico este trabajo primeramente a Dios, así como a mi hermosa familia que me ha brindado su amor, confianza y apoyo incondicional. Con especial cariño y amor a mi hermano José H. Avendaño y a mis abuelos Sara Hernández, Rosemberg Avendaño y Enoc Abarca, personas que siempre llevare en mi mente y corazón.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y al Programa de Apoyo a la Investigación Científica y Tecnológica (PAICYT) de la Dirección General de Investigación de la Universidad Autónoma de Nuevo León, por el financiamiento otorgado para la realización de estudios de posgrado y desarrollo de este proyecto de investigación.

A la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León por darme la oportunidad para poder obtener un logro más en mi formación profesional y por haberme dado la oportunidad de realizar este trabajo, poniendo a mi disposición todos los medios necesarios para llevarlo a cabo.

Al Dr. Humberto Rodríguez Fuentes por el apoyo brindado en la realización de esta investigación, por sus consejos, observaciones y enseñanzas, así como por su dedicación, que me han permitido aprender y alcanzar las metas propuestas para este trabajo.

A los doctores Juan Plutarco Munguía López, Alejandro Isabel Luna Maldonado, Juan Antonio Vidales Contreras y Julia Mariana Márquez Reyes, por formar parte del Comité de Tesis, así como por sus valiosas sugerencias en la revisión del presente trabajo.

Al Dr. Guillermo Niño Medina y al MC. Pablo Alan Rodríguez Salinas por su colaboración en las determinaciones de compuestos antioxidantes.

Al Ingeniero Fernando Cabrieles Luna encargado del Laboratorio de Suelos, Plantas y Aguas de la Facultad de Agronomía Campus Marín por su apoyo en las determinaciones de absorción nutrimental del cultivo.

A la MC. Dulce González Sandoval por su apoyo en todo el proceso y desarrollo de este trabajo de investigación.

Este Trabajo de Investigación fue realizado y Asesorado por integrantes del Cuerpo Académico (Prodep) Ambiente y Sustentabilidad que comprende las siguientes líneas de generación y aplicación del conocimiento (LGAC).

Nombre de la línea	Descripción
Desarrollo y mejora de técnicas de producción de cultivos	Desarrollar técnicas de manejo de producción de cultivos y relacionarlos con modelos matemáticos con énfasis en invernaderos e hidroponía, evaluando el uso de sustratos regionales, el manejo de la fertirrigación, el reciclaje de soluciones nutritivas y los estudios sobre fisiología de las plantas.
Degradación y remediación de ecosistemas naturales y urbanos	Generar y aplicar conocimientos específicos en el área de ecología de áreas degradadas que contribuyan a una eficiente planificación y administración de la sustentabilidad del ambiente y recursos naturales.
Microbiología cuantitativa e inocuidad alimentaria	El planteamiento de modelos de simulación para predecir el comportamiento de procesos microbiológicos que ocurren en la naturaleza ha dado lugar a la microbiología cuantitativa, ejemplo de su aplicación es la simulación del comportamiento de pantanos construidos para remover la carga de microorganismos del agua residual, trazar el movimiento de microorganismos en medios porosos y la incorporación de ecuaciones de crecimiento bacterial al diseño de biorreactores, entre otros.
Tecnología aplicada a la remediación del suelo, agua y alimento	Investigar la contaminación de los metales pesados, hidrocarburos y plaguicidas agrícolas en suelo, agua y alimentos, los cuales presentan el riesgo que al ingresar a las redes tróficas afectan negativamente la vida de los ecosistemas, en esta línea se consideran tecnologías de biodegradación y bioextracción con alternativas de la biorremediación.

Integrantes del Cuerpo Académico Ambiente y Sustentabilidad:

Dictaminado como: CONSOLIDADO por el Prodep (2015-2020)

Dr. Cs. Humberto Rodríguez Fuentes

Dr. Alejandro Isabel Luna Maldonado

Ph. D. Juan Antonio Vidales Contreras

Dra. Julia Mariana Márquez Reyes (Colaboradora)

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE CONTENIDO	viii
ÍNDICE DE CUADROS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DEL APÉNDICE	xiii
LISTA DE ABREVIATURAS	xiv
RESUMEN	xvi
1. INTRODUCCIÓN	18
2. REVISIÓN DE LITERATURA	20
2.1. Generalidades del Cultivo de Lechuga	20
2.1.1. Características Botánicas	20
2.1.2. Requerimientos Climáticos	21
2.1.3. Requerimientos Nutrimientales.....	21
2.1.4. Propiedades Antioxidantes	22
2.1.5. Importancia Comercial del Cultivo de Lechuga.....	24
2.2. Sistema de Producción Fábrica de Plantas	25
2.2.1 Principales Elementos a Considerar en un Sistema de Producción Fábrica de Plantas.....	26
2.2.1.1. Sistema de iluminación.....	26
2.2.1.2 Tipo de sistema hidropónico.....	28
2.2.1.2.1 Sistema de raíz flotante.....	28
2.2.1.2.2. Sistema NFT.	29
2.2.2. Variables de Control en un Sistema de Producción Fábrica de Plantas ...	30
2.2.2.1. Variables ambientales	30
2.2.2.1.1. Temperatura.....	30
2.2.2.1.2. Humedad relativa.	31
2.2.2.1.3. Concentración de CO ₂	31
2.2.2.1.4. Luz.	32
2.2.2.2. Variables de solución nutritiva	36
2.2.2.2.1. Concentración de nutrientes: principio de balance de masa.	36
2.2.2.2.2. Temperatura de la SN.	37
2.2.2.2.3. Conductividad eléctrica.	37
2.2.2.2.4. pH.....	38
2.2.2.2.5. Oxígeno disuelto.	38
3. HIPÓTESIS	40
3.1. Objetivo General	40
3.1.1. Objetivos Específicos.....	40
4. MATERIALES Y MÉTODOS	42
4.1. Material Biológico y Nutrición del Cultivo	42
4.2. Tratamientos	44

4.3. Etapa 1: Establecimiento del Sistema de Producción Fábrica de Plantas	46
4.3.1. Sistema de Monitoreo de Variables Climáticas y Control Automático de Encendido/Apagado de Lámparas y Bomba Hidráulica.....	47
4.3.1.1. Principio de funcionamiento del sistema de monitoreo y control	49
4.3.1.2. Calibración.....	51
4.3.2. Diseño y Construcción de Sistema Hidropónico	51
4.4. Etapa 2: Estimación de Curva de Crecimiento y Absorción Nutricional	
Total por Planta.....	55
4.4.1 Variables Evaluadas	55
4.4.2. Análisis Estadístico	55
4.5. Etapa 3: Determinación de Compuestos Antioxidantes	56
4.5.1 Variables Evaluadas	56
4.5.2. Obtención de Extractos.....	56
4.5.3. Compuestos Fenólicos Totales (FT)	56
4.5.4. Compuestos Flavonoides Totales (FLT)	57
4.5.5. Compuestos no Flavonoides Totales (NFLT)	57
4.5.6 Capacidad Antioxidante	57
4.5.6.1. DPPH (1,1-difenil-2-picrilhidrazilo).....	57
4.5.6.2. ABTS (2,2'azinobis-(3- etilbenzotiazolina)-6-sulfónico)	58
4.5.7. Análisis Estadístico	58
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	59
5.1. Crecimiento	59
5.1.1. Peso Fresco y Peso Seco.....	59
5.1.2. Curva de Crecimiento	66
5.1.3. Absorción Nutricional.....	68
5.1.4. Cantidad de Luz Acumulada	70
5.2. Compuestos Antioxidantes.....	72
5.2.1 Compuestos Fenólicos Totales (FT), Compuestos Flavonoides Totales (FLT) y Compuestos No Flavonoides Totales (NFLT)	72
5.2.2. Capacidad Antioxidante DPPH y ABTS	76
5.3. Requerimientos Hídricos, Nutricionales y Lumínicos para la Producción de Lechuga Romana Tipo Baby Bajo el Sistema Fábrica de Plantas.....	82
6. CONCLUSIONES	85
7. BIBLIOGRAFÍA	86
8. APÉNDICE.....	94

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Principales compuestos fenólicos presentes en el cultivo de <i>Lactuca sativa</i> L. (DuPont et al., 2000; Lorach et al., 2008).....	23
Cuadro 2. Comparación de parámetros de dispositivos de iluminación artificial: diodo emisor de luz (LED), lámpara de sodio a alta presión (HPS), lámpara incandescente y fluorescente.	27
Cuadro 3. Requerimientos de intensidad de luz, fotoperiodo y luz integral diaria, para la producción de cultivos en un SPFP.	35
Cuadro 4. Solución nutritiva estándar y fuentes de nutrimentos comerciales empleados para la nutrición del cultivo de <i>Lactuca sativa</i> L. var. <i>Longifolia</i> Lam cv. Parris Island bajo el SPFP.....	43
Cuadro 5. Composición de radiación electromagnética emitida por las fuentes de iluminación artificial para la producción de <i>Lactuca sativa</i> L. var. <i>Longifolia</i> Lam cv. Parris Island bajo el SPFP.	45
Cuadro 6. Peso seco de parte aérea y raíz del cultivo de <i>Lactuca sativa</i> L. var. <i>Longifolia</i> Lam cv. Parris Island a los 0,8, 16 y 24 días después de trasplante (DDT) bajo tres tratamientos de intensidad de luz: $t_1=121.41$; $t_2=140.31$ y $t_3=224.47 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, cultivada en un SPFP. ($\bar{X}\pm\text{DE}$; $n=5$).....	65
Cuadro 7. Cantidad de luz acumulada a los 24 DDT para la producción de <i>Lactuca sativa</i> L. var. <i>longifolia</i> Lam cv. Parris Island cultivada en un SPFP.	71
Cuadro 8 Concentración de fenoles totales (FT), flavonoides totales (FLT), no flavonoides totales (NFLT) en hojas de <i>Lactuca sativa</i> L. var. <i>longifolia</i> Lam cv. Parris Island a los 0, 8, 16 y 24 días después de trasplante (DDT) cultivada en un SPFP. ($\bar{X}\pm\text{DE}$; $n=5$).	74
Cuadro 9. Requerimiento nutrimental y de cantidad de luz acumulada (CLA) para la producción de 201 plantas de <i>Lactuca sativa</i> L. var. <i>longifolia</i> Lam cv. Parris Island cultivadas en un espacio de 1 m^3 bajo el SPFP en un periodo de 24 días.....	82
Cuadro 10. Costos de fuentes de nutrimentos comerciales requeridos para la producción de 201 plantas de <i>Lactuca sativa</i> L. var. <i>longifolia</i> Lam cv. Parris Island cultivadas en un espacio de 1 m^3 bajo el SPFP en un periodo de 24 días.....	83
Cuadro 11. Requerimiento hídrico para la producción de 201 plantas de <i>Lactuca sativa</i> L. var. <i>longifolia</i> Lam cv. Parris Island cultivadas en un espacio de 1 m^3 bajo el SPFP en un periodo de 24 días.....	84

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1. Esquema utilizado para la programación del sistema de monitoreo de variables climáticas y control automático de encendido/apagado del sistema de iluminación y bomba hidráulica..... 48
- Figura 2. Diagramas de flujo de funcionamiento del: a) Sistema de encendido/apagado de lámparas y b) Sistema de monitoreo y almacenamiento de variables climáticas..... 50
- Figura 3. Conformación de cada nivel del sistema hidropónico tipo torre (en cm). ... 53
- Figura 4. Diseño del sistema hidropónico NFT tipo torre empleado para la producción de *Lactuca sativa* L. var. *longifolia* Lam cv. Parris Island bajo SPFP. 54
- Figura 5. Comparación de medias entre tratamientos por fechas de muestreo del peso fresco de *Lactuca sativa* L. var. *longifolia* Lam cv. Parris Island. Las barras verticales en cada punto representan la desviación estándar de la media basada en un tamaño de muestra igual a 5..... 61
- Figura 6. Comparación de medias entre fechas de muestreo por tratamiento del peso fresco de *Lactuca sativa* L. var. *longifolia* Lam cv. Parris Island. Las barras verticales en cada punto representan la desviación estándar de la media basada en un tamaño de muestra igual a 5..... 62
- Figura 7. Comparación de medias entre tratamientos por fechas de muestreo del peso seco de *Lactuca sativa* L. var. *longifolia* Lam cv. Parris Island. Las barras verticales en cada punto representan la desviación estándar de la media basada en un tamaño de muestra igual a 5..... 63
- Figura 8. Comparación de medias entre fechas de muestreo por tratamiento del peso seco de *Lactuca sativa* L. var. *longifolia* Lam cv. Parris Island. Las barras verticales en cada punto representan la desviación estándar de la media basada en un tamaño de muestra igual a 5..... 64
- Figura 9. Curva de crecimiento del cultivo de *Lactuca sativa* L. var. *longifolia* Lam cv. Parris Island en base a peso seco (raíz + hojas) bajo tres tratamientos de intensidad de luz: $t_1=121.41$; $t_2=140.31$ y $t_3=224.47 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, cultivada en un SPFP. Las barras verticales en cada punto representan la desviación estándar de la media basada en un tamaño de muestra igual a 5. 67
- Figura 10. Absorción total de nutrimentos por planta del cultivo de *Lactuca sativa* L. var. *longifolia* Lam cv. Parris Island en base a peso seco (raíz + hojas) a los 24 días después de trasplante bajo tres tratamientos de intensidad de luz: $t_1=121.41$; $t_2=140.31$ y $t_3=224.47 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, cultivada en un SPFP. Las barras verticales representan la desviación estándar de la media basada en un tamaño de muestra igual a 5; letras minúsculas representan la comparación de medias entre tratamientos ($p \leq 0.05$). 69
- Figura 11. Comparación de medias entre tratamientos por fechas de muestreo de la capacidad antioxidante (DPPH y ABTS) en hojas de *Lactuca sativa* L. var.

Longifolia Lam cv. Parris Island. Las barras verticales en cada punto representan la desviación estándar de la media basada en un tamaño de muestra igual a 5. 79

Figura 12. Comparación de medias entre fechas de muestreo por tratamiento de la capacidad antioxidante (DPPH y ABTS) en hojas de *Lactuca sativa* L. var. *Longifolia* Lam cv. Parris Island. Las barras verticales en cada punto representan la desviación estándar de la media basada en un tamaño de muestra igual a 5. 80

ÍNDICE DEL APÉNDICE

A 1. Código de programación para el monitoreo, registro y almacenamiento de variables ambientales: temperatura, humedad relativa, concentración de CO ₂ en el aire e intensidad de luz.	94
A 2. Código de programación para el control automático de encendido/apagado del sistema de iluminación y bomba hidráulica.....	98
A 3. Sensores y equipos utilizados para el sistema de monitoreo/almacenamiento de variables climáticas.....	100
A 4. Equipos utilizados para el desarrollo del sistema de control de encendido/apagado de la bomba hidráulica y sistema de iluminación.....	101
A 5. Sistema hidropónico tipo torre de 6 niveles para la producción de lechuga romana tipo baby bajo el SPFP.	102
A 6. Tratamientos de luz establecidos en el sistema hidropónico tipo torre para la producción de lechuga romana tipo baby bajo el SPFP.	103
A 7. Crecimiento de cultivo de lechuga romana tipo baby a los 8 DDT bajo el SPFP sujeto a el tratamiento de luz $t_3=224.47 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	104
A 8. Crecimiento de cultivo de lechuga romana tipo baby a los 16 DDT bajo tres tratamientos de intensidad de luz: $t_1=121.41$; $t_2=140.31$ y $t_3=224.47 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	105

LISTA DE ABREVIATURAS

SPFP	Sistema de producción fábica de plantas
FP	Fábrica de Plantas
LED	Diodo emisor de luz
LID	Luz integral diaria
SIAP	Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera
PF	Fábrica de plantas
HPS	Lámparas de sodio a alta presión
SN	Solución nutritiva
NFT	Nutrient Film Technique
HR	Humedad relativa
CE	Conductividad eléctrica
EROs	Especies reactivas de oxígeno
EUA	Estados Unidos de América
Var	Variedad
cv	Cultivar
PVC	Policloruro de vinilo
DDT	Días después de trasplante
FT	Fenoles totales
FLT	Flavonoides totales

NFLT	No flavonoides totales
CA	Capacidad antioxidante
DPPH	1,1-difenil-2-picril-hidrazilo
ABTS	2,2'azinobis-(3-etilbenzotiazolina)-6-sulfónico
EAG	Equivalentes de ácido gálico
ECat	Equivalentes de catequina
ET	Equivalentes de trolox
\bar{X}	Media
DE	Desviación estándar
n	Tamaño de muestra
R²	Coefficiente de determinación
CLA	Cantidad de luz acumulada

RESUMEN

Esta investigación se dividió en tres etapas y se realizó en el Laboratorio de Sistema de Producción en Ambiente Controlado ubicado en el Campus de Ciencias Agropecuarias dentro de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

En la primer etapa se diseñó e implementó el Sistema de Producción Fábrica de Plantas, para esto se desarrolló un sistema de monitoreo y almacenamiento de variables climáticas (temperatura, humedad relativa, concentración de CO₂ ambiental e intensidad de luz) y un sistema de control automático del encendido y apagado de lámparas y bomba hidráulica para el suministro de solución nutritiva mediante una plataforma de hardware de código abierto Arduino, además de esto, se diseñó y construyó un sistema hidropónico NFT tipo torre para la producción de *Lactuca sativa* con una capacidad de producción de 201 plantas·m⁻³.

En la segunda etapa se evaluó la influencia de la calidad e intensidad de luz en el crecimiento y absorción total de nutrimentos en el cultivo de lechuga romana tipo baby. Se establecieron tres tratamientos de intensidad: t₁=121.41 μmol·m⁻²·s⁻¹ (rojo y azul), t₂=140.31 μmol·m⁻²·s⁻¹ (rojo y azul) y t₃=224.47 μmol·m⁻²·s⁻¹ (rojo, azul y suplemento de luz blanca). Las variables de crecimiento evaluadas fueron: peso fresco y seco de raíz y hojas a los 0, 8, 16 y 24 días después de trasplante y absorción total nutrimental final por planta (N, P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Zn y Mn). Los resultados mostraron diferencias significativas entre tratamientos ($p \leq 0.05$), destacando un mayor

crecimiento del cultivo bajo el tratamiento de luz roja+azul+blanca tanto en peso seco, peso fresco y absorción total de nutrimentos, demostrando así que a mayor intensidad de luz considerando su calidad (longitudes de onda irradiadas) se promueve un mayor crecimiento en el cultivo. La eficiencia en la producción de peso seco con respecto a la cantidad de luz acumulada (CLA) disminuyó en el t_3 debido a que la luz blanca proporcionó otras longitudes de onda que no son tan eficientes en los procesos fotosintéticos comparados con el rojo y azul (t_1 y t_2); requiriendo una CLA igual a $1.65 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$ para producir 1 g de peso seco, valor superior al obtenido por t_1 ($1.41 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$) y t_2 ($1.30 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$).

En la tercera etapa se evaluó la influencia de la intensidad y la calidad de la luz en la concentración de compuestos antioxidantes durante el ciclo de producción de lechuga romana tipo baby (0, 8, 16 y 24 días después de trasplante) bajo tres tratamientos de luz: $t_1=121.41 \text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (rojo y azul), $t_2=140.31 \text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (rojo y azul) y $t_3=224.47 \text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (rojo, azul y suplemento de luz blanca). Las variables evaluadas fueron la concentración total de fenoles y flavonoides, compuestos no flavonoides, así como la capacidad antioxidante mediante ensayos de DPPH y ABTS. Los resultados mostraron diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0.05$) entre tratamientos y fechas de muestreo. El t_2 presentó la concentración más alta en todas las variables. La concentración de compuestos antioxidantes en t_1 y t_3 fue estadísticamente igual ($p \leq 0.05$).

1. INTRODUCCIÓN

La agricultura protegida es un sistema de producción que emplea diversas estructuras para la protección de los cultivos con la finalidad de proporcionar condiciones adecuadas para su crecimiento y desarrollo, esta forma de producción se ha ido desarrollando con el paso del tiempo, generando múltiples ventajas, debido a que es posible obtener productos fuera de temporada y en menor tiempo (precocidad), además de tener un mejor control de plagas y enfermedades, mayor producción en menor espacio y productos de mayor valor comercial. De las estructuras más conocidas empleadas en agricultura protegida destacan los invernaderos (Reséndiz, 2011) que permiten un control climático parcial (Arellano-García *et al.*, 2011) debido a la baja eficiencia de los sistemas de control empleados y a su interacción con el ambiente exterior (sistema abierto), a partir de esta desventaja surge el concepto de producción agrícola bajo ambientes controlados denominado como Sistema de Producción Fábrica de Plantas (SPFP) (Kozai, 2013).

Fábrica de Plantas (FP) es el sistema de producción agrícola más avanzado debido al control total de las variables climáticas que influyen en el crecimiento de los cultivos, presentando múltiples ventajas respecto a la producción en campo abierto y bajo invernadero como el uso eficiente de todos los insumos para la producción agrícola (Kitaya *et al.*, 1998; Kozai, 2013; Kozai *et al.*, 2015).

El SPFP maximiza la producción de los cultivos empleando iluminación artificial a base del diodo emisor de luz (LED), dispositivo tecnológico que presenta mayores ventajas

que los dispositivos convencionales, como poder emitir longitudes de onda específicas y ajustadas para proporcionar a las plantas una fuente de luz capaz de aportar la energía necesaria para estimular en forma óptima los procesos fotosintéticos (destacan las longitudes de onda del color rojo: 610–750 nm y azul: 400–520 nm), así como la posibilidad de promover la síntesis de ciertos metabolitos secundarios de interés comercial como los compuestos antioxidantes a partir de la inducción de un estrés foto-oxidativo, sin embargo, la magnitud de este efecto promotor dependerá del espectro de luz incidente en el cultivo, su intensidad y fotoperiodo, así como también la especie vegetal, variedad y etapa de crecimiento (Fan y Jao, 2000; Lefsrud *et al.*, 2008; Li y Kubota, 2009; Mizuno *et al.*, 2011; Žukauskas *et al.*, 2011; Samouline *et al.*, 2012; Tarakanov *et al.*, 2012).

Entre las especies hortícolas más cultivadas en este tipo de sistema de producción destacan las hortalizas de hojas, siendo *Lactuca sativa* L. la especie de mayor interés, esto por su capacidad de crecimiento a baja intensidad de luz, alta densidad de población, porte bajo, rápido crecimiento y rentabilidad (Kozai, 2013).

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Generalidades del Cultivo de Lechuga

2.1.1. Características Botánicas

El cultivo de lechuga es una especie vegetal perteneciente a la familia Asteraceae y nombre científico *Lactuca sativa* L.

Debido al gran número de variedades de esta especie vegetal se encuentra una gran variabilidad morfológica entre ellas; pero entre sus características principales destacan:

La lechuga es una planta anual y en algunos casos bianual, autógena, de porte erecto y altura de hasta 1 m, con raíz pivotante y ramificada de unos 25 cm aproximadamente.

Su crecimiento se presenta en roseta o a veces arrepollada; con hojas caulinares sésiles, abrazadoras, aovadas u orbiculares con base amplexicaule que se disponen alrededor de un tallo central, corto y cilíndrico que gradualmente se va alargando para producir las inflorescencias, este tallo se ramifica desde un tercio de su altura y presenta numerosas hojas disminuyendo su tamaño conforme aumenta su altura, terminando en una inflorescencia formada por numerosos capítulos de flores amarillas.

Las semillas son frutos en aquenio pequeños, de color blanco o negruzco provistas de un vilano plumoso con un peso aproximado por semilla de 1.25 mg (Maroto, 2000; Pérez, 1998).

2.1.2. Requerimientos Climáticos

Los requerimientos climáticos del cultivo de lechuga permiten que esta se cultive especialmente en las regiones templadas y subtropicales. Las condiciones óptimas de temperatura a campo abierto son 17 a 22 °C durante el día y 3 a 12 °C durante la noche (Thompson *et al.*, 1998); como temperatura máxima de crecimiento se puede considerar los 30 °C y como mínima de hasta -1 °C (Jaques y Hernández, 2005).

Bajo condiciones de SPFP el cultivo de lechuga requiere hasta los 25 días después de trasplante una temperatura de 22 a 26 °C y posteriormente de 20 a 24 °C hasta la cosecha (Choi *et al.*, 2000).

Su requerimiento mínimo de intensidad de luz en condiciones de campo abierto es de 107.67 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ y un fotoperiodo de 14 a 15 horas luz, valores inferiores a los requeridos por el cultivo en el SPFP, el cual requiere una intensidad de luz entre los 200 a 300 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ y un fotoperiodo de 18 y 16 horas respectivamente para obtener una luz integral diaria (LID) mínima de 12 $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$ y óptima de 17 $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$ (Yoon y Coi, 2011; Kozai *et al.*, 2015).

Para el caso de la humedad relativa del aire (HR) y concentración de CO₂ los valores recomendados para la producción de cultivo bajo el SPFP oscilan desde el 30 hasta 80 % y 400 hasta 2000 ppm respectivamente (Choi *et al.*, 2000; Park *et al.*, 2012; Kang *et al.*, 2013, Kozai *et al.*, 2015).

2.1.3. Requerimientos Nutrimientales

El grado de absorción nutrimental depende de diferentes factores, como los referentes a la especie vegetal y su estado de desarrollo, así como factores externos relacionados con el ambiente bajo el cual el cultivo crece (temperatura, humedad, condición de luz, etc.). El conocimiento de los requerimientos nutrimentales durante el ciclo de cultivo

permite definir y dosificar las aplicaciones de los fertilizantes en los programas de fertilización, mejorando la eficiencia en el uso de estos. Además de poder conocer la calidad nutritiva de las partes comestibles de la planta para el consumo humano o animal (Sancho, 1999).

La concentración nutrimental óptima en hojas en base a biomasa seca para el cultivo de lechuga (criterio para el diagnóstico del estado nutrimental) es de 4.7 a 5.5 % para N, 0.5 a 1.0 % para P, 7.5 a 9.0 % para K, 2.0 a 3.0 % para Ca, 0.5 a 0.8 % para Mg, 23 a 50 mg·kg⁻¹ para B, 8.0 a 25 mg·kg⁻¹ para Cu, 50 a 100 mg·kg⁻¹ para Fe, 15 a 250 mg·kg⁻¹ para Mn y 20 a 250 mg·kg⁻¹ para Zn (Rodríguez y Rodríguez, 2015) y una absorción total por planta (parte aérea+raíz) (mg·planta⁻¹) de 550 mg de N, 185 mg de P, 858 mg de K, 280 mg de Ca, 72 mg de Mg, 421 mg de S, 6 mg Cu, 13 mg de Fe, 14 mg de Mn, 5 mg de Zn y 5 mg de B (Ferrufino *et al.*, 2006).

2.1.4. Propiedades Antioxidantes

El cultivo de lechuga aporta principalmente a la dieta humana minerales, fibra, agua y compuestos antioxidantes como vitaminas, carotenos y fenoles (Hohl *et al.*, 2001); la importancia de estos últimos radica en que son considerados como compuestos bioactivos que benefician la salud humana debido a que reducen la incidencia de algunas enfermedades degenerativas como la diabetes, el cáncer y los factores de riesgo de enfermedades cardiovasculares, así como los procesos de envejecimiento (Rakić *et al.*, 2007; Castro-López *et al.*, 2016), además de influir en la apariencia, el color, el sabor y el aroma del cultivo (Luna, 2012).

Los compuestos fenólicos de mayor presencia en este cultivo (Cuadro 1) son los ácidos fenólicos, flavonoides, flavononas y antocianos.

Cuadro 1. Principales compuestos fenólicos presentes en el cultivo de *Lactuca sativa* L. (DuPont *et al.*, 2000; Lorach *et al.*, 2008).

Ácidos Fenólicos	Flavonoles	Flavononas
Ác. Cafeoyltartárico	Quercetín-3-O-glucurónido	Luteolín-7-glucurónido
Ác. Clorogénico	Quercetín-3-O-glucósido	
Ác. Cafeoylmálico	Quercetín-3-O-rutinósido	
Ác. Chicórico	Quercetín-3-O-(6"-O-manoyl)-glucósido	
Ác. Meso-di-O-Cadeoiltartárico		
Ác. Isoclorogénico		

2.1.5. Importancia Comercial del Cultivo de Lechuga

El cultivo de lechuga es de gran importancia económica debido al crecimiento de la demanda y exigencia que existe en los mercados consumidores. A nivel internacional hasta el 2011 la mayor producción se localizaba en China, EUA y España.

En México los datos históricos de producción del cultivo de lechuga muestran una superficie total sembrada de 19,440.40 ha con una producción promedio de 21.43 ton·ha⁻¹, ubicando a Guanajuato, Zacatecas y Puebla como los tres estados de mayor producción (SIAP, 2014).

Bajo SPFP la producción de lechuga se ubica principalmente en Japón, Taiwán, Corea, China, EUA, Inglaterra y Países Bajos.

En 2014, Japón mantenía alrededor de 170 SPFP con producciones de 1000 (en un área de 1 500 m²) hasta 10 000 cabezas de lechuga por día con un peso entre los 50-100 g, comercializando el 40 % en supermercados, 30 % en cadenas restauranteras, 20 % en empresas de servicios de entrega a domicilio y 10 % en tiendas de conveniencia.

De los 56 SPFP ubicados en Taiwán, solo una de ellas mantiene una producción de 10,000 plantas por día, a pesar de esto Taiwán posee el SPFP más grande del mundo con una producción total diaria de 60,000 plantas (Kozai *et al.*, 2015).

En México no existen registros de producción bajo este tipo de sistemas a nivel comercial; sin embargo, se han realizado las primeras investigaciones para el desarrollo del sistema enfocado a la producción de plántulas (Hernández-Cuevas *et al.*, 2017).

2.2. Sistema de Producción Fábrica de Plantas

A partir de la década de los 90's se presenta una tendencia a la obtención de altas producciones fuera de temporada, anticipadas e inocuas. Esta tendencia ha creado la necesidad de usar diversos elementos, herramientas, materiales y estructuras de protección para los cultivos con el objetivo de modificar las condiciones ambientales de forma que favorezca el crecimiento de las plantas (Juárez *et al.*, 2011).

El SPFP es el modelo de la horticultura protegida, cuyo objetivo es optimizar la producción de algunas especies vegetales a partir del conocimiento y control total de sus requerimientos climáticos, hídricos y nutrimentales (Ohyama *et al.*, 2000; Yokoi *et al.*, 2005; Kozai *et al.*, 2015).

El sistema está conformado por 6 elementos principales: 1) estructura hermética y térmicamente aislada, 2) sistema de varios niveles o pisos con dispositivos de iluminación, 3) sistema electrónico de control de temperatura y humedad relativa, 4) unidad de inyección de CO₂ ambiental, 5) sistema hidropónico y 6) unidad de control automático del sistema (Kozai *et al.*, 2006; Kozai, 2007). Las ventajas que este sistema presenta son: 1) disminución del ciclo de producción de hasta un 50 % con crecimiento uniforme y productos de alta calidad en cultivo de lechuga, 2) planeación de producción continua y 3) menor uso de recursos en comparación con los sistemas convencionales, como por ejemplo la eliminación del uso de plaguicidas, eficiencia en el uso del agua de hasta un 95 a 98 % en lechuga (debido a la alta hermeticidad del SPFP que permite contener el agua transpirada por las plantas y mediante el sistema de enfriamiento condensarla, recolectarla y reincorporarla al sistema de riego) y menor utilización de mano de obra (Ohyama *et al.*, 2000; Yoshinaga *et al.*, 2000; Yokio *et al.*, 2003; Kozai, 2013; Hu *et al.*, 2014).

2.2.1 Principales Elementos a Considerar en un Sistema de Producción Fábrica de Plantas

2.2.1.1. Sistema de iluminación

En la actualidad el requerimiento de energía eléctrica para la producción de 1 kg de lechuga fresca en un SPFP asciende a los 10 kWh (36 MJ), consumo que representa el 25-30 % del costo total de producción, del cual el 70-80 % es debido a la iluminación artificial. Este consumo de energía en la actualidad es alto debido a la baja eficiencia de los sistemas empleados para su producción (pérdidas elevadas de energía). Kozai *et al.* (2015) mencionan que los valores de consumo de energía se puede reducir a menos de 5 kWh·kg⁻¹ mediante el uso de dispositivos de iluminación de mayor eficiencia y la capacidad de emitir luz con longitudes de onda afines al rango de absorción de los pigmentos fotosintéticos; y mediante el uso de elementos o sistemas que eviten la pérdida de luz mejorando la distribución de esta en el dosel de la hoja, para generar una mayor absorción en la planta haciendo más eficiente el uso de la energía.

Durante los últimos años se han empleado diversas formas y fuentes de estimulación electromagnética apropiada para el óptimo desarrollo del proceso de fotosíntesis de las plantas de manera natural y artificial (Gonzalías y Lasso, 2016). Para el caso de sistemas de producción en ambientes controlados las principales fuentes de iluminación artificial empleadas son (Cuadro 2): lámparas fluorescentes, lámparas de sodio a alta presión (HPS) y a partir de 2010, la incorporación de los diodos emisores de luz (LED) debido a que estos son elementos de mayor eficiencia que pueden ser ubicados muy cerca de las plantas y configurados para emitir un alto flujo de luz específica con un menor consumo energético (Gonzalías y Lasso, 2016).

Cuadro 2. Comparación de parámetros de dispositivos de iluminación artificial: diodo emisor de luz (LED), lámpara de sodio a alta presión (HPS), lámpara incandescente y fluorescente.

	LED	HPS	Incandescente	Fluorescente
Eficiencia de luz (lumenes·Watts ⁻¹)	80	100	20	80
Característica de fuente de iluminación	Iluminación de estado sólido	Iluminación de descarga de gas	Iluminación de estado sólido	Iluminación de descarga de gas
Vida útil (horas)	50 000	8000	3000	10 000
Favorable al medio ambiente	No contamina	Contaminación por mercurio y plomo	No contamina	Contaminación por mercurio
Consumo de energía del transformador (pérdida)	15 W	50 W	0 W	45 W

La aplicación de iluminación LED en el crecimiento de las plantas fue documentado por primera vez en cultivo de *Lactuca sativa* L. cv. Grand Rapids (Bula *et al.*, 1991), estudio en el que el crecimiento y desarrollo del cultivo bajo iluminación LED monocromático rojo (660 nm), suplementado con lámparas fluorescentes azules (400-500 nm) fue comparable contra luces fluorescentes e incandescentes de color blanco frío. A partir de esto el interés de la aplicación de iluminación LED en horticultura se incrementó (Morrow, 2008) siendo evaluadas en otras especies vegetales como espinacas (*Spinacia oleracea*), repollo (*Brassica oleracea*), pepino (*Cucumis sativus*), plantas medicinales entre otras. (Yorio *et al.*, 2001; Li *et al.*, 2012; Hernández y Kubota 2016; Wang *et al.*, 2016).

Las innovaciones en iluminación artificial a base de diodos emisores de luz para la producción hortícola en este tipo de sistemas se centran en el desarrollo de dispositivos de alta calidad, capaces de emitir longitudes de onda similares a los absorbidos por los pigmentos fotosintéticos (455 nm y 660 nm), así como una mayor eficiencia en los procesos en la conversión de energía eléctrica a energía lumínica, principalmente en los diodos emisores de luz roja (660 nm), debido a que estos presentan una menor eficiencia en comparación a los diodos emisores de luz azul.

2.2.1.2 Tipo de sistema hidropónico

2.2.1.2.1 Sistema de raíz flotante. El sistema de raíz flotante fue uno de los primeros sistemas hidropónicos empleados tanto a nivel experimental como a nivel comercial optimizando el área de producción (Chang *et al.*, 2000). Es un sistema en el cual las raíces de las plantas están sumergidas parcial o totalmente en solución nutritiva (SN), empleando generalmente placas perforadas de poliestireno expandido, de alta y

mediana densidad que hacen la función de soporte mecánico de un determinado número de plantas (Cruz, 2016). En este tipo de sistema es muy importante mantener un control del contenido de oxígeno disuelto en la SN. También, es importante mencionar que el sistema de raíz flotante no es un mecanismo complejo, por lo tanto, es fácil de manejar y es muy sencillo producir a través de él; inclusive no requiere de una gran inversión y los resultados se ven reflejados de manera permanente con el paso del tiempo; al igual que otras técnicas hidropónicas también es posible obtener grandes producciones. Esta técnica se puede adaptar a cualquier espacio; además permite la utilización de diferentes materiales, por esta razón no perjudica al medio ambiente.

Los cultivos que mejor se adaptan a este sistema son aquellos de porte bajo destacando el cultivo de lechuga, espinaca y algunas plantas aromáticas (Tigrero, 2018).

2.2.1.2.2. Sistema NFT. El sistema de producción NFT por sus siglas en inglés (Nutrient Film Technique) fue desarrollada en Inglaterra por Allen Cooper en el año de 1965 y consiste en mantener un tirante de SN en la zona radicular de las plantas para proveerles agua y nutrientes. Es considerado como uno de los sistemas más viables para el crecimiento de cultivos, principalmente hortalizas de hoja (Cometti, 2003), destacando el cultivo de lechuga, debido a que este sistema proporciona un método efectivo en el control de agua, nutrición y principalmente por permitir un régimen de circulación intermitente si se mantiene una pendiente cero que ayuda a obtener reducciones del consumo de energía eléctrica (Carrasco *et al.*, 1999); un aspecto importante a considerar bajo el SPFP.

El sistema NFT no utiliza ningún tipo de sustrato y es clasificado como un sistema cerrado, debido a que la SN que circula a través de las tuberías o canales de crecimiento es recirculada (Rodríguez, 2002). De acuerdo con Urrestarazu (2004) el sistema NFT comprende los siguientes elementos: 1) canales de cultivo, 2) red de distribución de SN, 3) bomba hidráulica, 4) sistema de tubería de recolección y 5) un depósito para la SN.

Entre los aspectos más importantes a considerar en el diseño de un sistema hidropónico NFT destacan la longitud del canal, velocidad de flujo, oxigenación, temperatura, tirante de lámina de la SN y la densidad de población del cultivo.

2.2.2. Variables de Control en un Sistema de Producción Fábrica de Plantas

2.2.2.1. Variables ambientales

2.2.2.1.1. Temperatura. El sistema de producción agrícola cerrado ofrece la posibilidad de controlar la temperatura ambiental y de la SN. La primera mediante un sistema de aire acondicionado y la segunda mediante sensores de temperatura, resistencias tubulares (calentador) y disipadores de calor (enfriador) regulados por un sistema electrónico de control.

Entre las condiciones climáticas, la temperatura ambiental tiene un efecto importante en el crecimiento, desarrollo y calidad de los cultivos (Choi *et al.*, 2000; Savvas, 2002; Lee *et al.*, 2013; Moon *et al.*, 2014), esto por tener implicaciones directas en los procesos de fotosíntesis y respiración, permeabilidad de la membrana celular, absorción de agua y nutrientes, transpiración y actividades enzimáticas (Baudoin *et al.*, 2002). Choi *et al.* (2000) reportan que hasta los 25 días después de trasplante, la temperatura óptima para el crecimiento de lechuga bajo SPFP es de 22 a 26 °C y posteriormente de 20 a 24 °C hasta la cosecha y una temperatura óptima nocturna de

15 a 20 °C durante todo el ciclo de cultivo. La tasa respiratoria de plantas que crecen bajo una concentración alta de CO₂ ambiental (700 ppm) tienen una tasa respiratoria (expresada como peso seco) entre un 15 y 20 % mayor en comparación con otras que han crecido a 350 ppm de CO₂ (Drake *et al.*, 1999), por lo que disminuir temperatura durante la noche puede disminuir los efectos de la alta tasa de respiración.

2.2.2.1.2. Humedad relativa. La humedad relativa (HR) entre 55 a 90 % (1.0 a 0.2 kPa de déficit de presión de vapor a una temperatura de 20 °C) tiene poco efecto sobre la fisiología y el crecimiento de los cultivos hortícolas. La HR baja (<75 %) produce una reducción en el crecimiento debido a una alta tasa de transpiración, mientras que la HR alta (>80 %) fomenta la presencia de enfermedades causando trastornos en el crecimiento y desarrollo.

Para el caso de lechuga los requerimientos de HR en campo abierto se encuentran entre el 30-70 % (Alvarado *et al.*, 2001), mientras que en el SPFP los valores establecidos en los trabajos de investigación se encuentran en el rango de 60-80 % (1.19-0.59 kPa de déficit de presión de vapor a 24 °C) (Choi *et al.*, 2000; Park *et al.*, 2012; Kang *et al.*, 2013) teniendo efectos positivos en el potencial hídrico (no hay un estrés por demanda evapotranspirativa del ambiente) y en el control del desorden fisiológico de las puntas quemadas en hojas.

2.2.2.1.3. Concentración de CO₂. La concentración de CO₂ en el aire es uno de los factores ambientales de mayor estudio debido al aumento en su concentración y posible impacto en los ecosistemas agrícolas (Ainsworth *et al.*, 2007). Una concentración elevada de CO₂ en el aire puede causar dos efectos fisiológicos en las plantas: 1) aumento de la tasa fotosintética a causa del incremento de la concentración de CO₂ en el mesófilo (Lee *et al.*, 1999; Kang *et al.*, 2013) y 2) cierre estomático, lo

que reduce la pérdida de agua por transpiración. En condiciones de alta concentración de CO₂ ambiental (1,000 a 2,000 ppm), se pueden presentar, a largo plazo, efectos en la composición fitoquímica de las plantas (Poorter *et al.*, 2003), como incrementos del contenido de compuestos antioxidantes (Park *et al.*, 2012; Samuoliené *et al.*, 2012) y carbohidratos (Wang, 2006; Sirtautas *et al.*, 2012); mejorando las propiedades nutritivas del cultivo para consumo humano.

Investigaciones sobre los efectos de la concentración de CO₂ en el aire en diferentes cultivos reportan incrementos en tasa fotosintética y de crecimiento en combinación con iluminación artificial bajo concentraciones de hasta 2,000 ppm CO₂; permitiendo una mayor producción de biomasa seca en menor tiempo, lo que permite acortar el ciclo de producción (Yoshinaga *et al.*, 2000; Park *et al.*, 2012; Kozai *et al.*, 2015).

2.2.2.1.4. Luz. Las longitudes de onda del espectro electromagnético visible no son de total utilidad para las plantas, en general, los fotoreceptores absorben más la luz violeta (390-450 nm), azul (450-490 nm), naranja (590-620 nm) y rojo (620-750 nm). Por lo que la calidad de luz (Zhang y Folta, 2012), la intensidad luminosa (flujo de fotones por unidad de área a través del tiempo) y el fotoperiodo (horas luz/oscuridad) son elementos clave de la condición de luz.

En el aspecto de iluminación artificial las lámparas a base del LED son la tecnología más recientemente empleada en la agricultura en ambiente controlado, debido a su alta eficiencia lumínica; permitiendo disminuir los costos generados por el consumo de energía eléctrica (Bourget, 2008). Esta tecnología tiene la ventaja de emitir longitudes de onda monocromáticas (longitudes de onda específicas); ofreciendo a las plantas una fuente de luz ajustada a sus necesidades; aumentando la eficiencia de todo el

proceso productivo (Fan y Jao, 2000); cabe señalar que cada especie vegetal presentan requerimientos de luz específicos.

2.2.2.1.4.1. Calidad. La calidad de la luz se entiende como las longitudes de onda que incide sobre el cultivo para poder llevar a cabo la fotosíntesis. La luz roja y azul presentan mayor eficiencia en los procesos fotosintéticos en todas las especies vegetales (Lefsrud *et al.*, 2008; Mizuno *et al.*, 2011; Žukauskas *et al.*, 2011; Samuolienė *et al.*, 2012; Tarakanov *et al.*, 2012). Además de esto, ciertas longitudes de onda pueden generar incrementos en las concentraciones de compuestos antioxidantes como vitamina C, carotenoides, antocianinas, flavonoides, etc. (Lefsrud *et al.*, 2008; Li y Kubota, 2009; Stutte *et al.*, 2009; Žukauskas *et al.*, 2011; Li *et al.*, 2012).

2.2.2.1.4.2. Intensidad. La intensidad de luz representa la cantidad o flujo de fotones que caen en una unidad de área en un segundo y su unidad de medida es $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. La intensidad de luz tiene efectos importantes en el crecimiento de los cultivos como el aumento y velocidad en la acumulación de biomasa (Hunter y Burritt, 2004; Li y Kubota, 2009; Stutte *et al.*, 2009; Johkan *et al.*, 2010), mayor precocidad y menor acumulación de nitratos en hojas en el cultivo de lechuga (Samuolienė *et al.*, 2009; Li y Kubota, 2009).

2.2.2.1.4.3. Fotoperiodo. El fotoperiodo es el tiempo (expresado en horas) de exposición a iluminación natural o artificial diaria a la cual un cultivo crece. El SPFP permite manipular esta variable de condición de luz principalmente para proporcionar los requerimientos óptimos de luz integral diaria (LID) a la especie vegetal cultivada (Cuadro 3) y de esta manera dar un manejo agronómico al cultivo para obtener una producción en menor tiempo y de mejor calidad (alto contenido de antioxidantes, bajo

contenido de nitratos en hojas, libre de enfermedades, mayor peso fresco y seco, uniformidad, etc.); integrando los aspectos de calidad e intensidad. El cultivo de lechuga requiere un acumulado de fotones diarios entre 12 a 17 mol·m⁻²·día⁻¹, lo que representa un fotoperiodo de 12 horas luz y 12 horas oscuridad a una intensidad de luz de 300 μmol·m⁻²·s⁻¹ (Albright *et al.*, 2000) (EC. 1).

$$\text{LID} = (i)(0.0036) (f)$$

EC 1

Dónde:

LID es luz integral diaria en mol·m⁻²·día⁻¹,

i es intensidad de luz en μmol·m⁻²·s⁻¹ y

f es horas luz en h.

Cuadro 3. Requerimientos de intensidad de luz, fotoperiodo y luz integral diaria, para la producción de cultivos en un SPFP.

Cultivo	Fin	Intensidad de luz ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	Fotoperiodo (h·día⁻¹)	LID ($\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$)
Arroz	Producción comercial	1000-1200	12	43.2-51.84
Tomate	Producción comercial	520.83-607	16	30-35
Fresa	Producción comercial	225-337.5	24-16	19.4
Plántulas	Producción comercial	200-300	18-12	13
Espinaca	Producción Comercial	200-300	16.6-11.1	12-13
Lechuga	Producción comercial	200-300	16.6-15.74	12-17
Menta japonesa	Producción de metabolitos secundarios	200	12	8.64

2.2.2.2. Variables de solución nutritiva

Rodríguez *et al.* (2016) define a la solución nutritiva (SN) como la mezcla de fertilizantes químicos, que contienen todos los nutrimentos esenciales para las plantas (N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, B, Cu, Zn, Cl y Mo) y que al ser disueltas en agua (forma iónica) proporcionan una nutrición completa para las plantas. Los aspectos de la solución nutritiva de mayor influencia en la producción son: la relación mutua entre los cationes y aniones, la concentración de los nutrientes, el pH, la conductividad eléctrica (CE) y la temperatura (Sonneveld y Straver, 1999).

2.2.2.2.1. Concentración de nutrimentos: principio de balance de masa. Una manera para la determinación de los requerimientos nutrimentales para cada especie vegetal es la basada en el concepto de balance de masa, que se fundamenta en que la composición de la materia seca de una planta está formada por los 16 elementos químicos esenciales (C, H, O, N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, B, Cu, Zn, Mo y Cl) de los cuales tres son aportados por el aire y agua (C, H y O) y 13 deben ser incorporados a la solución nutritiva para ser absorbidos por medio de las raíces de las plantas (Etchevers-Barra, 2000).

Mediante el conocimiento de la cantidad de materia seca producida y concentración de cada uno de los elementos en cada una de sus etapas fenológicas del cultivo, se puede estimar la cantidad total de cada nutrimento que la planta absorbió y que es necesario aplicar en la SN durante ese periodo de crecimiento, es decir, la aplicación de fertilizantes debe ser en todo el ciclo de producción y proporcional al crecimiento del cultivo (Alpízar-Vargas *et al.*, 2006). Considerando la eficiencia de absorción de los

nutrimentos como la fuente de estos (fertilizante), se puede establecer un plan de fertilización para cada etapa del cultivo.

2.2.2.2.2. Temperatura de la SN. La temperatura afecta principalmente al contenido de oxígeno disuelto en la SN (Steiner, 1968; Vestergaard, 1984), a medida que la temperatura aumenta se presentan efectos negativos como la inhibición de la división celular y la reducción de la elongación de la raíz provocando la disminución de la tasa de absorción de iones Ca^{2+} , elemento esencial que en concentraciones bajas en planta provoca el desorden fisiológico llamado puntas quemadas de la hoja en lechuga (Collier *et al.*, 1984). La tasa de absorción de nitrógeno en forma de NO_3^- es menos afectada bajo condiciones de alta temperatura de la solución nutritiva en comparación con otros elementos, debido a que la planta obtiene oxígeno a partir de la reducción de NO_3^- a NO_2^- , generando mayores concentraciones de este elemento en las hojas de lechugas, factor relevante en cuanto a la calidad del producto final (Morard *et al.*, 2000) y no deseable para el consumo humano. Por todo esto se recomienda que la temperatura de la solución nutritiva no supere los 20 °C (Magalhães, 2006).

2.2.2.2.3. Conductividad eléctrica. La conductividad eléctrica (CE) es la forma más utilizada para expresar el contenido total de sales en el agua y su unidad de medición es el decisiemens por metro ($\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$) referenciada a una temperatura de 25 °C, debido a que la actividad de los iones depende de esta.

La respuesta de la planta a la alta CE, es dependiente de la edad, condiciones ambientales, manejo del cultivo y características de la especie vegetal, dañando directamente a las plantas desde las primeras etapas del desarrollo hasta la culminación de su ciclo biológico, afectando la producción e incluso provocando la muerte en las especies más susceptibles. Algunos de los efectos más comunes y

perjudiciales provocados por la salinidad son: 1) toxicidad específica (normalmente asociada a la absorción excesiva de Na^+ y de Cl^-), 2) desequilibrio nutricional debido a la interferencia de los iones salinos con los nutrientes esenciales y 3) efecto osmótico (Prieto, 2008).

Según Rhoades *et al.* (1992) una CE igual $2.1 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ genera una disminución de la producción del 10 % en el cultivo de lechuga y de un 50 % cuando esta presenta un valor de $5.1 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$.

2.2.2.2.4. pH. El pH de la SN se determina por la concentración de H^+ y es importante ya que controla la disponibilidad de los nutrimentos, Rodríguez *et al.* (2016) recomienda que el pH de la SN se ajuste a un valor de 5 a 5.5 para evitar que la solubilidad de Fe^{2+} y Mn^{2+} no disminuya y esté disponible para las plantas, debido a que valores de pH mayores de 6 estos nutrimentos y otros como el Ca^{2+} y P pueden precipitar. El pH de la SN debe ser monitoreado frecuentemente ya que no es estático, debido a que depende de la concentración de CO_2 ambiental, del ritmo de absorción nutrimental, de la fuente de nitrógeno utilizada, entre otras variables (Favela *et al.*, 2006).

Alvarado *et al.* (2001) señala que la lechuga es una hortaliza clasificada como ligeramente tolerante a la acidez, reportando un pH óptimo de crecimiento igual a 5.8. Bajo el SPFP el valor de pH recomendado para producción de lechuga baby se encuentra en el rango de 5.5 a 6 (Shimizu *et al.*, 2011; Kang *et al.*, 2013; Kobayashi, *et al.*, 2013; Kozai *et al.*, 2015).

2.2.2.2.5. Oxígeno disuelto. El agua, además de disolver las sales minerales, también lo hace con el oxígeno. La temperatura de la SN tiene relación directa con la cantidad de oxígeno que consumen las plantas e inversa con el oxígeno disuelto en ella. Una

SN con temperatura de 10 °C mantiene una concentración de Oxígeno de 10.93 ppm y de 6 ppm a 45 °C (Steiner, 1968; Vestergaard, 1984). Favela *et al.* (2006) reportan que una temperatura menor a los 22 °C el contenido de oxígeno disuelto es suficiente para abastecer la demanda de este nutrimento; pero se debe considerar factores como la densidad de población, el estado de crecimiento, la tasa fotosintética y respiratoria que influyen directamente en los requerimientos totales de oxígeno del cultivo (Papadopoulous *et al.*, 1999). Alvarado *et al.* (2001) reportan que el requerimiento mínimo de oxígeno disuelto en la SN para la producción de lechuga es de 4 ppm.

3. HIPÓTESIS

Un cultivo a alta densidad de población bajo el Sistema de Producción Fábrica de Plantas no presenta competencia por agua y nutrientes debido a que crece en un sistema hidropónico, por lo tanto, la producción de biomasa y absorción de minerales estará en función de la condición de luz.

El estrés foto-oxidativo se genera a partir de una sobreexcitación de la molécula de clorofila al absorber la energía de un fotón; generando un incremento de especies reactivas de oxígeno (EROs), por lo tanto, la concentración total de algunos compuestos antioxidantes en hojas de lechuga romana tipo baby cultivada en un Sistema de Producción Fábrica de Plantas se incrementará bajo una mayor intensidad de luz roja, azul y blanca.

3.1. Objetivo General

Establecer un Sistema de Producción Fábrica de Plantas y evaluar la influencia de la calidad-intensidad de luz en el crecimiento y propiedades antioxidantes en el cultivo de lechuga romana tipo baby.

3.1.1. Objetivos Específicos

1. Diseñar y construir un sistema hidropónico tipo torre con sistema de iluminación LED para la producción intensiva de lechuga romana tipo baby.

2. Evaluar el efecto de la intensidad-calidad de luz en la producción de biomasa y absorción nutrimental en cultivo de lechuga romana tipo baby bajo el Sistema de Producción Fábrica de Plantas.
3. Estimar el efecto de la intensidad y calidad de luz en la concentración de algunos compuestos antioxidantes en lechuga romana tipo baby cultivada en un Sistema de Producción Fábrica de Plantas.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Material Biológico y Nutrición del Cultivo

Se emplearon semillas certificadas de *Lactuca sativa* L. var. *Longifolia* Lam cv. Parris Island (lechuga romana) de la casa comercial Semillas las Huertas las cuales fueron sembradas en charolas de poliestireno expandido con 200 cavidades, usando roca volcánica de 2 mm de diámetro como sustrato.

La SN empleada para la nutrición del cultivo (Cuadro 4) fue la propuesta por Rodríguez *et al.* (2011), empleando fertilizantes comerciales y considerando la calidad de agua empleada para su elaboración. Las características finales fueron: pH (5.5), conductividad eléctrica ($2.1 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$) y temperatura ($24.7 \text{ }^\circ\text{C}$).

En la SN no fue necesaria la adición del nutrimento Cl debido a que el análisis de calidad de agua evidencio su presencia en concentración suficiente.

Cuadro 4. Solución nutritiva estándar y fuentes de nutrimentos comerciales empleados para la nutrición del cultivo de *Lactuca sativa* L. var. *Longifolia* Lam cv. Parris Island bajo el SPFP.

Elemento	Concentración (mg L ⁻¹)	Fuente
N	200	-----
P	60	NH ₄ H ₂ PO ₄
K	250	KNO ₃
Ca	200	Ca(NO ₃) ₂ .4H ₂ O
Mg	50	Mg(NO ₃) ₂
S	100	H ₂ SO ₄
Fe	0.5	FeSO ₄ .7H ₂ O
Mn	0.25	MnSO ₄ .H ₂ O
B	0.25	H ₃ BO ₃
Cu	0.03	CuSO ₄ .5H ₂ O
Zn	0.25	ZnSO ₄ .H ₂ O
Mo	0.01	Na ₂ MoO ₄ .2H ₂ O

4.2. Tratamientos

Se evaluaron tres tratamientos de intensidad de luz: $t_1=121.41$ $t_2=140.31$ y $t_3=224.47$ $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ respectivamente bajo un diseño completamente al azar con 5 repeticiones por tratamiento y una unidad experimental de 10 plantas a una densidad de 67 plantas $\cdot\text{m}^{-2}$. Como fuente de iluminación artificial (Apéndice A6) se emplearon lámparas LED tubulares T8 color rojo, azul (modelo 21019, DUBAI) y blanco frío (modelo ML-TU-CR1 de DLM S de R. L. de C. V., México). Las características de calidad de luz de cada tratamiento se presentan en el Cuadro 5, las cuales fueron obtenidas mediante un espectroradiómetro (Apogge modelo PS-300 de Apogge Instruments, Inc., EUA).

Cuadro 5. Composición de radiación electromagnética emitida por las fuentes de iluminación artificial para la producción de *Lactuca sativa* L. var. *Longifolia* Lam cv. Parris Island bajo el SPFP.

Color	Longitud de onda	Intensidad de luz ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)		
		t ₁	t ₂	t ₃
Violeta	380-450	32.07	28.36	48.51
Azul	450-495	18.07	23.99	28.91
Verde	495-570	0.00	0.00	29.82
Amarillo	570-590	0.00	0.00	10.07
Naranja	590-620	2.29	3.57	15.74
Rojo	620-750	68.98	84.38	91.42
Proporción Rojo:Azul		3.81:1	3.51:1	3.16:1
Total		121.41	140.31	224.47

Para el desarrollo de esta investigación se establecieron 3 etapas. La primera de ellas consistió en el establecimiento del SPFP; etapa en la que se desarrollo e implemento un sistema de monitoreo de variables climáticas y un sistema de control automático de encendido/apagado de lamparas LED y de bomba hidráulica, asi como el diseño y la construcción de un sistema hidropónico NFT tipo torre con una capacidad de producción de 201 plantas·m³.

La segunda etapa consistió en la evaluación del cultivo bajo tres tratamientos de luz para estimar la producción de peso fresco y seco para obtener la curva de crecimiento, así como la absorción nutrimental total por planta mediante un balance de masas.

La tercera etapa consistió en la evaluación de la concentración de algunos compuestos antioxidantes; asi como la capacidad antioxidante en hojas de lechuga romana tipo baby producidas bajo tres tratamientos de luz en el SPFP.

4.3. Etapa 1: Establecimiento del Sistema de Producción Fábrica de Plantas

Se realizó actividades de diseño, construcción y programación para la implementación del SPFP en el Laboratorio de Sistema de Producción en Ambiente Controlado ubicado en el Campus de Ciencias Agropecuarias dentro de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

Para la implementación del SPFP se realizaron las siguientes actividades:

1. Programación e instrumentación de un sistema para monitoreo de variables climáticas y control automático de encendido/apagado de las fuentes de iluminación artificial (lámparas LED) y la bomba hidráulica para el suministro de la solución nutritiva.
2. Diseño y construcción de un sistema hidropónico NFT tipo torre con una capacidad máxima de producción de 201 plantas·m³.

3. Diseño y construcción de un sistema de iluminación LED considerando aspectos de calidad e intensidad de luz requeridos por el cultivo de lechuga romana tipo baby.

4.3.1. Sistema de Monitoreo de Variables Climáticas y Control Automático de Encendido/Apagado de Lámparas y Bomba Hidráulica

Para la programación del monitoreo de variables climáticas y control automático de encendido/apagado del sistema de iluminación y de bomba hidráulica se siguió el esquema de funcionamiento descrito en la Figura 1, la cual consistió en dos programaciones independientes (Apéndice A1 y A2), la primera de ellas se encargó del registro de las lecturas de temperatura del aire, humedad relativa, intensidad de luz y concentración de CO₂ en el aire a través de sensores con una frecuencia de lectura y almacenamiento de 30 minutos mediante el software de adquisición de datos DAQ-PLX (Parallax Inc. EUA) y Microsoft Excel (Microsoft, EUA). La segunda programación se encargó de controlar el encendido/apagado del sistema de iluminación y de bomba hidráulica.

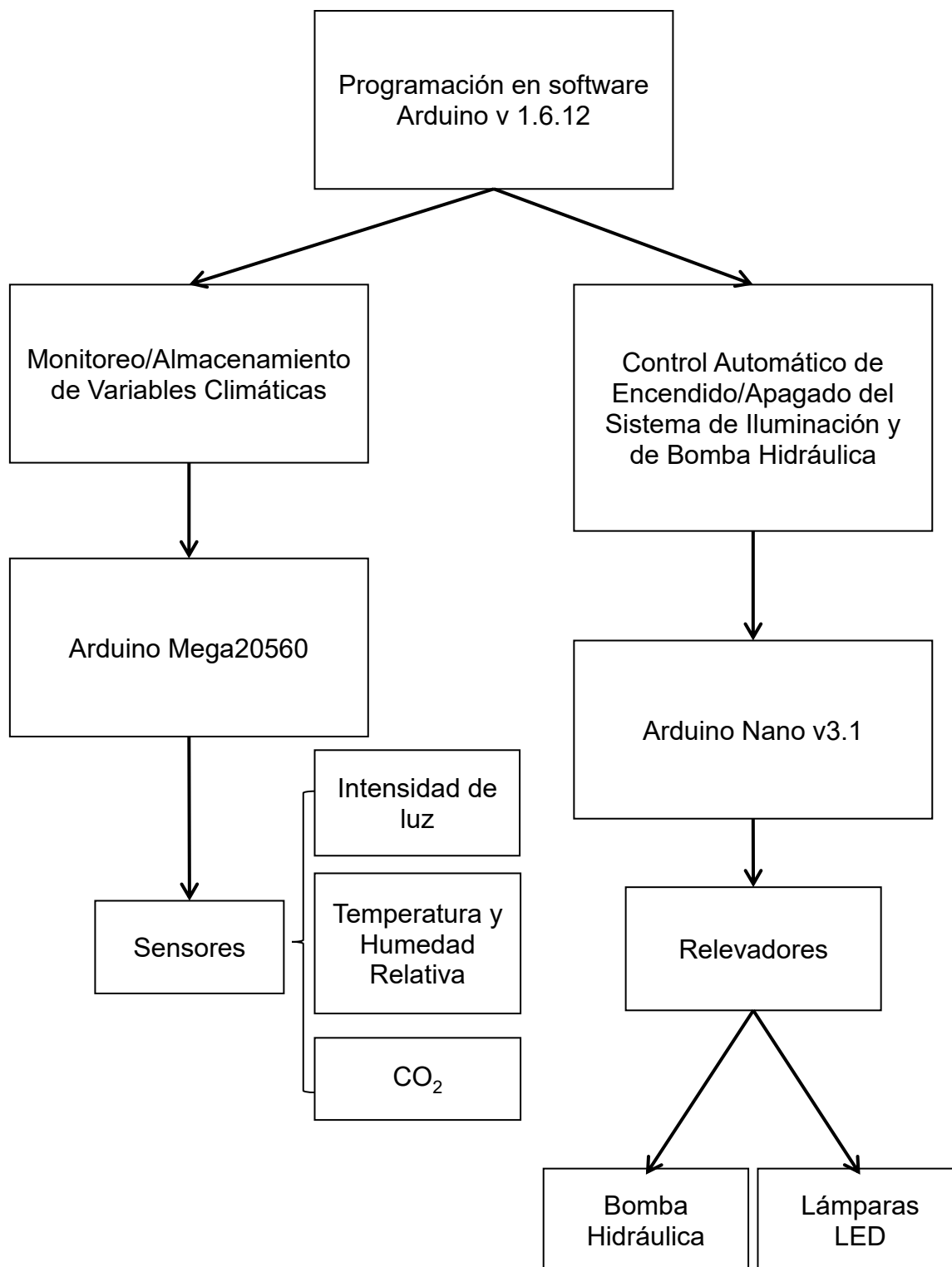


Figura 1. Esquema utilizado para la programación del sistema de monitoreo de variables climáticas y control automático de encendido/apagado del sistema de iluminación y bomba hidráulica.

Para el sistema de monitoreo/almacenamiento de variables climáticas (Apéndice A3) se utilizó una plataforma de hardware de código abierto (Arduino Mega20560, Arduino Srl., Italia) en la que se conectaron los siguientes sensores: sensor de temperatura y humedad relativa (Grove Temperature & Humidity Sensor modelo v1.0, Seeed Technology Co., Ltd., China), sensor de intensidad de luz (Grove Light Sensor modelo v1.1, Seeed Technology Co., Ltd, China) y sensor de CO₂ (CO₂ Sensor modelo +MG811, Sandbox Electronics, EUA).

Para el control automático de encendido/apagado del sistema de iluminación y de bomba hidráulica, se utilizó una plataforma de hardware de código abierto (Arduino nano v3.1, Arduino Srl., Italia) y 2 módulos de relevadores como actuadores (Apéndice A4). Esta programación contempló el control automático de encendido/apagado de 2 bomba hidráulicas con una potencia de 1/2 HP y un sistema de iluminación conformado por un conjunto de lámparas T8 a base de diodos emisores de luz color roja, azul y blanco frio (Apéndice A4).

Ambas programaciones fueron realizadas utilizando el software Arduino v 1.6.12 (ARDUINO, 2016).

4.3.1.1. Principio de funcionamiento del sistema de monitoreo y control

El principio de funcionamiento del sistema de encendido/apagado y monitoreo de variables climáticas programada se presentan en la Figura 2b. El control de encendido/apagado de bomba (diagrama no mostrado) es similar al del funcionamiento del control de lámparas descritas en la Figura 2a.

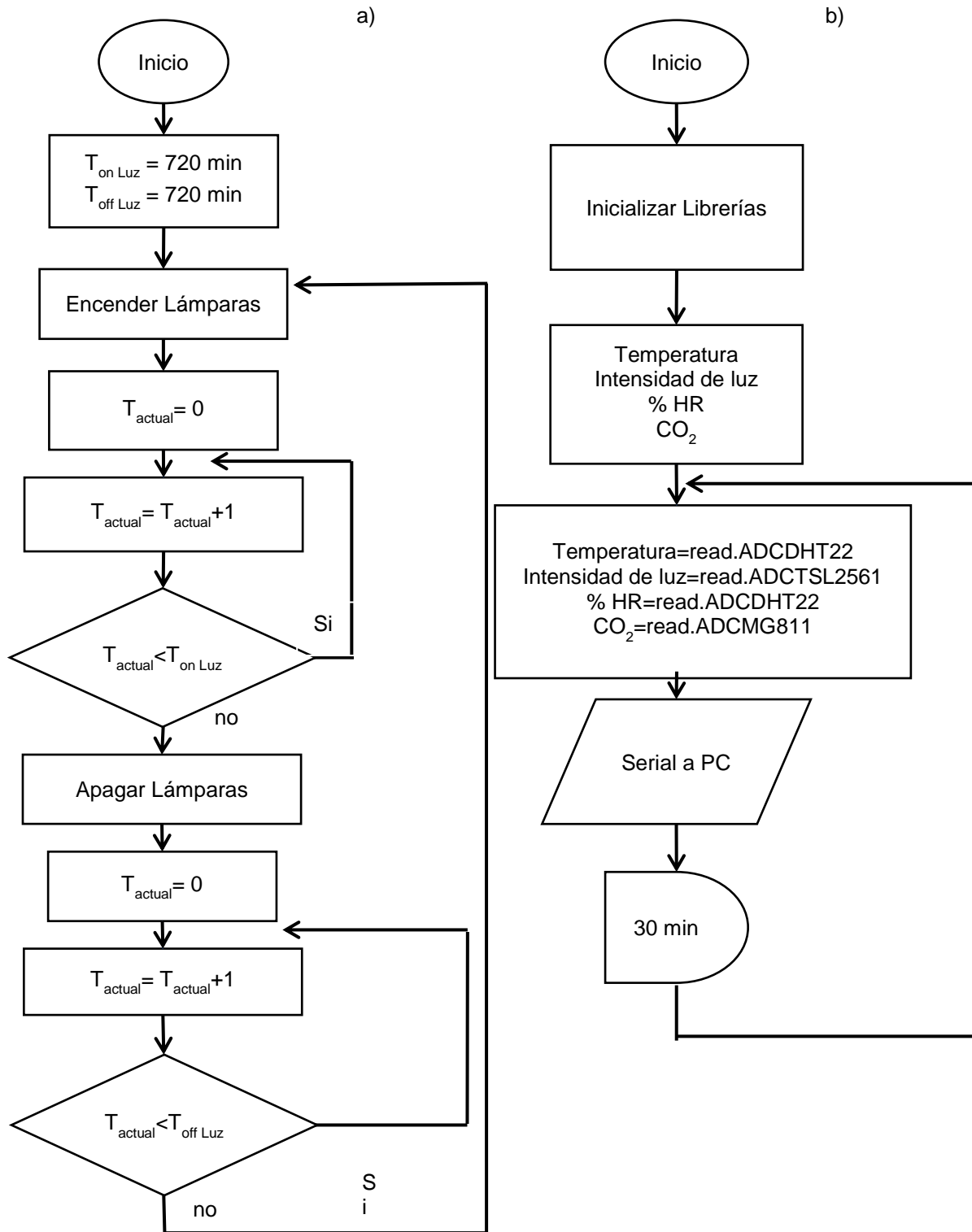


Figura 2. Diagramas de flujo de funcionamiento del: a) Sistema de encendido/apagado de lámparas y b) Sistema de monitoreo y almacenamiento de variables climáticas.

4.3.1.2. Calibración

Para la calibración del sistema se realizó una prueba de funcionamiento del sistema de monitoreo/almacenamiento de variables climáticas y encendido/apagado del sistema de iluminación y bomba hidráulica, programando una frecuencia de registro de 30 minutos durante 24 días (1152 datos de cada variable climática), y un tiempo de encendido/apagado de 2 min/60 min. Las primeras horas de la prueba se cronometró el tiempo con ayuda de un reloj digital para corroborar si efectivamente los tiempos de encendido/apagado programados eran iguales a los observados.

Los sensores de temperatura, concentración de CO₂, intensidad de luz y humedad fueron calibrados utilizando un sensor Carbon Dioxide and Temperature Monitor (Telaire®, EUA), HOBO Temperature/Relative Humidity/Light/External Data Logger (HOBO®, EUA) y un sensor de temperatura y humedad relativa modelo HMP60 (Vaisala, Finlandia).

4.3.2. Diseño y Construcción de Sistema Hidropónico

El sistema hidropónico NFT tipo torre (Figura 3 y 4) se diseñó utilizando el software Autocad 2016 de Autodesk, Inc. EUA (AUTODESK, 2016), considerando un área de producción de 1 m². El diseño del sistema cuenta con un total de 6 niveles con separación de 0.33 m y superficie de 1 m² y un volumen total de producción de 2 m³. Cada nivel está conformado por un sistema de 7 tubos de policloruro de vinilo (PVC) de 110 mm de diámetro color blanco (esto con la finalidad de obtener una reflexión difusa y de esta manera proporcionar mejores condiciones de luz para las plantas) con longitud de 1.15 m y separación de centro a centro de 0.138 m, conectados por medio de inserciones con gomas, codos, tee's y manguera de polietileno color negro de 0.008 m de diámetro. De los 7 tubos de PVC, a 4 de ellos se le realizó 10 perforaciones y a

los 3 restantes 9 perforaciones usando un sacabocados de 0.05 m de diámetro, para obtener una densidad de población de 67 plantas por m² (Figura 3 y Apéndice A5).

Para darle soporte al sistema se utilizaron 4 barras de estantería con una longitud de 3.1 m a las que se le colocaron 7 entrepaños (niveles) con medidas de 0.995 X 0.995 X 0.03 m y distancia de separación entre estos de 0.33 m; a cada entrepaño se le instaló el sistema de tuberías agrupados en dos secciones (3 niveles por cada sección) unidas mediante codos, tee's y manguera de polietileno color negro de 0.008 m de diámetro como se muestra en la Figura 4.

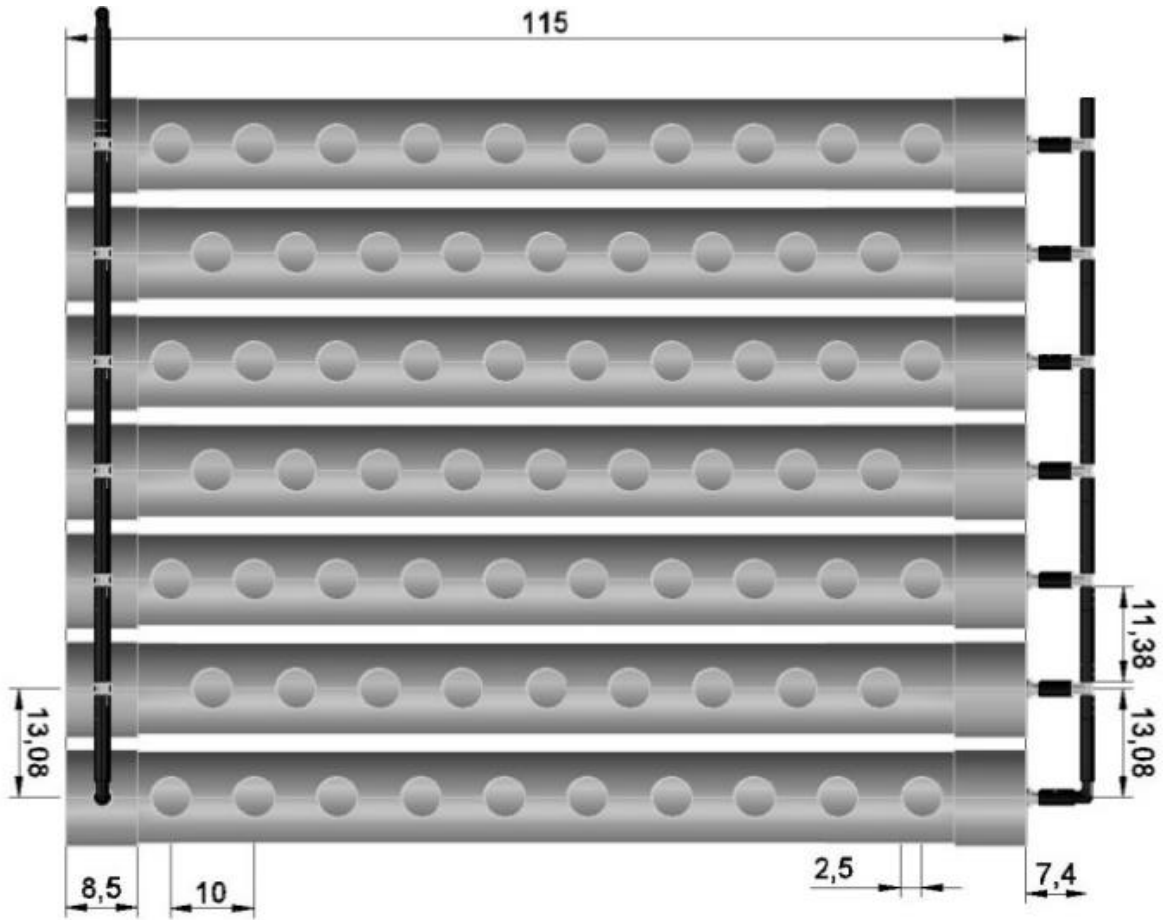


Figura 3. Conformación de cada nivel del sistema hidropónico tipo torre (en cm).

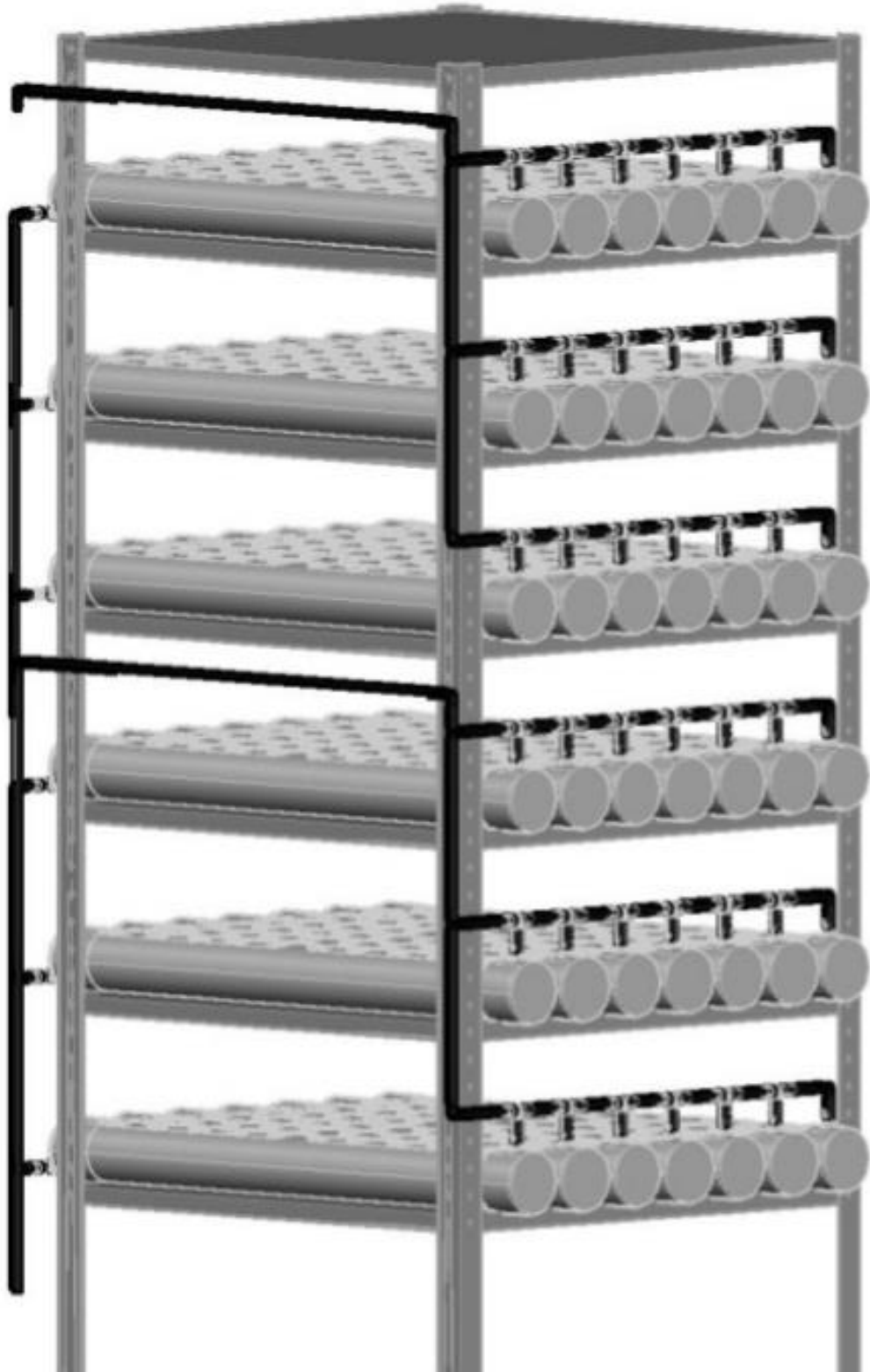


Figura 4. Diseño del sistema hidropónico NFT tipo torre empleado para la producción de *Lactuca sativa* L. var. *longifolia* Lam cv. Parris Island bajo SPFP.

4.4. Etapa 2: Estimación de Curva de Crecimiento y Absorción Nutricional Total por Planta

4.4.1 Variables Evaluadas

Se realizaron muestreos a los 0, 8, 16 y 24 días después de trasplante (DDT) colectando 5 plantas completas (parte aérea+raíz) de cada tratamiento para determinar el peso fresco y seco por planta. Al final del ciclo de producción (24 DDT) además de la determinación de las variables antes mencionadas se determinó la concentración total de N, P, K, Ca, Mg, Cu, Zn, Fe y Mn siguiendo las metodologías reportadas por Rodríguez-Fuentes y Rodríguez-Absi (2015). Los equipos empleados fueron: una estufa de secado (Lab Ovens modelo 40 GC de Quincy Lab, Inc. EUA), una balanza granataria (AND modelo FY-300 de A&D Weighing, EUA), un espectrofotómetro óptico (Spectronic®, modelo Helios Epsilon, EUA) y un espectrofotómetro de absorción atómica (UNICAM Solar®, modelo 9626).

4.4.2. Análisis Estadístico

El peso fresco y seco total por planta se realizó mediante un análisis de varianza bajo un diseño completamente al azar con un arreglo de tratamientos en parcelas divididas (parcela grande: luz y parcela chica: tiempo de muestreo) y la absorción nutricional total se realizó mediante un análisis de varianza bajo un diseño completamente al azar. Ambos análisis se realizaron usando el software InfoStat 2017 en su versión estudiantil de la Universidad Nacional de Córdoba (InfoStat, 2017) y el software de Diseños Experimentales versión 1.0.0.0 Copyright© 2012 de la FA-UANL (Olivares, 1994) para la comparación de medias Tukey ($p \leq 0.05$).

4.5. Etapa 3: Determinación de Compuestos Antioxidantes

4.5.1 Variables Evaluadas

Se realizaron muestreos a los 0, 8, 16 y 24 días después de trasplante (DDT) en los que se determinó la concentración de fenoles totales (FT), flavonoides totales (FLT), no flavonoides totales (NFLT) y capacidad antioxidante (CA) por los ensayos DPPH (1,1-difenil-2-picril-hidrazilo) y ABTS (2,2'azinobis-(3-etilbenzotiazolina)-6-sulfónico) mediante las metodologías reportadas por Niño *et al.* (2017) con algunas modificaciones.

4.5.2. Obtención de Extractos

En cada muestreo realizado durante el experimento (0, 8, 16 y 24 DDT) se obtuvieron 5 extractos de cada tratamiento. Cada extracto se obtuvo a partir de 15 g de biomasa fresca considerando únicamente la parte aérea y desechando la raíz. La muestra fue licuada con 30 mL de metanol al 80 %, filtrada y centrifugada por 10 min a 6000 rpm para recuperar el sobrenadante para su posterior evaluación.

4.5.3. Compuestos Fenólicos Totales (FT)

El contenido de FT fue determinado en base a la reacción del reactivo de Folin-Ciocalteu. La concentración de compuestos fenólicos totales (FT) fue determinada usando el reactivo de Folin-Ciocalteu. Las muestras consistieron de una alícuota de 200 μ L del extracto vegetal, 2600 μ L de agua destilada, 200 μ L de reactivo Folin-Ciocalteu y 2.0 mL de NaCO_3 al 7 %. El tiempo de reacción fue de 90 min en oscuridad y la determinación se realizó a una longitud de onda de 750 nm. El contenido de FT fue reportado en miligramos equivalentes de ácido gálico por kilogramo de muestra fresca (mg EAG kg^{-1}) basado en la ecuación de regresión de una curva de calibración establecida con ácido gálico de 0 a 200 mg L^{-1} .

4.5.4. Compuestos Flavonoides Totales (FLT)

El contenido de FLT fue determinado en base a la reacción del complejo $\text{AlCl}_3\text{-NaNO}_2\text{-NaOH}$. La preparación de las muestras consistió de una alícuota de 200 μL del extracto vegetal, al que se le agregaron 2500 μL de agua destilada, 150 μL de NaNO_2 al 5 %, 150 μL de AlCl_3 al 10 % y 1000 μL de NaOH 1 M, esperando un tiempo de 5 min para la aplicación entre cada reactivo. El tiempo de reacción fue de 15 min en oscuridad y la determinación se realizó a una longitud de onda de 510 nm. El contenido de FLT fue reportado en miligramos equivalentes de catequina por kilogramo de muestra fresca (mg ECat kg^{-1}) basado en la ecuación de regresión de una curva de calibración establecida con catequina de 0 a 200 mg L^{-1} .

4.5.5. Compuestos no Flavonoides Totales (NFLT)

El contenido de compuestos fenólicos no flavonoides fue obtenido de la diferencia entre FT y FLT ($\text{NFLT}=\text{FT}-\text{FLT}$) y expresado en miligramos por kilogramo de muestra fresca (mg kg^{-1}).

4.5.6 Capacidad Antioxidante

4.5.6.1. DPPH (1,1-difenil-2-picrilhidrazilo)

Para esta determinación se empleó solución 60 μM de DPPH (1,1-difenil-2-picrilhidrazilo) en metanol al 80 % la cual se ajustó a una absorbancia igual a 1.0 leída a una longitud de onda de 517 nm. Para la evaluación de las muestras se tomó una alícuota de 50 μL del extracto vegetal y se le añadieron 1500 μL de la solución de DPPH. Se dejó reaccionar en oscuridad durante 30 min y enseguida se procedió a su determinación a 517 nm.

4.5.6.2. ABTS (2,2'azinobis-(3- etilbenzotiazolina)-6-sulfónico)

Para la evaluación de la CA ABTS, se preparó el catión del radical ABTS mezclando 1 mL de ABTS 7.4 mM y 1 mL de $K_2S_2O_8$ (ambos en metanol al 80 %) y se dejó reaccionar durante 12 h, enseguida se ajustó la absorbancia de la solución de trabajo ABTS a 1.0 diluyendo con metanol al 80 % a una longitud de onda de 734 nm. La preparación de las muestras consistió de una alícuota de 50 μ L del extracto vegetal y 1500 μ L del reactivo ABTS. El tiempo de reacción fue de 30 min en oscuridad y enseguida se procedió a su determinación a 734 nm.

La CA por ambos ensayos fue expresada en micromoles equivalentes de Trolox por kilogramo de muestra fresca (μ mol ET kg^{-1}) y fue calculada mediante las ecuaciones de regresión lineal obtenidas de las curvas de calibración en cada caso con Trolox de 0 a 500 μ mol L^{-1} .

4.5.7. Análisis Estadístico

El análisis estadístico de las variables concentración de fenoles totales (FT), flavonoides totales (FLT) y no flavonoides totales (NFLT) y capacidad antioxidante por (DPPH y ABTS) se realizó mediante un análisis de varianza bajo un diseño completamente al azar con un arreglo de tratamientos en parcelas divididas (parcela grande: luz y parcela chica: tiempo) usando el software InfoStat 2017 en su versión estudiantil de la Universidad Nacional de Córdoba (InfoStat, 2017) y el software de Diseños Experimentales versión 1.0.0.0 Copyright© 2012 de la FA-UANL (Olivares, 1994) para la comparación de medias Tukey ($p \leq 0.05$).

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Crecimiento

5.1.1. Peso Fresco y Peso Seco

En los análisis de varianza y comparación de medias realizadas en las variables peso fresco y seco de planta (Figura 5, 6, 7 y 8) se observaron diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$) entre los tratamientos de intensidad de luz y entre las fechas de muestreo, siendo el t_3 ($224.47 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) el que presentó mayor acumulación de peso fresco y seco total (raíz+hojas) a partir de los 16 DDT (Apéndice A7 y A8), este aumento de peso posiblemente fue promovido por una mayor actividad fotosintética (Hunter y Burritt, 2004; Weiguo *et al.*, 2012) debido a una mayor incidencia de luz roja y azul en el t_3 en comparación con el t_1 y t_2 (Cuadro 5). Estos resultados concuerdan con lo reportado por Cha *et al.* (2012) y Lin *et al.* (2013) en el que encuentran una mayor acumulación de peso fresco y seco en el cultivo de lechuga bajo la combinación de luz blanca, roja y azul. Kim *et al.* (2004) y Johkan *et al.* (2012) siendo más específicos mencionan que la presencia simultánea (efecto sinérgico) de luz roja, azul y verde es muy importante para lograr un crecimiento normal en el cultivo de lechuga, mejorando las características morfológicas de la planta como un mayor número de hojas y mayor expansión de estas permitiendo una mayor recepción de luz que se traduce en un aumento de la actividad fotosintética.

En el cultivo de lechuga es deseable un mayor crecimiento de hojas debido a que esta es la parte comercial. Basados en los datos obtenidos en el t_3 del peso seco total por

planta a los 24 DDT, el 84.62 % se localiza en la parte aérea y el 15.37 % en la parte radicular (Cuadro 6). Estos resultados concuerdan con lo encontrado por Kang *et al.* (2013) en el que reporta un 87 % del peso seco en la parte aérea y un 12.98 % en la parte radicular bajo una intensidad de $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ usando luz blanca, roja y azul. El peso fresco (77.32 g) obtenido a los 24 DDT bajo el t_3 es superior a los reportados por Kang *et al.* (2013) de 56.67 g a los 35 DDT bajo una intensidad de $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ en el cultivo de *Lactuca sativa* L. cv. Hongyeom Jeockchukmyeon. En cuanto al t_1 ($121.41 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) el peso fresco a los 8 DDT fue inferior a los 10 g obtenidos por Kim *et al.* (2004) en el mismo periodo bajo un tratamiento de luz roja y azul a una intensidad de $139.41 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ en *Lactuca sativa* L. cv. Waldmannís Green. Para la variable peso seco los valores obtenidos bajo el t_3 a los 18 DDT (1.98 g) son iguales al reportado por Zhang *et al.* (2018) en *Lactuca sativa* L. cv. Ziwei bajo iluminación fluorescente a una intensidad de $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ y superior a los reportados a los 24 DDT por Vázquez *et al.* (2015) en cultivo de *Lactuca sativa* L. cv. Bubba F1 cultivada bajo invernadero.

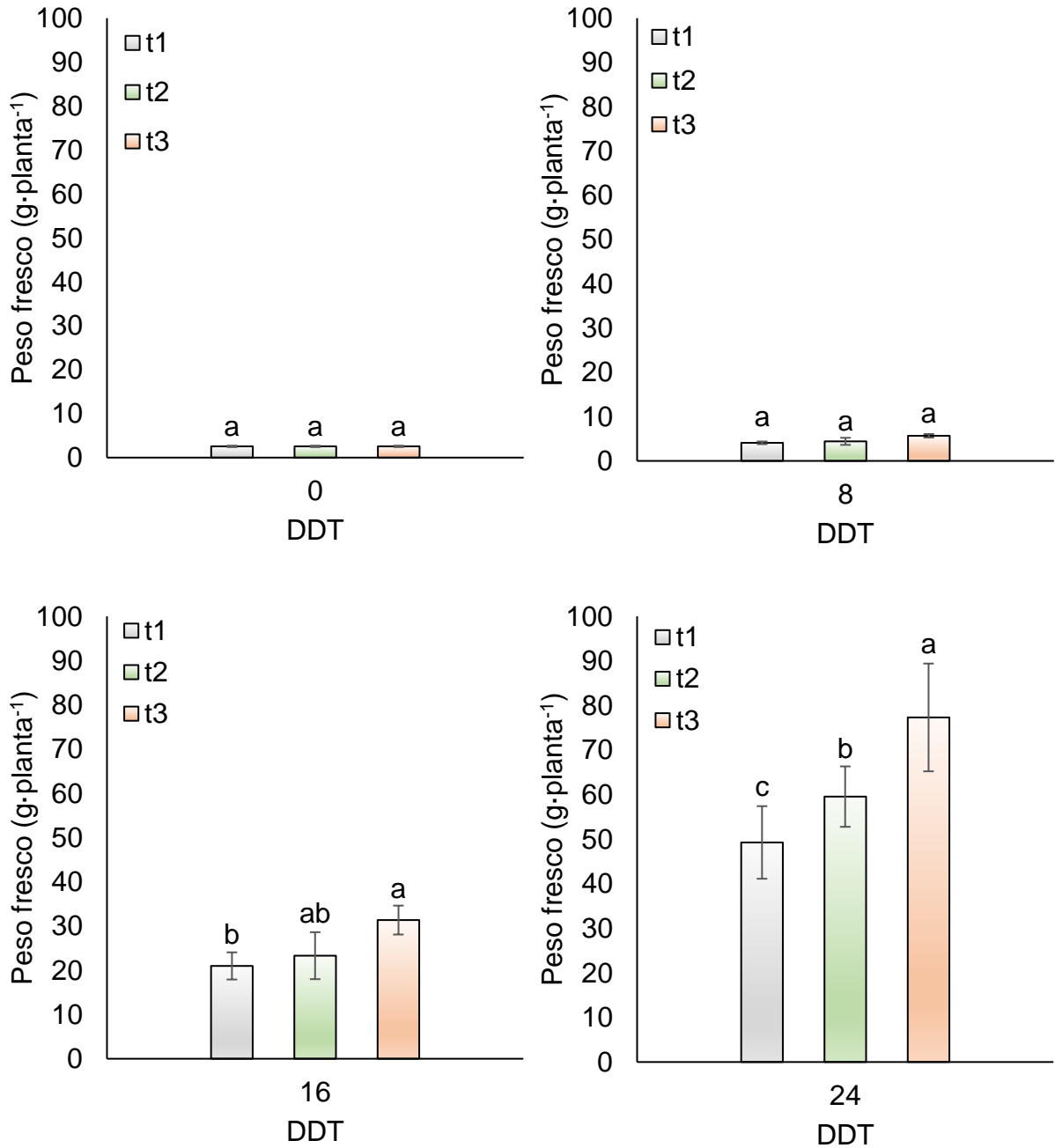


Figura 5. Comparación de medias entre tratamientos por fechas de muestreo del peso fresco de *Lactuca sativa* L. var. *longifolia* Lam cv. Parris Island. Las barras verticales en cada punto representan la desviación estándar de la media basada en un tamaño de muestra igual a 5.

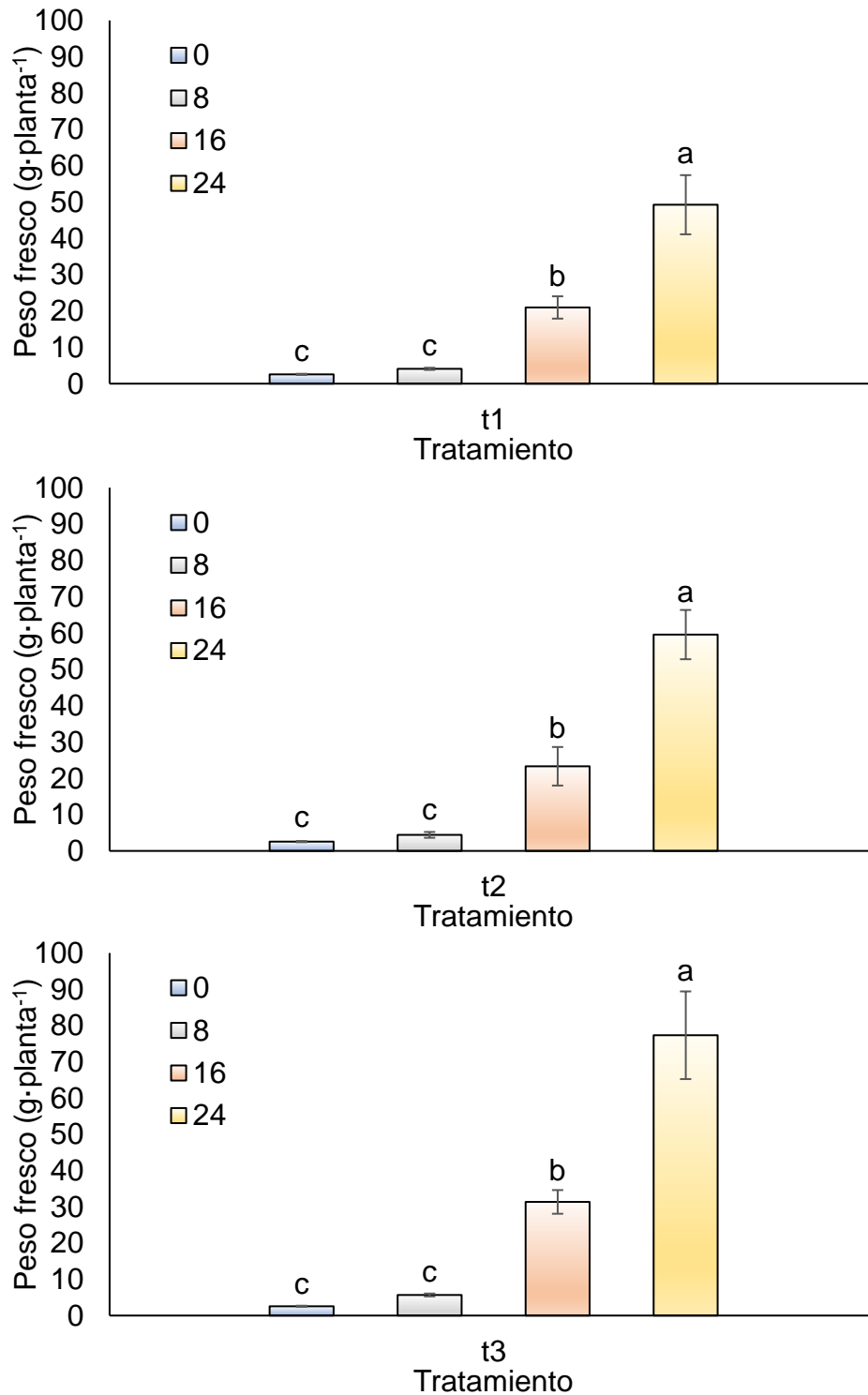


Figura 6. Comparación de medias entre fechas de muestreo por tratamiento del peso fresco de *Lactuca sativa* L. var. *longifolia* Lam cv. Parris Island. Las barras verticales en cada punto representan la desviación estándar de la media basada en un tamaño de muestra igual a 5.

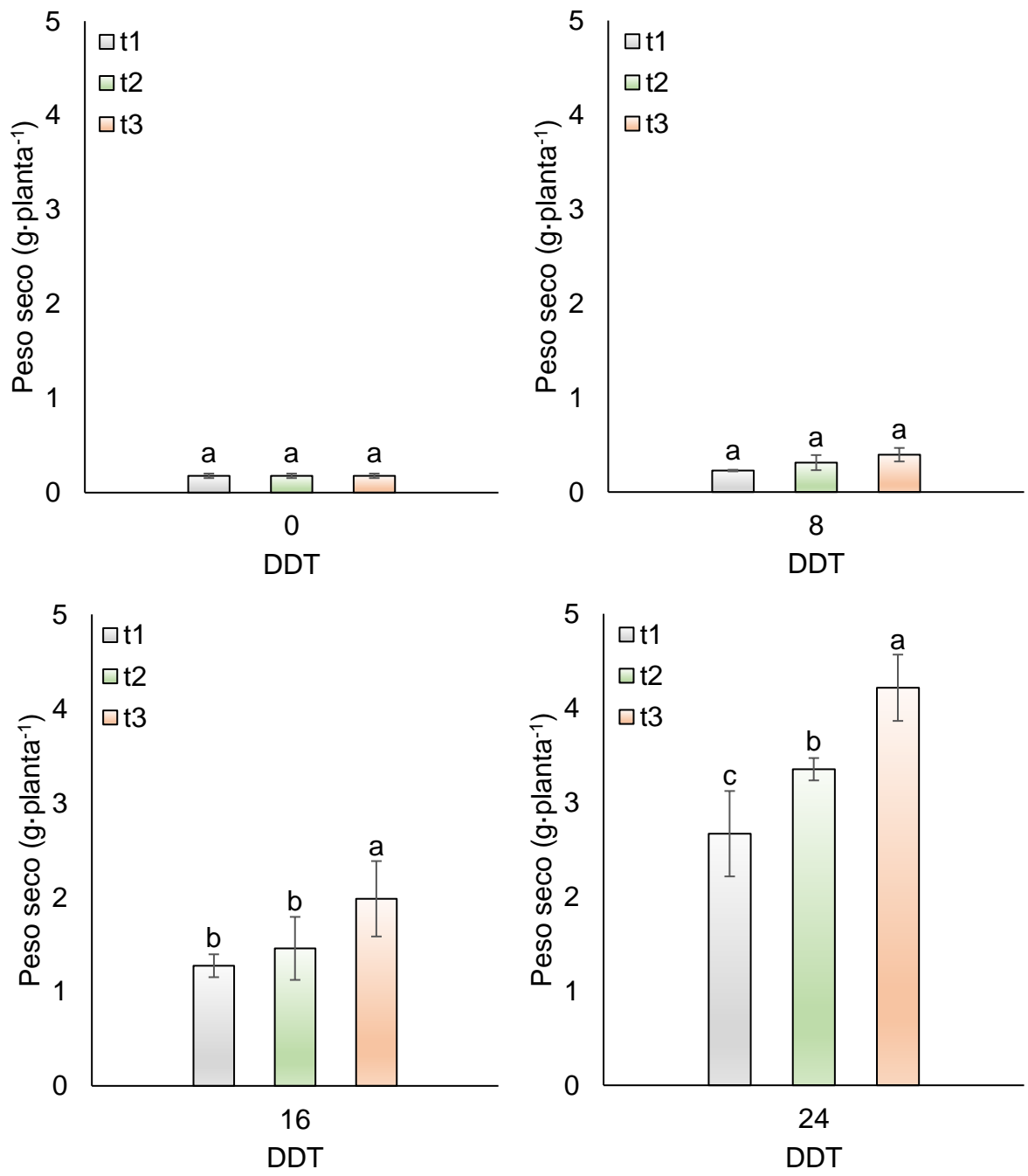


Figura 7. Comparación de medias entre tratamientos por fechas de muestreo del peso seco de *Lactuca sativa* L. var. *longifolia* Lam cv. Parris Island. Las barras verticales en cada punto representan la desviación estándar de la media basada en un tamaño de muestra igual a 5.

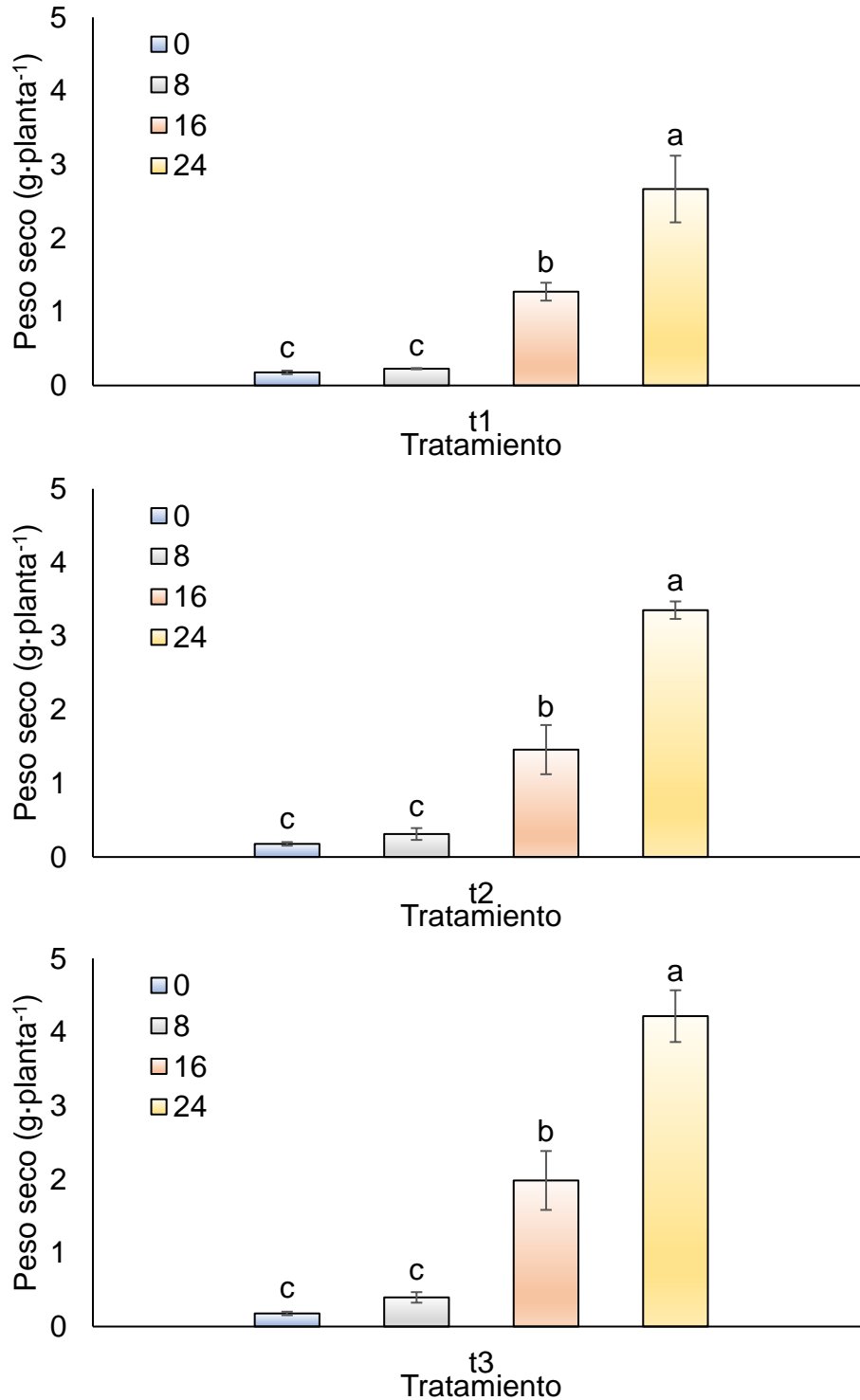


Figura 8. Comparación de medias entre fechas de muestreo por tratamiento del peso seco de *Lactuca sativa* L. var. *longifolia* Lam cv. Parris Island. Las barras verticales en cada punto representan la desviación estándar de la media basada en un tamaño de muestra igual a 5.

Cuadro 6. Peso seco de parte aérea y raíz del cultivo de *Lactuca sativa* L. var. *Longifolia* Lam cv. Parris Island a los 0, 8, 16 y 24 días después de trasplante (DDT) bajo tres tratamientos de intensidad de luz: $t_1=121.41$; $t_2=140.31$ y $t_3=224.47 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, cultivada en un SPFP. ($\bar{X}\pm\text{DE}$; $n=5$).

DDT	Peso Seco (g)					
	HOJA			RAÍZ		
	t_1	t_2	t_3	t_1	t_2	t_3
0	0.15±0.02	0.15±0.02	0.15±0.02	0.03±0.01	0.03±0.01	0.03±0.01
8	0.20±0.00	0.25±0.07	0.34±0.07	0.03±0.01	0.06±0.02	0.06±0.01
16	1.10±0.13	1.23±0.24	1.68±0.33	0.18±0.03	0.23±0.12	0.31±0.08
24	2.32±0.36	2.75±0.14	3.57±0.30	0.35±0.10	0.61±0.22	0.65±0.08

\bar{X} = media; DE=desviación estándar; n= tamaño de muestra.

5.1.2. Curva de Crecimiento

Los resultados de producción de biomasa a través del tiempo (Figura 9) muestran que los tres tratamientos mantuvieron un comportamiento similar de crecimiento; pero la producción de biomasa seca a los 24 DDT fue mayor ($p \leq 0.05$) en el t_3 (4.22 g) en comparación al t_1 (2.67 g) y t_2 (3.35). Según Barrientos *et al.* (2015) el cultivo de lechuga en sus primeros estadios de crecimiento presenta un crecimiento lineal y a partir de los 40 días la acumulación de peso seco aumenta exponencialmente. A pesar del corto tiempo del ciclo de producción en este estudio, el cultivo de lechuga romana tipo baby duplico la biomasa seca total a los 24 DDT con respecto a la observada a los 16 DDT en t_1 , t_2 y t_3 (Figura 9), posiblemente debido a la iluminación continua (Inada y Yasumoto, 1989).

Los modelos cuadráticos de crecimiento (acumulación de peso seco) obtenidos en esta investigación (Figura 9) presentan un alto grado de precisión ($R^2 = 0.9995$ para t_3), esto debido al control total de las variables ambientales que ofrece el SPFP (Cho *et al.*, 2012). En la actualidad existe escasa información científica referente a curva de crecimiento del cultivo bajo el SPFP debido en parte al ciclo corto de producción.

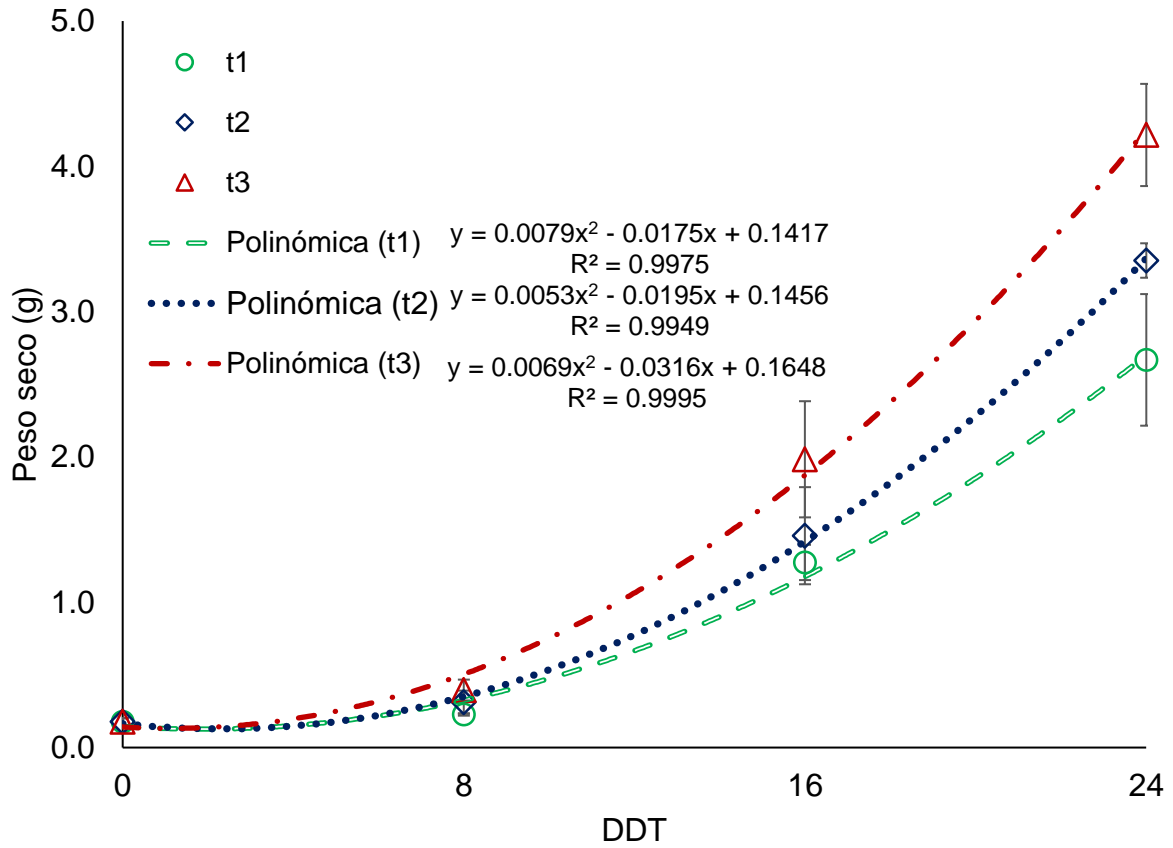


Figura 9. Curva de crescimento del cultivo de *Lactuca sativa* L. var. *longifolia* Lam cv. Parris Island en base a peso seco (raíz + hojas) bajo tres tratamientos de intensidad de luz: $t_1=121.41$; $t_2=140.31$ y $t_3=224.47 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, cultivada en un SPFP. Las barras verticales en cada punto representan la desviación estándar de la media basada en un tamaño de muestra igual a 5.

5.1.3. Absorción Nutricional

Los tratamientos mostraron diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$) en la absorción total de nutrientes por planta de lechuga romana tipo baby (Figura 10), destacando el t_3 con los mayores valores de N, P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Zn y Mn en comparación a los observados en el t_1 y t_2 , esto posiblemente debido a un mayor crecimiento radicular y parte aérea estimulado por el tipo y cantidad de luz irradiada al cultivo (Johkan *et al.*, 2012). Shin (2012) coincide que en el cultivo de lechuga la absorción de nutrientes está influenciada por la calidad de luz, reportando una mayor acumulación de P, Ca, Mg y N en las longitudes de onda del rojo y azul más luz blanca. La relación entre la luz roja-azul (en base a la suma de sus intensidades) fue de 80:20 % aproximadamente en todos los tratamientos (Cuadro 5).

Morewane (2014) reporta que bajo esta relación (rojo:azul=80:20 %) se promueve una mayor acumulación Ca, Mg, Na, Fe, Mn, Zn y B; por lo que la mayor acumulación de nutrientes en el tratamiento t_3 (Figura 10) posiblemente fue debido a la presencia de luz blanca que proporciono una mayor intensidad de luz roja y azul, existiendo escasa información bibliográfica que refuerce estos resultados.

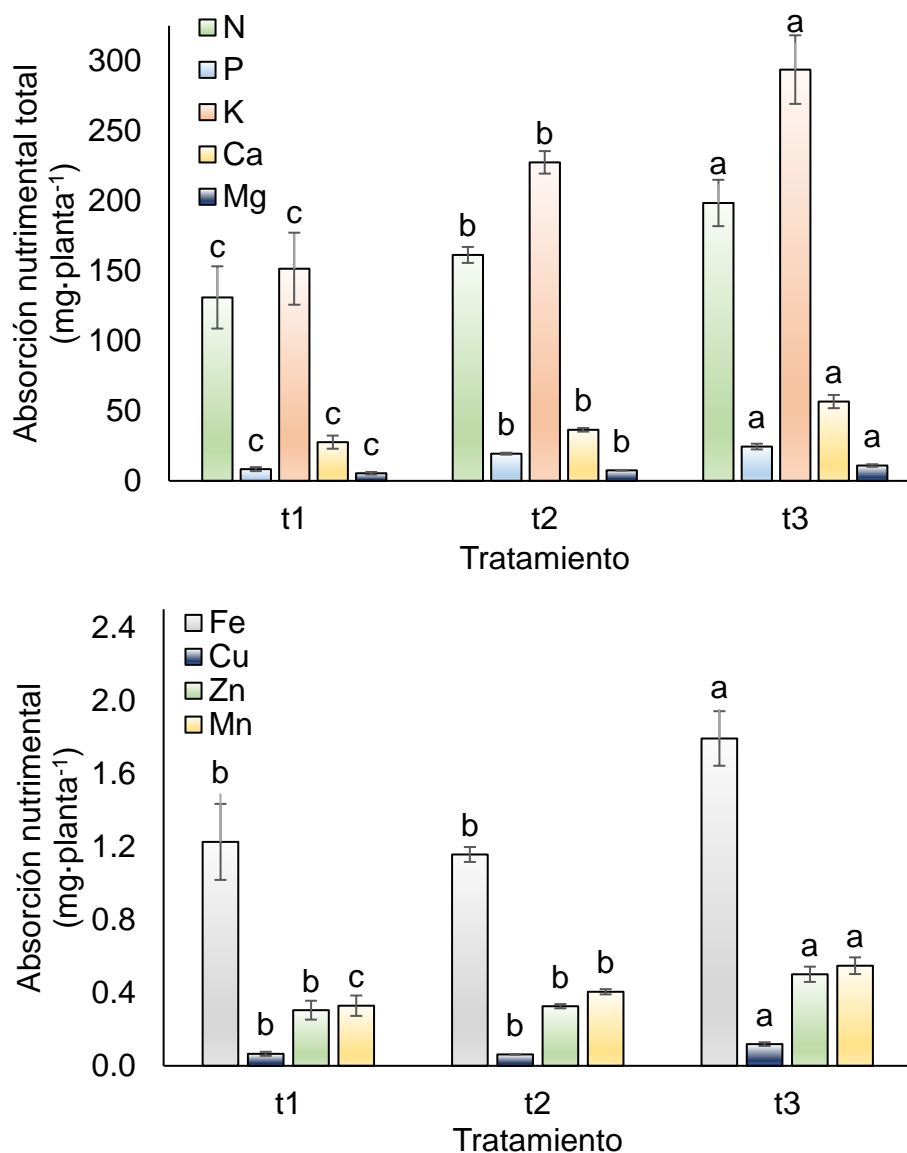


Figura 10. Absorción total de nutrientes por planta del cultivo de *Lactuca sativa* L. var. *longifolia* Lam cv. Parris Island en base a peso seco (raíz + hojas) a los 24 días después de trasplante bajo tres tratamientos de intensidad de luz: t₁=121.41; t₂=140.31 y t₃=224.47 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, cultivada en un SPFP. Las barras verticales representan la desviación estándar de la media basada en un tamaño de muestra igual a 5; letras minúsculas representan la comparación de medias entre tratamientos ($p \leq 0.05$).

5.1.4. Cantidad de Luz Acumulada

En el SPFP la producción es expresada en base a unidad de volumen (m^3), debido a que usa los principios de agricultura vertical con control ambiental total, en este estudio basados en el peso seco y fresco total por planta (Figura 6 y 8) considerando una densidad de población de $201 \text{ plantas} \cdot m^{-3}$ se obtiene una producción de biomasa seca total de: $t_1=536.27 \text{ g} \cdot m^{-3}$, $t_2=673.75 \text{ g} \cdot m^{-3}$ y $t_3=847.42 \text{ g} \cdot m^{-3}$ y fresca total de $t_1=9,902.46 \text{ g} \cdot m^{-3}$, $t_2=11,970.35 \text{ g} \cdot m^{-3}$ y $t_3=15,540.91 \text{ g} \cdot m^{-3}$ con una cantidad de luz acumulada (CLA) del trasplante a la cosecha de 755.27 , 872.78 y $1396.38 \text{ mol} \cdot m^{-3}$ respectivamente. El desglose de la cantidad de luz fotosintética activa acumulada $\cdot m^{-3}$ en cada uno de los tratamientos se presenta en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Cantidad de luz acumulada a los 24 DDT para la producción de *Lactuca sativa* L. var. *longifolia* Lam cv. Parris Island cultivada en un SPFP.

Color	Longitud de onda (nm)	t ₁	t ₂		t ₃
			(mol·m ⁻³ ·24 días ⁻¹)		
Violeta	380-450	199.5	176.43		301.77
Azul	450-495	112.41	149.28		179.85
Verde	495-570	0	0		185.49
Amarillo	570-590	0	0		62.64
Anaranjado	590-620	14.25	22.2		97.92
Rojo	620-750	429.12	524.91		568.71
Total	380-750	755.28	872.82		1396.38
Proporción Rojo/Azul		3.81:1	3.51:1		3.16:1

Considerando los valores de CLA (Cuadro 7) y peso seco producido (Figura 6 y 8) se puede inferir que para la producción de 1 g de materia seca después de plántula requirió una intensidad de luz acumulada de 1.41, 1.30 y 1.65 mol·m⁻³ para el t₁, t₂ y t₃ respectivamente, observándose que el t₂ seguido de t₁ requirieron menor cantidad de luz para la producción de peso seco (más eficientes), esto debido a que las plantas fueron irradiadas con longitudes de onda rojo y azul principalmente; pero la luz blanca como suplemento además de aportar (5 y 7 μmol·m⁻²·s⁻¹ de luz azul y roja) proporciono otras longitudes de onda que influyen en el crecimiento mejorando la acumulación de peso fresco y seco en un menor tiempo a diferencia del t₁ y t₂, lo que permite recortar el ciclo de cultivo y de esta forma aumentar la capacidad de producción.

5.2. Compuestos Antioxidantes

5.2.1 Compuestos Fenólicos Totales (FT), Compuestos Flavonoides Totales (FLT) y Compuestos No Flavonoides Totales (NFLT)

Los resultados presentaron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre los tratamientos solo a los 24 DDT para las variables FT, FLT y NFLT (Cuadro 8). La concentración de FT y NFLT en el t₂ aumentó significativamente ($p \leq 0.05$) en cada fecha de muestreo a excepción de la variable FLT que se mantuvo igual desde los 16 DDT hasta el término del experimento. El t₂ generó la mayor concentración de compuestos fenólicos en comparación al t₁ y t₃ con valores de concentración de hasta 295.55 (FT), 98.73 (FLT) y 196.82 (NFLT) mg kg⁻¹ a los 24 DDT.

La concentración de FT, FLT y NFLT en los tratamientos t₁ y t₃ no se incrementó ($p \leq 0.05$) después de los 16 DDT siendo estadísticamente iguales ($p \leq 0.05$) por fecha de muestreo.

El valor de concentración de compuestos fenólicos en el t₂ presentó incrementos significativos ($p \leq 0.05$) de 295.55, 98.73 y 196.82 mg kg⁻¹ en comparación a los valores iniciales (0 DDT) de 67.51, 15.22 y 52.29 mg kg⁻¹ en las variables FT, FLT y NFLT, respectivamente (Cuadro 8).

De acuerdo con Hasan *et al.* (2017), el aumento en la actividad de la fenilalanina amonio liasa en presencia de iluminación LED roja-azul puede ser responsable del incremento en la producción de metabolitos secundarios en plantas, debido a que esta enzima es el primer paso de la ruta metabólica de la síntesis de fenilpropanoides. Lo anterior concuerda con los resultados obtenidos en este estudio, ya que el t₂ (Luz LED roja-azul) presentó los mayores niveles de compuestos fenólicos.

Cuadro 8 Concentración de fenoles totales (FT), flavonoides totales (FLT), no flavonoides totales (NFLT) en hojas de *Lactuca sativa* L. var. *longifolia* Lam cv. Parris Island a los 0, 8, 16 y 24 días después de trasplante (DDT) cultivada en un SPFP. ($\bar{X} \pm DE$; n=5).

FT (mg EAG·kg⁻¹)			
DDT	t₁	t₂	t₃
0	67.51±1.55 ^{cA}	67.51±1.55 ^{dA}	67.51±1.55 ^{cA}
8	112.19±11.56 ^{bA}	136.23±33.39 ^{cA}	115.77±24.74 ^{bA}
16	214.58±6.89 ^{aA}	233.74±14.27 ^{bA}	223.10±6.25 ^{aA}
24	219.03±10.17 ^{aB}	295.55±16.92 ^{aA}	210.16±6.81 ^{aB}
FLT (mg ECat·kg⁻¹)			
0	15.22±1.28 ^{cA}	15.22±1.28 ^{cA}	15.22±1.28 ^{cA}
8	40.07±8.66 ^{bA}	57.53±18.51 ^{bA}	44.00±13.39 ^{bA}
16	72.07±5.55 ^{aA}	87.33±10.99 ^{aA}	81.60±21.40 ^{aA}
24	66.73±4.73 ^{aB}	98.73±6.78 ^{aA}	72.40±3.07 ^{aB}
NFLT (mg·kg⁻¹)			
0	52.29 ±1.68 ^{bA}	52.29 ±1.68 ^{dA}	52.29 ±1.68 ^{bA}
8	72.13±10.21 ^{bA}	78.69±16.27 ^{cA}	71.77±14.09 ^{bA}
16	142.51±10.66 ^{aA}	146.41±9.93 ^{bA}	141.50±21.81 ^{aA}
24	152.30±6.18 ^{aB}	196.82±11.73 ^{aA}	137.76±7.30 ^{aB}

Letras mayúsculas de filas representan la comparación de medias entre tratamientos ($p \leq 0.05$).

Letras minúsculas de columnas representan la comparación de medias entre las fechas de muestreo ($p \leq 0.05$).

\bar{X} = media; DE=desviación estándar; n= tamaño de muestra.

Son y Oh (2013) reportan que la presencia de luz azul incrementa la concentración de FLT en el cultivo de *Lactuca sativa* L. "Grand Rapid TBR" presentando diferencias estadísticas significativas a partir de una intensidad de $22.1 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$; obteniendo una mayor concentración a los $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (0.20 hasta $0.38 \text{ mg ECat g}^{-1}$ de biomasa fresca). En este estudio el efecto promotor de incremento significativo ($p \leq 0.05$) en esta variable en el cultivo de lechuga romana tipo baby se presentó a una intensidad de luz azul igual a $18.07 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (t_1) a partir de los 16 DDT, siendo más evidente en t_2 con $23.99 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Cuadro 5 y 8).

Aunque la intensidad del espectro de luz rojo ($91.42 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) y azul ($28.91 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) presentes en el t_3 (Cuadro 5) fue mayor al de los tratamientos t_1 y t_2 ; la concentración de compuestos fenólicos del t_3 fue estadísticamente igual ($p \leq 0.05$) al del t_1 e inferior ($p \leq 0.05$) al del t_2 , posiblemente debido a la presencia de otras longitudes de onda como el amarillo y verde; Bouly *et al.* (2007) y Banerjee *et al.* (2007) reportan que el estado de absorción verde de criptocromo invierte las respuestas inducidas por la luz azul y Folta y Maruhnich (2007) concluyen que efectos de la luz verde tienden a revertir los procesos establecidos por la luz roja y azul.

Heo *et al.* (2012) mencionan que la producción de compuestos fenólicos en las plantas se asocia con la actividad de la fenilalanina amoníaco-liasa (enzima clave de la ruta del fenilpropanoide), la cual es mayormente estimulada bajo la mezcla de luz roja y azul.

Por otra parte, Li y Kubota (2009) mencionan que a una intensidad de luz de $305 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ compuesta por 38.5 , 89.5 , $181.8 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de azul, verde y rojo se puede elevar el nivel de citoquinina en plantas de lechuga "Red Cross" lo que estimula un

aumento en la síntesis de FT hasta valores de 2590 mg EAG kg⁻¹ de biomasa fresca debido a un estrés foto-oxidativo. En este estudio la intensidad de luz de los colores azul, verde y rojo presente en el t₃ fueron inferiores (28.91, 29.82 y 91.42 μmol·m⁻²·s⁻¹ respectivamente) lo que posiblemente fue insuficiente para producir un incremento significativo ($p \leq 0.05$) en la concentración de FT y FLT en el cultivo de lechuga romana tipo baby, aunque la respuesta de un cultivo en la producción de compuestos antioxidantes no solo dependen de la luz, sino que también de la especie vegetal, variedad y etapa de crecimiento (Samuoliene *et al.*, 2012).

La concentración de FT (Cuadro 8) obtenidos en el t₂ (295.55 mg EAG kg⁻¹) fue superior al valor reportado por Cano y Arnao (2005) de 85 mg EAG kg⁻¹ en hojas externas del cultivo de lechuga romana cultivada en invernadero; aunque fueron inferiores a lo encontrado por Li y Kubota (2009) de 2590 mg EAG kg⁻¹ en el cultivo de lechuga “Red Cross” bajo una intensidad de 305 μmol m⁻² s⁻¹ en un SPFP, posiblemente debido a que esta variedad presenta una alta concentración de antocianinas en hojas.

5.2.2. Capacidad Antioxidante DPPH y ABTS

La capacidad antioxidante (CA) del cultivo de lechuga romana tipo baby (Figura 11 y 12) mostró diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos de luz (24 DDT), así como entre los tiempos de muestreo ($p \leq 0.05$). La mayor capacidad antioxidante (ABTS y DPPH) fue generada por el t₂ con valor de 1624.67 μmol ET kg⁻¹ en el ensayo DPPH y de 2221.20 μmol ET kg⁻¹ en el ensayo ABTS, esto posiblemente debido a que el cultivo presentó un mayor estrés foto-oxidativo generado a partir de una sobreexcitación de la molécula de clorofila (clorofila triplete), Hernández *et al.* (2017) menciona que conforme se incrementa los valores de radiación

fotosintéticamente activa (principalmente rojo y azul) una parte cada vez mayor de la energía capturada por la clorofila no es utilizada para las reacciones fotoquímicas, sino que deriva hacia la activación del oxígeno produciendo oxígeno singlete o procesos de disipación de energía que producen formación de radicales libres, lo que genera una respuesta de producción de metabolitos con actividad antioxidante para contrarestar estos efectos.

Los valores obtenidos por el t_2 fueron estadísticamente diferentes ($p \leq 0.05$) a los generados de 891.33 y 1669.8 $\mu\text{mol ET kg}^{-1}$ por el t_1 y de 1078.67 y 1698.60 $\mu\text{mol ET kg}^{-1}$ por el t_3 para los ensayos DPPH y ABTS respectivamente a los 24 DDT.

Aunque en el t_3 correspondió a la mayor intensidad del espectro rojo y azul en comparación al t_1 (Cuadro 5) la CA fue estadísticamente igual en ambos ensayos (DPPH y ABTS), debido posiblemente a la presencia de longitudes de onda intermedias (verde: 29.82 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, amarillo: 10.07 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ y naranja: 15.74 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$). La calidad de luz afecta las propiedades foto-oxidativas de las plantas mediante la modulación del sistema enzimático antioxidante de defensa, además de la producción de compuestos fenólicos. El aumento en las propiedades antioxidantes por efecto de iluminación LED ha sido encontrado en algunos cultivos (col china, col rizada, tomate y guisantes) como respuesta del uso de la combinación de luz roja-azul y ha resultado mejor que la iluminación blanca (Hasan *et al.*, 2017).

Samouline *et al.* (2012) desde un enfoque de luz suplementaria y no como fuentes de luz principal mencionan que la luz verde (520 nm), amarillo (595 nm) y naranja (622 nm) no presentaron un efecto promotor en la CA DPPH. Por otro lado, Folta y Maruhnich (2007) reportan que la luz verde tiende a inhibir los efectos promotores establecidos por luz roja y azul. Por otra parte, Son y Ho (2013) reportan que los

valores de la CA ABTS en 2 cultivares de lechuga bajo un tratamiento de luz blanca fueron inferiores a los generados bajo una combinación de luz roja-azul, encontrando aumentos significativos ($p \leq 0.01$) de la CA ABTS bajo una combinación de 70.11-100.89 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de luz roja-azul en lechuga de hoja roja y de 126.54-44.46 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de luz roja-azul en lechuga de hoja verde.

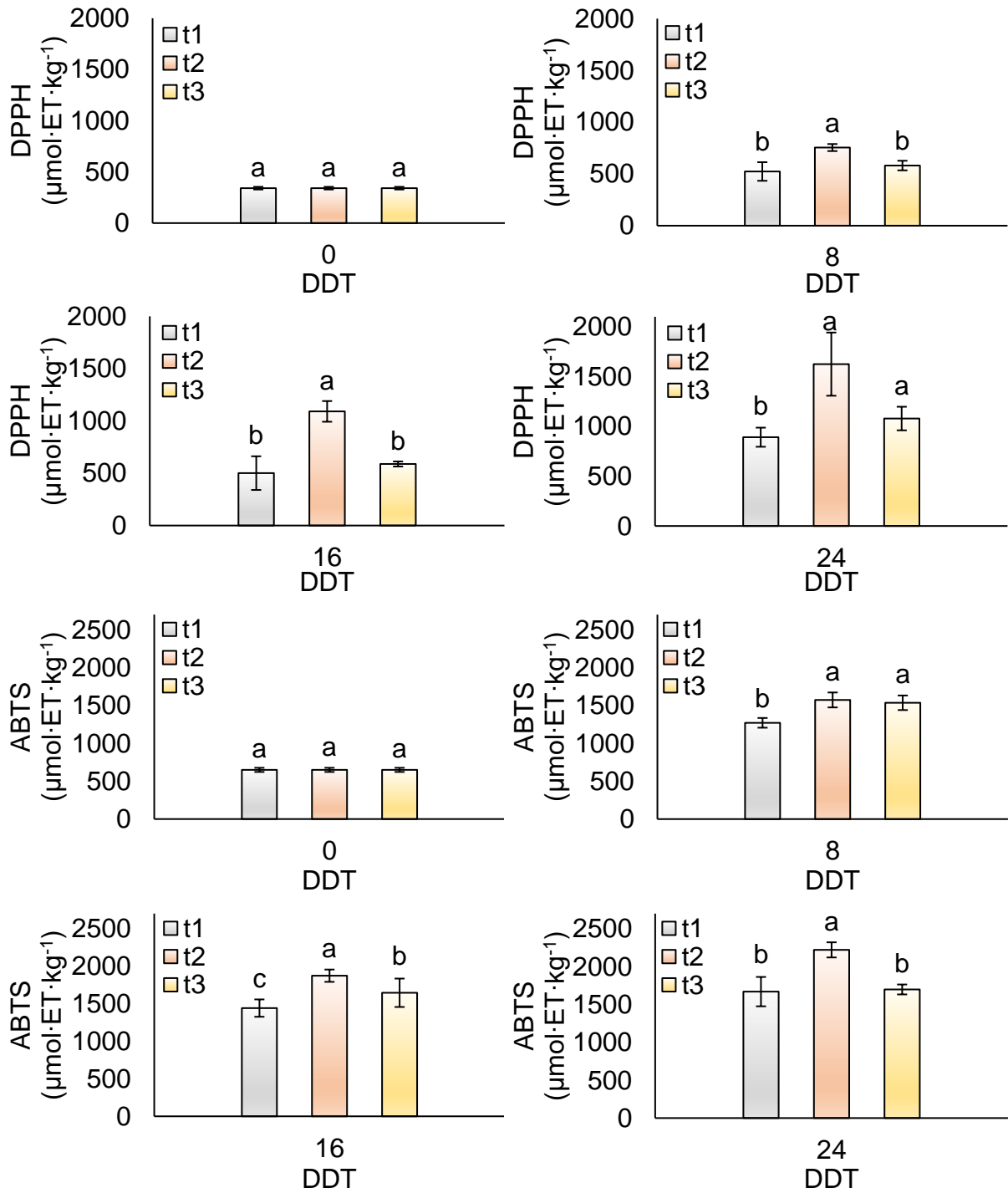


Figura 11. Comparación de medias entre tratamientos por fechas de muestreo de la capacidad antioxidante (DPPH y ABTS) en hojas de *Lactuca sativa* L. var. *Longifolia* Lam cv. Parris Island. Las barras verticales en cada punto representan la desviación estándar de la media basada en un tamaño de muestra igual a 5.

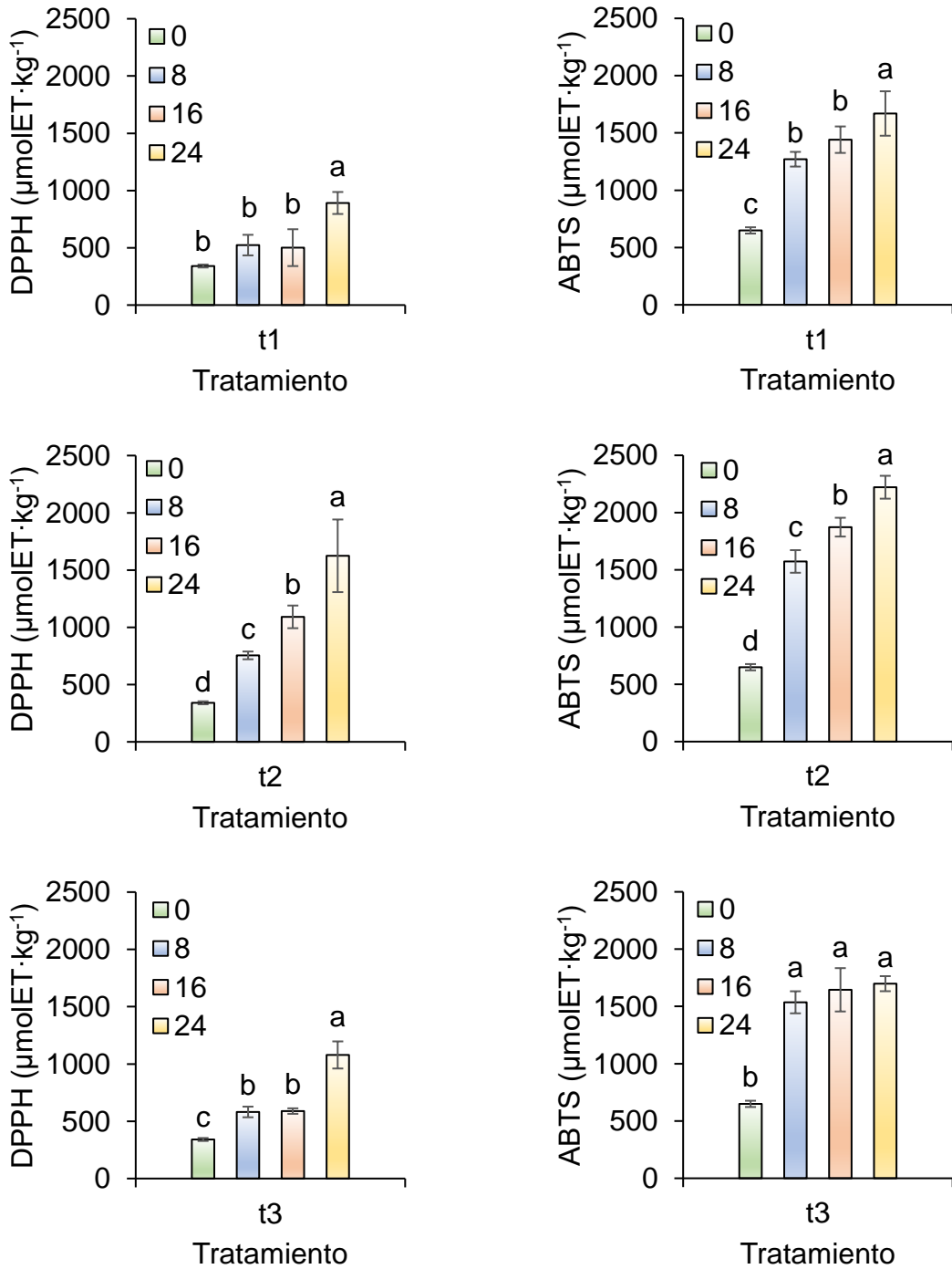


Figura 12. Comparación de medias entre fechas de muestreo por tratamiento de la capacidad antioxidante (DPPH y ABTS) en hojas de *Lactuca sativa* L. var. *Longifolia* Lam cv. Parris Island. Las barras verticales en cada punto representan la desviación estándar de la media basada en un tamaño de muestra igual a 5.

El valor de CA obtenido en el ensayo DPPH a los 24 DDT ($1624.67 \mu\text{mol ET kg}^{-1}$) en el t_2 (Figura 12) es menor al reportado por Samouline *et al.* (2013) en lechuga romana ($10020 \mu\text{mol ET kg}^{-1}$) cultivada bajo una intensidad de luz roja y azul de 162 y $8 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ respectivamente. Además, Zukauzkas *et al.* (2011) indican que el incremento de la CA en hojas de lechuga verde es dependiente principalmente de la luz roja (638 nm), lo que puede explicar estas diferencias encontradas. Para el caso de la CA por el ensayo ABTS los valores generados por el t_2 ($2221.20 \mu\text{mol ET kg}^{-1}$) fueron superiores a los reportados por Cano y Arnao (2005) en cultivo hidropónico de lechuga en condiciones de invernadero ($1297 \mu\text{mol ET kg}^{-1}$).

5.3. Requerimientos Hídricos, Nutrimientales y Lumínicos para la Producción de Lechuga Romana Tipo Baby Bajo el Sistema Fábrica de Plantas

Los requerimientos nutrimentales y lumínicos (Cuadro 9), así como hídricos (Cuadro 11) para la producción de 201 plantas de lechuga romana tipo baby cultivadas en un volumen de 1 m³ en un periodo de 24 días bajo el SPFP que a continuación se describen se establecieron en base a la producción obtenida bajo el tratamiento de intensidad de luz de 224.47 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (t₃), cultivada bajo las condiciones ambientales de temperatura promedio diaria de 24 °C, humedad relativa de 60 %, fotoperiodo de 24 h·día⁻¹ y concentración de CO₂ ambiental promedio diaria de 436.63±152.89 ppm.

Cuadro 9. Requerimiento nutrimental y de cantidad de luz acumulada (CLA) para la producción de 201 plantas de *Lactuca sativa* L. var. *longifolia* Lam cv. Parris Island cultivadas en un espacio de 1 m³ bajo el SPFP en un periodo de 24 días.

CLA (mol·m ⁻³)	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Cu	Zn	Mn
1396.38	39.87	4.92	59.03	11.38	2.20	0.36	0.024	0.10	0.11

Las cantidades y costos de fuentes comerciales de nutrimentos requeridos se presentan en el Cuadro 10.

Cuadro 10. Costos de fuentes de nutrimentos comerciales requeridos para la producción de 201 plantas de *Lactuca sativa* L. var. *longifolia* Lam cv. Parris Island cultivadas en un espacio de 1 m³ bajo el SPFP en un periodo de 24 días.

Fertilizante comercial	Peso requerido (g)	Costo (MXN)
MAP	18.27	0.65
KNO ₃	152.63	4.88
Ca(NO ₃) ₂ .4H ₂ O	67.05	0.95
Mg(NO ₃) ₂	7.81	0.14
FeSO ₄ .7H ₂ O	1.79	0.08
MnSO ₄ .H ₂ O	0.33	0.009
CuSO ₄ .5H ₂ O	0.96	0.09
ZnSO ₄ .H ₂ O	0.27	0.009
Total		6.84

Nota: Los costos son basados en precios manejados por casas comerciales en el año de 2018.

El consumo de agua por el cultivo de lechuga romana tipo baby registrado en un periodo de 24 días DDT se desglosa en el Cuadro 11. Considerando la densidad de siembra (201 plantas·m⁻³) y el volumen de agua total gastado (89.1 L) se obtiene un consumo hídrico promedio de 0.44 L·planta⁻¹.

Cuadro 11. Requerimiento hídrico para la producción de 201 plantas de *Lactuca sativa* L. var. *longifolia* Lam cv. Parris Island cultivadas en un espacio de 1 m³ bajo el SPFP en un periodo de 24 días.

DDT	Volumen gastado (L)	Consumo Hídrico por Planta (L·planta⁻¹)
8	17.5	0.09
16	35	0.17
24	35.6	0.18
Total	88.1	0.44

6. CONCLUSIONES

Los rangos del espectro electromagnético presentes en la luz blanca (450-495, 495-570 y 620-750 nm) suplementada en el t₃ proporcionó un incremento ($p \leq 0.05$) en el crecimiento de la planta (peso seco y fresco total) y la absorción de todos los nutrimentos considerados.

La iluminación LED rojo:azul bajo una relación 3.16:1 con suplemento de luz blanca e intensidad total de $224.47 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ estimuló la fotosíntesis neta que produjo un incremento del 58.0 % en la producción de peso seco y del 56.9 % en el peso fresco con respecto a una relación de luz roja:azul de 3.81:1 e intensidad de $121.41 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$.

La mayor concentración de los antioxidantes evaluados y la capacidad antioxidante ($p \leq 0.05$) correspondió a una intensidad de $140.31 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ de luz roja:azul con una relación igual a 3.51:1 e incrementando un 34.9, 47.9 y 29.2 % la concentración de FT, FLT y NFLT con respecto a la relación 3.81:1 e intensidad de $224.47 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$.

7. BIBLIOGRAFÍA

1. Ainsworth, E. A., & Rogers, A. (2007). The response of photosynthesis and stomatal conductance to rising [CO₂]: mechanisms and environmental interactions. *Plant, Cell & Environment*, 30, 258-270.
2. Albright, L. D., Both, A. J., & Chiu, A. J. (2000). Controlling greenhouse light to a consistent daily integral. *Transactions of the ASAE*, 43(2), 421.
3. Alpízar-Vargas, M. E., González-Abaunza, D. F., Spaans, E. J., & Tabora, P. (2006). Plan dinámico de fertilización para escalopine verde (*Cucurbita pepo*). Dynamic fertilization plan for the scallop gourd (*Cucurbita pepo*). *Tierra Tropical: Sostenibilidad, Ambiente y Sociedad*, 2(1), 39-47.
4. Alvarado, D., Chavez, F. y Anna, K. (2001). Seminario de Agronegocios: Lechugas Hidropónicas. Universidad del Pacífico. <http://files.aiagronegocios.webnode.es/200000072-ae45bb039e/Lechuga%20Hidroponica.pdf>.
5. ARDUINO. (2016). Arduino versión 1. 6. 12. Recuperado de <https://www.arduino.cc/en/Main/Software>.
6. Arellano-García, M., Valera-Martínez, D., Urrestarazu-Gavilán, M., Quezada-Martín, M., Murguía-López, J., & Zermeño González, A. (2011). Ventilación natural y forzada de invernaderos tipo almería y su relación con el rendimiento de tomate. *Terra Latinoamericana*, 29, 379-386.
7. AUTODESK, (2016). Autocad versión 2016. Recuperado de <http://www.autodesk.mx/products/autocad/free-trial>.
8. Banerjee, R., Schleicher, E., Meier, S., Viana, R. M., Pokorny, R., Ahmad, M., Bittl, R., & Batschauer, A. (2007). The signaling state of *Arabidopsis cryptochrome 2* contains flavin semiquinone. *Journal of Biological Chemistry*, 282(20), 14916-14922.
9. Barrientos Llanos, H., del Castillo Gutiérrez, C. R., & García Cárdenas, M. (2015). Análisis de crecimiento funcional, acumulación de biomasa y translocación de materia seca de ocho hortalizas cultivadas en invernadero. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 2(1), 76-86.
10. Baudoin, W., Nisen, A., Grafiadellis, M., Verlodt, H., Jiménez, R., De Villele, O., La Malfa, G., Martínez-García P., Verlodt H., & Monteiro, A. (2002). El cultivo protegido en clima mediterráneo. *Medios y Técnicas de Producción. Suelo y Sustratos. FAO. Roma*, 143-182.
11. Bouly, J. P., Schleicher, E., Dionisio-Sese, M., Vandenbussche, F., Van Der Straeten, D., Bakrim, N., ... & Ahmad, M. (2007). Cryptochrome blue light photoreceptors are activated through interconversion of flavin redox states. *Journal of Biological Chemistry*, 282(13), 9383-9391.

12. Bourget, C. M. (2008). An introduction to light-emitting diodes. *HortScience*, *43*, 1944-1946.
13. Bula, R. J., Morrow, R. C., Tibbitts, T. W., Barta, D. J., Ignatius, R. W., & Martín, T. S. (1991). Light-emitting diodes as a radiation source for plants. *HortScience*, *26*(2), 203-205.
14. Cano, A., & Arnao, M. B. (2005). Hydrophilic and lipophilic antioxidant activity in different leaves of three lettuce varieties. *International Journal of Food Properties*, *8*(3), 521-528.
15. Carrasco, G., Rodríguez, E., Escobar, P., & Izquierdo, J. (1999). Development of nutrient film technique "NFT" in Chile: The use of intermittent recirculation regimes. *Acta Horticulturae*, *481*, 305-310.
16. Castro-López, C., Rojas, R., Sánchez-Alejo, E. J., Niño-Medina, G., & Martínez-Ávila, G. C. (2016). Phenolic compounds recovery from grape fruit and by-products: An overview of extraction methods. In *Grape and wine biotechnology*. InTech.
17. Cha, M. K., Kim, J. S., & Cho, Y. Y. (2012). Growth response of lettuce to various levels of EC and light intensity in plant factory. *Journal of Bio-Environment Control*.
18. Chang, M., Hoyos, M., & Rodríguez, A. (2000). *Manual práctico de hidroponía: sistema de raíz flotante y sistema de sustrato sólido*. Perú, SE.
19. Cho, Y. Y., Choi, K. Y., Lee, Y. B., & Son, J. E. (2012). Growth characteristics of sowthistle (*Ixeris dentata* Nakai) under different levels of light intensity, electrical conductivity of nutrient solution, and planting density in a plant factory. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, *53*(5), 368-372.
20. Choi, K. Y., Paek, K. Y., & Lee, Y. B. (2000). Effect of air temperature on tipburn incidence of butterhead and leaf lettuce in a plant factory. In *Transplant Production in the 21st Century* (pp. 166-171). Springer Netherlands.
21. Collier, G. F., & Tibbitts, T. W. (1984). Effects of Relative Humidity and Root Temperature on Calcium Concentration and Tipburn. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, *109*, 128-131.
22. Cometti, N. N. (2003). *Nutrição Mineral da Alface (Lactuca sativa L.) em Cultura Hidropônica-Sistema NFT*. (Tesis doctoral) Universidad Federal Rural de Rio de Janeiro, Brasil.
23. Drake, B. G., Azcon-Bieto, J., Berry, J., Bunce, J., Dijkstra, P., Farrar, J., Gifford, R. M., Gonzalez-Meler, M., Koch, A. G., Lambers, H., Wulschleger, S., & Siedow, J. (1999). Does elevated atmospheric CO₂ concentration inhibit mitochondrial respiration in green plants?. *Plant, Cell & Environment*, *22*(6), 649-657.
24. DuPont, M. S., Mondin, Z., Williamson, G., & Price, K. R. (2000). Effect of variety, processing, and storage on the flavonoid glycoside content and composition of lettuce and endive. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *48*(9), 3957-3964.
25. Etchevers, B. J. D. (2000). Técnicas de diagnóstico útiles en la medición de la fertilidad del suelo y el estado nutrimental de los cultivos. *Terra Latinoamericana*, *17*(3), 209-219.

26. Fang, W., & Jao, R. C. (2000). A review on artificial lighting of tissue cultures and transplants. In *Transplant Production in the 21st Century* (pp. 108-113). Springer Netherlands.
27. Favela, C. E., Preciado, R. P., & Adalberto, B. (2006). *Manual para preparar soluciones nutritivas*. México: UAAAN.
28. Ferrufino, N., Arévalo, G., Flores, H., & Barahona, U. (2006). Determinación de la concentración de la solución nutritiva para crecimiento y producción de lechuga var. Verónica en hidroponía. *Revista Ceiba*, 47(1-2):51-67.
29. Folta, K. M., & Maruhnich, S. A. (2007). Green light: a signal to slow down or stop. *Journal of Experimental Botany*, 58(12), 3099-3111.
30. Gonzalías, Y. R., & Lasso, E. R. (2016). Desarrollo de un sistema de iluminación artificial LED para cultivos en interiores-Vertical Farming (VF). *Informador técnico*, 80(2), 111-120.
31. Goto, E. (2015). Production of Pharmaceuticals in a Specially Designed Plant Factory. In *Plant factory: an indoor vertical farming system for efficient quality food production* (pp. 193-200). Academic Press.
32. Hasan, M., Bashir, T., Ghosh, R., Lee, S. K., & Bae, H. (2017). An overview of LEDs' effects on the production of bioactive compounds and crop quality. *Molecules*, 22(9), 1420.
33. Heo, J. W., Kang, D. H., Bang, H. S., Hong, S. G., Chun, C. H., & Kang, K. K. (2012). Early growth, pigmentation, protein content, and phenylalanine ammonia-lyase activity of red curled lettuces grown under different lighting conditions. *Korean Journal of Horticultural Science and Technology*, 30(1), 6-12.
34. Hernández, R., & Kubota, C. (2016). Physiological responses of cucumber seedling under different blue and red photon flux ratios using LEDs. *Environmental and Experimental Botany*, 121, 66-74.
35. Hernández-Cuevas R., Rodríguez-Fuentes, H., Luna-Maldonado. A. I., Rojas-Molina, R., & Rodríguez-Ortiz, J. C. Caracterización de arreglos de luces LED como fuentes de iluminación para producción de plántula de *Lactuca sativa* L. en un sistema hidropónico en ambiente controlado. *Scientia Agricolis Vita*, 80-87.
36. Hohl, U., Neubert, B., Pforte, H., Schonhof, I., & Böhm, H. (2001). Flavonoid concentrations in the inner leaves of head lettuce genotypes. *European Food Research and Technology*, 213(3), 205-211.
37. Hu, M. C., Chen, Y. H., & Huang, L. C. (2014). A sustainable vegetable supply chain using plant factories in Taiwanese markets: A Nash–Cournot model. *International Journal of Production Economics*, 152, 49-56.
38. Hunter, D. C., & Burritt, D. J. (2004). Light quality influences adventitious shoot production from cotyledon explants of lettuce (*Lactuca sativa* L.). *In Vitro Cellular and Developmental Biology-Plant*, 40(2), 215-220.
39. Inada, K., & Yasumoto, Y. (1989). Effects of light quality, daylength and periodic temperature variation on the growth of lettuce and radish plants. *Japanese Journal of Crop Science*, 58(4), 689-694.
40. InfoStat.(2017). InfoStat versión 2017. Recuperado de <http://www.infostat.com.ar/index.php?mod=page&id=46>.

41. Jaques, H. C., & Hernández, M. J. L. (2005). Valoración productiva de lechuga hidropónica con la técnica de película de nutrientes (NFT). *Naturaleza y Desarrollo*, 3, 11-16.
42. Johkan, M., Shoji, K., Goto, F., Hahida, S. N., & Yoshihara, T. (2012). Effect of green light wavelength and intensity on photomorphogenesis and photosynthesis in *Lactuca sativa*. *Environmental and Experimental Botany*, 75, 128-133.
43. Johkan, M., Shoji, K., Goto, F., Hashida, S. N., & Yoshihara, T. (2010). Blue light-emitting diode light irradiation of seedlings improves seedling quality and growth after transplanting in red leaf lettuce. *HortScience*, 45(12), 1809-1814.
44. Juárez-López, P., Bugarin-Montoya, R., Castro-Brindis, R., Sánchez-Monteon, A. L., Cruz-Crespo, E., Juárez-Rosete, C. R., Alejo-Santiago, G., & Balois Morales, R. (2011). Estructuras utilizadas en la agricultura protegida. *Revista Fuente*, 3(8):21-27.
45. Kang, J. H., KrishnaKumar, S., Atulba, S. L. S., Jeong, B. R., & Hwang, S. J. (2013). Light intensity and photoperiod influence the growth and development of hydroponically grown leaf lettuce in a closed-type plant factory system. *Horticulture, Environment and Biotechnology*, 54, 501-509.
46. Kim, H. H., Goins, G. D., Wheeler, R. M., & Sager, J. C. (2004). Green-light supplementation for enhanced lettuce growth under red-and blue-light-emitting diodes. *HortScience*, 39(7), 1617-1622.
47. Kitaya, Y., Niu, G., Kozai, T., & Ohashi, M. (1998). Photosynthetic photon flux, photoperiod, and CO₂ concentration affect growth and morphology of lettuce plug transplants. *HortScience*, 33, 988-991.
48. Kobayashi, K., Amore, T., & Lazaro, M. (2013). Light-emitting diodes (LEDs) for miniature hydroponic lettuce. *Optics and Photonics Journal*, 3(01), 74.
49. Kozai T., Ohyama K., Chun C. (2006). Commercialized closed systems with artificial lighting for plant production. *Acta Horticulturae*, 711, 61-70.
50. Kozai, T. (2007). Propagation, grafting and transplant production in closed systems with artificial lighting for commercialization in Japan. *Propagation of Ornamental Plants*, 7, 145-149.
51. Kozai, T. (2013). Resource use efficiency of closed plant production system with artificial light: Concept, estimation and application to plant factory. *Proceedings of the Japan Academy. Series B, Physical and Biological Sciences*, 89, 447.
52. Kozai, T., Niu, G., & Takagaki, M. (Eds.). (2015). *Plant factory: an indoor vertical farming system for efficient quality food production*. Academic Press.
53. Lee, J. G., Choi, C. S., Jang, Y. A., Jang, S. W., Lee, S. G., & Um, Y. C. (2013). Effects of air temperature and air flow rate control on the tipburn occurrence of leaf lettuce in a closed-type plant factory system. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 54(4), 303-310.
54. Lee, Y. B., & Park, M. H. (1999, August). Effects of CO₂ concentration, light intensity and nutrient level on growth of leaf lettuce in a plant factory. In *International Symposium on Growing Media and Hydroponics 548* (pp. 377-384).
55. Lefsrud, M. G., Kopsell, D. A., & Sams, C. E. (2008). Irradiance from distinct wavelength light-emitting diodes affect secondary metabolites in kale. *HortScience*, 43(7), 2243-2244.

56. Li, H., Tang, C., Xu, Z., Liu, X., & Han, X. (2012). Effects of different light sources on the growth of non-heading Chinese cabbage (*Brassica campestris* L.). *Journal of Agricultural Science*, 4(4), 262-273.
57. Li, Q., & Kubota, C. (2009). Effects of supplemental light quality on growth and phytochemicals of baby leaf lettuce. *Environmental and Experimental Botany*, 67(1), 59-64.
58. Lin, K. H., Huang, M. Y., Huang, W. D., Hsu, M. H., Yang, Z. W., & Yang, C. M. (2013). The effects of red, blue, and white light-emitting diodes on the growth, development, and edible quality of hydroponically grown lettuce (*Lactuca sativa* L. var. capitata). *Scientia Horticulturae*, 150, 86-91.
59. Llorach, R., Martínez-Sánchez, A., Tomás-Barberán, F. A., Gil, M. I., & Ferreres, F. (2008). Characterisation of polyphenols and antioxidant properties of five lettuce varieties and escarole. *Food Chemistry*, 108(3), 1028-1038.
60. Luna Riquelme, M. *Influencia de los factores pre y postcosecha en la calidad de la lechuga IV Gama* (Doctoral dissertation, Universidad de Murcia).
61. Magalhães, A. G. (2006). *Caracterização de genótipos de alface (Lactuca sativa L.) em cultivo hidropônico sob diferentes valores de condutividade elétrica da solução nutritiva* (Tesis Doctoral). Universidad Federal Rural de Pernambuco, Brasil.
62. Maroto Borrego, J. V., Gómez, A. M., & Baixauli Soña, C. (2000). *La lechuga y la escarola*. México: Mundi-Prensa.
63. Mizuno, T., Amaki, W., & Watanabe, H. (2011). Effects of monochromatic light irradiation by LED on the growth and anthocyanin contents in leaves of cabbage seedlings. *Acta Horticulturae*, 907, 179-184.
64. Moon, S. M., Kwon, S. Y., & Lim, J. H. (2014). Minimization of Temperature Ranges between the Top and Bottom of an Air Flow Controlling Device through Hybrid Control in a Plant Factory. *The Scientific World Journal*, 2014, 1-7.
65. Morard, P., Lacoste, L., & Silvestre, J. (2000). Effect of oxygen deficiency on uptake of water and mineral nutrients by tomato plants in soilless culture. *Journal of Plant Nutrition*, 23, 1063-1078.
66. Morewane, M. B. (2014). Effects of LED spectrum combinations on the absorption of mineral elements of hydroponic lettuce. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 34(5), 1394-1397.
67. Morrow, R. C. (2008). LED lighting in horticulture. *HortScience*, 43(7), 1947-1950.
68. Niño-Medina, G., Diego Romo-Longoria, J., Valentina Ramirez-Gonzalez, I., Oziel Martinez-Reyna, O., & Urias-Orona, V. (2017). Phenolic Content and Antioxidant Capacity Level in Commercial Mexican Lager Beers. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 75(2), 156-158.
69. Ohyama, K., Yoshinaga, K., & Kozai, T. (2000). Energy and mass balance of a closed-type transplant production system (part 2). Water balance. *Journal of Society of High Technology in Agriculture*, 12, 217-224.
70. Olivares, S. E. (1994). Paquete estadístico de diseños experimentales (programa de cómputo) versión 2.5. *Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León. Marín, NL, México*.
71. Park, G. Y., Park, E. J., Hwang, J. S., & Jeong, R. V. (2012). Light source and CO₂ concentration affect growth and anthocyanin content of lettuce under

- controlled environment. *Journal Horticulture, Environment and Biotechnology*, 53, 460-466.
72. Pérez Grajales, M., Grajales, M. P., Sánchez, F. M., & Lomelí, A. P. (1998). *Mejoramiento Genético de Hortalizas*. México: UACH.
 73. Poorter H., & Pérez-Soba M. (2003). The Earth system: biological and ecological dimensions of global environmental change. *Wiley*, 2, 489–496.
 74. Prieto, D. (2008). Riego con aguas salinas y aguas de drenaje, control e impacto de salinidad. *Jornadas sobre “Ambiente y riego: modernización y ambientalidad”, La antigua, Guatemala. Red de riegos. CYTED y AECL*.
 75. Rakić, S., Petrović, S., Kukić, J., Jadranin, M., Tešević, V., Povrenović, D., & Šiler-Marinković, S. (2007). Influence of thermal treatment on phenolic compounds and antioxidant properties of oak acorns from Serbia. *Food Chemistry*, 104(2), 830-834.
 76. Reséndiz, M., Aguilar, J., & Luévano, A. (2011). Características de la agricultura protegida y su entorno en México. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 15, 763-774.
 77. Rodríguez, D., la Rosa, A., Rojas, M. H., & Gutiérrez, M. F. (2002). *Manual práctico de hidroponía*. Perú: Universidad Agraria la Molina.
 78. Rodríguez, H. & Rodríguez Absi, J. (2015). *Métodos de análisis de suelos y plantas: criterios de interpretación*. México: Trillas S.A. de C.V.
 79. Rodríguez, H., Rodríguez, J. C., Vidales, J. A. & Luna, A. I. (2016). *Cultivo hidropónico de Liliun (Azucena): para flor de corte y en maceta*. México: Trillas S.A. de C.V.
 80. Rodríguez-Fuentes, H., Rodríguez-Absi, J., Almaguer-Sierra, P. & Rodríguez-Ortiz, J. C. (2011). *Cultivo hidropónico del Nopal*. México: Trillas S.A. de C.V.
 81. Samuolienė, G., Brazaitytė, A., Sirtautas, R., Viršilė, A., Sakalauskaitė, J., Sakalauskienė, S., & Duchovskis, P. (2013). LED illumination affects bioactive compounds in romaine baby leaf lettuce. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 93(13), 3286-3291.
 82. Samuolienė, G., Sirtautas, R., Brazaitytė, A., & Duchovskis, P. (2012). LED lighting and seasonality effects antioxidant properties of baby leaf lettuce. *Food Chemistry*, 134(3), 1494-1499.
 83. Samuolienė, G., Urbonavičiūtė, A., Duchovskis, P., Bliznikas, Z., Vitta, P., & Žukauskas, A. (2009). Decrease in nitrate concentration in leafy vegetables under a solid-state illuminator. *HortScience*, 44(7), 1857-1860.
 84. Sancho, H. (1999). Curvas de absorción de nutrientes: importancia y uso en los programas de fertilización. *Informaciones Agronómicas*, 36, 11-13.
 85. Savvas, D. & H.C. Passam. (2002). *Hydroponic production of vegetable and ornamentals*. Greece. Embryo Publications.
 86. Shimizu, H., Saito, Y., Nakashima, H., Miyasaka, J., & Ohdoi, K. (2011). Light environment optimization for lettuce growth in plant factory. *IFAC Proceedings Volumes*, 44(1), 605-609.
 87. Shin, Y. S., Lee, M. J., Lee, E. S., Ahn, J. H., Lim, J. H., Kim, H. J., ... & Chai, J. H. (2012). Effect of LEDs (light emitting diodes) irradiation on growth and mineral absorption of lettuce (*Lactuca sativa* L. 'Lollo Rosa'). *Protected Horticulture and Plant Factory*, 21(3), 180-185.
 88. SIAP (2014). Cierre de producción agrícola. Recuperado de www.siap.gob.mx/

89. Sirtautas, R., Samouline, G., Brazaityte, A., ShaKalauskaite, J., Shakalauskiene, S., Virsile, A., Jankau-skiene, J., Vastakaite, V., & Duchovskis, P. (2012). Impact of CO₂ on quality of baby lettuce grown under optimized light spectrum. *Journal Acta Scientiarum Polonorum Hortorum Cultus*, 13, 109-118.
90. Son, K. H., & Oh, M. M. (2013). Leaf shape, growth, and antioxidant phenolic compounds of two lettuce cultivars grown under various combinations of blue and red light-emitting diodes. *HortScience*, 48(8), 988-995.
91. Sonneveld, C., & Straver, N. (1999). Nutrient solutions for vegetables and flower grow in water or substrates. Serie: Voedingsoplossingen Glastuinbouw (Netherlands).
92. Steiner, A. A. (1968). Soilles culture. In: Proceedings of the 6th Colloquium of the International Potash Institute (324-341). Italy.
93. Stutte, G. W., Edney, S., & Skerritt, T. (2009). Photoregulation of bioprotectant content of red leaf lettuce with light-emitting diodes. *HortScience*, 44(1), 79-82.
94. Tarakanov, I., Yakovleva, O., Konovalova, I., Paliutina, G., & Anisimov, A. (2012, October). Light-emitting diodes: on the way to combinatorial lighting technologies for basic research and crop production. In *VII International Symposium on Light in Horticultural Systems 956* (pp. 171-178).
95. Thompson, H. C., Langhans, R. W., Both, A. J., & Albright, L. D. (1998). Shoot and root temperature effects on lettuce growth in a floating hydroponic system. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 123, 361-364.
96. Urrestarazu G. M. (2004). *Tratado de cultivo sin suelo*. España: Mundi-Prensa.
97. Vázquez-Ybarra, J. A., Peña-Valdivia, C. B., Trejo, C., Villegas-Bastida, A., Benedicto-Valdéz, S., & Sánchez-García, P. (2015). Promoción del crecimiento de plantas de lechuga (*Lactuca sativa* L.) con dosis subletales de ozono aplicadas al medio de cultivo. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 38(4), 405-413.
98. Vestergaard, B. (1984). Oxygen supply to the roots in different hydroponic systems. In *6. International Congress on Soilless Culture. Lunteren (Netherlands). 29 Apr-5 May 1984*.
99. Wang, J., Lu, W., Tong, Y., & Yang, Q. (2016). Leaf morphology, photosynthetic performance, chlorophyll fluorescence, stomatal development of lettuce (*Lactuca sativa* L.) exposed to different ratios of red light to blue light. *Frontiers in Plant Science*, 7, 250.
100. Wang, S. Y. (2006). Effect of pre-harvest conditions on antioxidant capacity in fruits. *Journal Acta Horticulturae*, 712, 299-306.
101. Weiguo, F., Pingping, L., Yanyou, W., & Jianjian, T. (2012). Effects of different light intensities on anti-oxidative enzyme activity, quality and biomass in lettuce. *Horticultural Science*, 39(3), 129-134.
102. Wheeler, R. M., Sager, J. C., Goins, G. D., & Kim, H. H. (2004, March). A comparison of growth and photosynthetic characteristics of lettuce grown under red and blue light-emitting diodes (LEDs) with and without supplemental green LEDs. In *VII International Symposium on Protected Cultivation in Mild Winter Climates: Production, Pest Management and Global Competition 659* (pp. 467-475).
103. Yokoi, S., Kozai, T., Hasegawa, T., Chun, C., & Kubota, C. (2005). CO₂ and water Utilization efficiencies of a closed transplant production system as affected by leaf area index of tomato [*Lycopersicon esculentum*] seedling

- populations and the number of air exchanges. *Journal of Society of High Technology in Agriculture (Japan)*.
104. Yokoi, S., Kozai, T., Ohyama, K., Hasegawa, T., Chun, C., & Kubota, C. (2003). Effects of leaf area index of tomato seedling populations on energy utilization efficiencies in a closed transplant production system. *Journal of Society of High Technology in Agriculture (Japan)*.
 105. Yoon, C. G., & Choi, H. K. (2011). A study on the various light source radiation conditions and use of LED illumination for plant factory. *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, 25, 14-22.
 106. Yorio, N. C., Goins, G. D., Kagie, H. R., Wheeler, R. M., & Sager, J. C. (2001). Improving spinach, radish, and lettuce growth under red light-emitting diodes (LEDs) with blue light supplementation. *HortScience*, 36(2), 380-383.
 107. Yoshinaga, K., Ohyama, K., & Kozai, T. (2000). Energy and mass balance of a closed-type transplant production system (Part 3). Carbon dioxide balance. *Journal of Society of High Technology in Agriculture*, 12, 225-231.
 108. Zhang, T., & Folta, K. M. (2012). Green light signaling and adaptive response. *Journal Plant Signaling & Behavior*, 7, 1-4.
 109. 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. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 11(2), 33-40.
 110. Žukauskas, A., Bliznikas, Z., Breivė, K., Novičkovas, A., Samuolienė, G., Urbonavičiūtė, A., Brazaitytė, A., Jankauskienė, J. & Duchovskis, P. (2011). Effect of supplementary pre-harvest LED lighting on the antioxidant properties of lettuce cultivars. *Acta Horticulturae*, 907, 87–90.

8. APÉNDICE

- A 1. Código de programación para el monitoreo, registro y almacenamiento de variables ambientales: temperatura, humedad relativa, concentración de CO₂ en el aire e intensidad de luz.

```
#include <LiquidCrystal.h>
#include <DHT.h> //cargamos la librería DHT
#include <Wire.h>
#include <Digital_Light_TSL2561.h>
#define DHTPIN 2 //Seleccionamos el pin en el que se //conectará el sensor
#define DHTTYPE DHT11 //Se selecciona el DHT11 (hay //otros DHT)
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE); //Se inicia una variable que será usada por Arduino para
comunicarse con el sensor
#define SensorPin A5 //pH meter Analog output to Arduino Analog Input 0
#define Offset 0//deviation compensate
#define LED 13
#define samplingInterval 20
#define printInterval 800
#define ArrayLenth 40 //times of collection
#define MG_PIN (7) //pin analogico al arduino
#define DC_GAIN (1) //ganancia del amplificador
#define READ_SAMPLE_INTERVAL (50) // cuantas muestras se tomarán
#define READ_SAMPLE_TIMES (20) // definir intervalo entre cada muestra
#define ZERO_POINT_VOLTAGE (0.220) // define la salida del sensor en voltios cuando
la concentración de CO2 es de 400 ppm
#define REACTION_VOLTAGE (0.020) //define la caída de tensión cuando se mueve el
sensor a 1000 ppm
float CO2Curve[3] = {2.602,ZERO_POINT_VOLTAGE,(REACTION_VOLTAGE/(2.602-3))};
//dos puntos se toman de la curva.
//con estos dos puntos, se forma una línea que es
//aproximadamente equivalente' a la curva original.
//data format:{ x, y, slope}; point1: (lg400, 0.324), point2: (lg4000, 0.280)
//slope = ( reaction voltage ) / (log400 -log1000)
int pHArray[ArrayLenth]; //Store the average value of the sensor feedback
int pHArrayIndex=0;
// initialize the library by providing the nuber of pins to it
LiquidCrystal lcd(8,9,4,5,6,7);
int a;
void setup() {
  lcd.begin(16,2);
  dht.begin(); //Se inicia el sensor
  // set cursor position to start of first line on the LCD
  Wire.begin();
  TSL2561.init();
```

```

Serial.begin(9600);
  Serial.println("CLEARDATA");
  Serial.println("LABEL,Hora actual,CO2,pH,Humedad,Temperatura,Luminosidad");
}
int prueba dato = 100;
void loop(void)
{
  float percentage;
  float volts;
  volts = MGRRead(MG_PIN);
// lectura del sensor
percentage=9241.1*volts - 2826;
  lcd.clear();
  lcd.print("CO2:");
  lcd.setCursor(0,1);
  if (percentage == -1) {
  lcd.print( "<400" );
  } else {
  lcd.print(percentage);
  }
  lcd.print( " ppm" );
  delay(2000);
  static unsigned long samplingTime = millis();
  static unsigned long printTime = millis();
  static float pHValue,voltage;
  if(millis()-samplingTime > samplingInterval)
  {
    pHArray[pHArrayIndex++]=analogRead(SensorPin);
    if(pHArrayIndex==ArrayLenth)pHArrayIndex=0;
    voltage = avergearray(pHArray, ArrayLenth)*5.0/1024;
    pHValue = 3.5*voltage+Offset;
    samplingTime=millis();
  }
  if(millis() - printTime > printInterval) //Every 800 milliseconds, print a numerical, convert
the state of the LED indicator
  {
    lcd.clear();
    lcd.print("pH. :");lcd.print(pHValue);
    delay(2000);
    printTime=millis();
  }
  float h = dht.readHumidity(); //Se lee la humedad
  float t = dht.readTemperature(); //Se lee la temperatura
  lcd.setCursor(0,0);
  //text to print
  lcd.print("Humedad :");lcd.print(h);
  // set cursor position to start of next line
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print("Temp. :");lcd.print(t);
  delay(2000); //Se espera 2 segundos para seguir leyendo //datos
  lcd.clear();

```

```

lcd.print("Luminosidad :");
lcd.setCursor(0,1);
a=TSL2561.readVisibleLux();
lcd.print(a);
delay(2000);
//percentage =100;
Serial.print("DATA,TIME,");
Serial.print(pruebadato);
Serial.print(",");
Serial.print(pHValue);
Serial.print(",");
Serial.print(h);
Serial.print(",");
Serial.print(t);
Serial.print(",");
Serial.println(a);
for (int i = 0; i < 900; i++) {
    delay(1000);
}
}
double avergearray(int* arr, int number){
    int i;
    int max,min;
    double avg;
    long amount=0;
    if(number<=0){
        return 0;
    }
    if(number<5){ //less than 5, calculated directly statistics
        for(i=0;i<number;i++){
            amount+=arr[i];
        }
        avg = amount/number;
        return avg;
    }else{
        if(arr[0]<arr[1]){
            min = arr[0];max=arr[1];
        }
        else{
            min=arr[1];max=arr[0];
        }
        for(i=2;i<number;i++){
            if(arr[i]<min){
                amount+=min; //arr<min
                min=arr[i];
            }else {
                if(arr[i]>max){
                    amount+=max; //arr>max
                    max=arr[i];
                }else{
                    amount+=arr[i]; //min<=arr<=max
                }
            }
        }
    }
}

```



```

    }
  }//if
} //for
  avg = (double)amount/(number-2);
} //if
return avg;
}
/***** MGRead *****/
Entrada: mg_pin - canal analógico
Salida: salida del SEN-000007
Observaciones: Esta función lee la salida del SEN-000007
*****/
float MGRead(int mg_pin)
{
  int i;
  float v=0;
  for (i=0;i<READ_SAMPLE_TIMES;i++) {
    v += analogRead(mg_pin);
    delay(100);
  }
  v = (v/READ_SAMPLE_TIMES) *4.87/1024)-0.14 ;
  return v;
}
/***** MQGetPercentage *****/
Entrada: voltios - SEN-000007 de salida medido en voltios
pcurve - puntero a la curva de la salida de gas
salida: ppm del gas objetivo
Observaciones: Mediante el uso de la pendiente y un punto de la línea. La x (valor
logarítmico de ppm) e la línea podría derivarse si se proporciona y (salida de MG-811).
Como es una logarítmica de coordenadas, potencia de 10 se utiliza para convertir el
resultado a un valor no logarítmico.
*****/
int MGGetPercentage(float volts, float *pcurve)
{
  if ((volts/DC_GAIN )>=ZERO_POINT_VOLTAGE) {
    return -1;
  } else {
    return pow(10, ((volts/DC_GAIN)-pcurve[1])/pcurve[2]+pcurve[0]);
  }
}
}

```

A 2. Código de programación para el control automático de encendido/apagado del sistema de iluminación y bomba hidráulica.

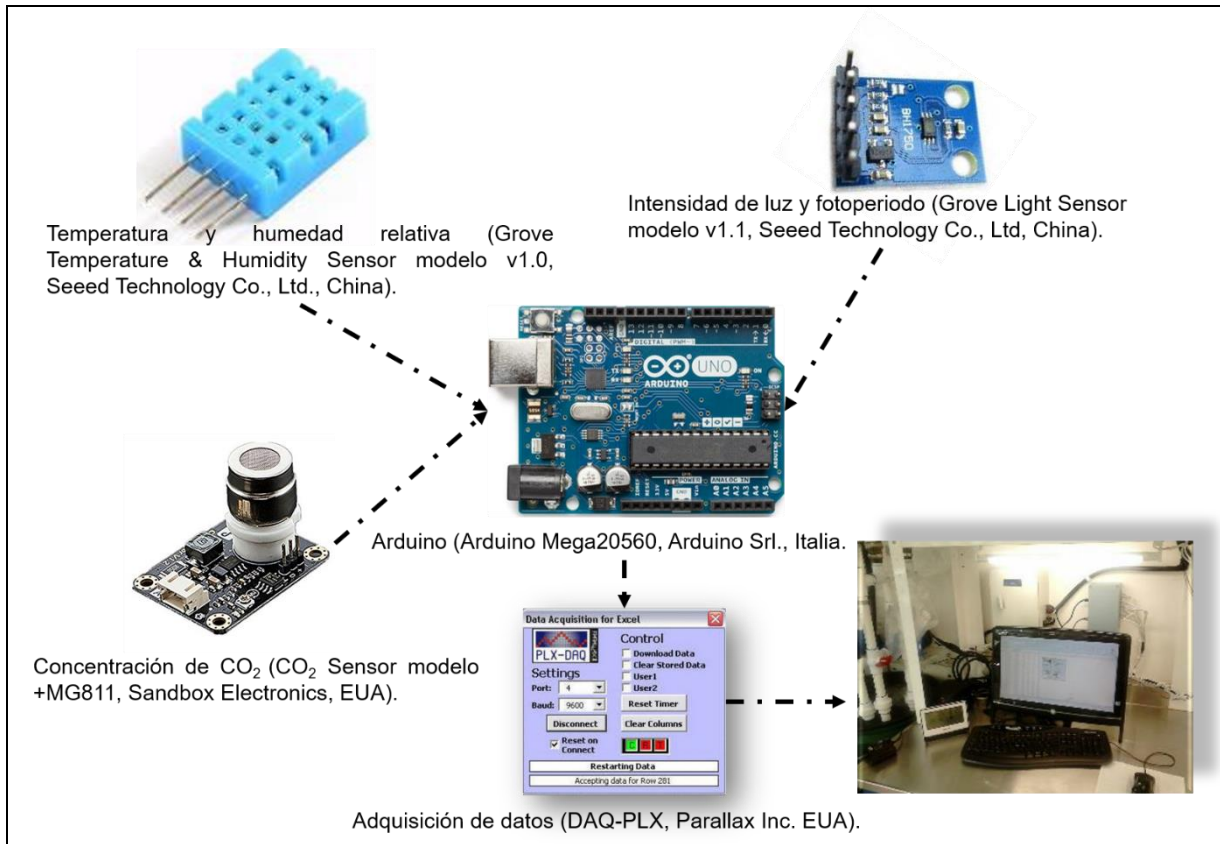
```
#include "Timer.h"
int bomba1=7;
int bomba2=6;
int luz3=5;
int luz2=4;
int luz1=3;
Timer t;
// Bomba 1
int minutos1=0;
int Ton1=2;
int Toff1=60;
int band1=0;
int aux1=0;
// Bomba2
int minutos2=0;
int Ton2=1;
int Toff2=1;
int band2=0;
int aux2=0;
//luz
int minutos3=0;
int Ton3=3600;
int Toff3=0;
int band3=0;
int aux3=0;
void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  int tickEvent = t.every(60000, doSomething);
  pinMode(2, OUTPUT);
  pinMode(3, OUTPUT);
  pinMode(4, OUTPUT);
  pinMode(5, OUTPUT);
  pinMode(6, OUTPUT);
  pinMode(7, OUTPUT);
  pinMode(8, OUTPUT);
  pinMode(9, OUTPUT);
  for(int i=2;i<10;i++){
    digitalWrite(i, LOW);
  }
}
void loop()
{
  t.update();
}
void doSomething()
{
  minutos1++;
  if(minutos1 < Ton1 && band1 == 0){digitalWrite(bomba1, LOW);aux1=minutos1;}
```

```

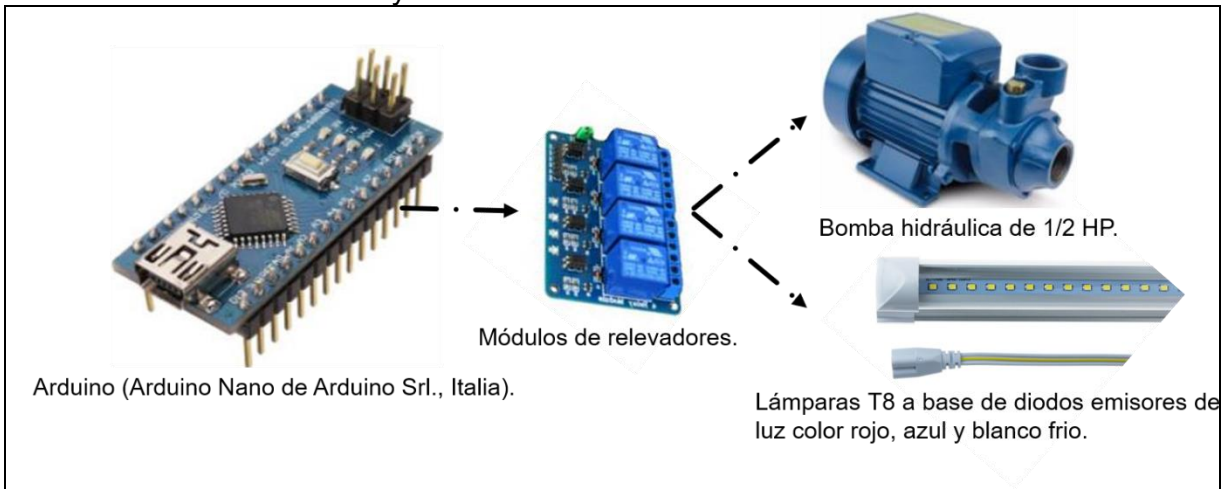
else {
    band1 = 1;
    if(minutos1 <(aux1+Toff1+1) && band1 == 1)digitalWrite(bomba1, HIGH);
    else{
        digitalWrite(bomba1 , LOW);
        minutos1=0;
        band1=0;
    }
}
minutos2++;
if(minutos2 < Ton2 && band2 == 0){digitalWrite(bomba2, LOW);aux2=minutos2;}
else {
    band2 = 1;
    if(minutos2 <(aux2+Toff2+1) && band2 == 1)digitalWrite(bomba2, HIGH);
    else{
        digitalWrite(bomba2 , LOW);
        minutos2=0;
        band2=0;
    }
}
minutos3++;
if(minutos3 < Ton3 && band3 == 0){digitalWrite(luz1, LOW);digitalWrite(luz2,
LOW);digitalWrite(luz3, LOW);aux3=minutos3;}
else {
    band3 = 1;
    if(minutos3 <(aux3+Toff3+1) && band3 == 1){digitalWrite(luz1,
HIGH);digitalWrite(luz2, HIGH);digitalWrite(luz3, HIGH);}
    else{
        digitalWrite(luz1 , LOW);digitalWrite(luz2, LOW);digitalWrite(luz3, LOW);
        minutos3=0;
        band3=0;
    }
}
}
}

```

A 3. Sensores y equipos utilizados para el sistema de monitoreo/almacenamiento de variables climáticas.



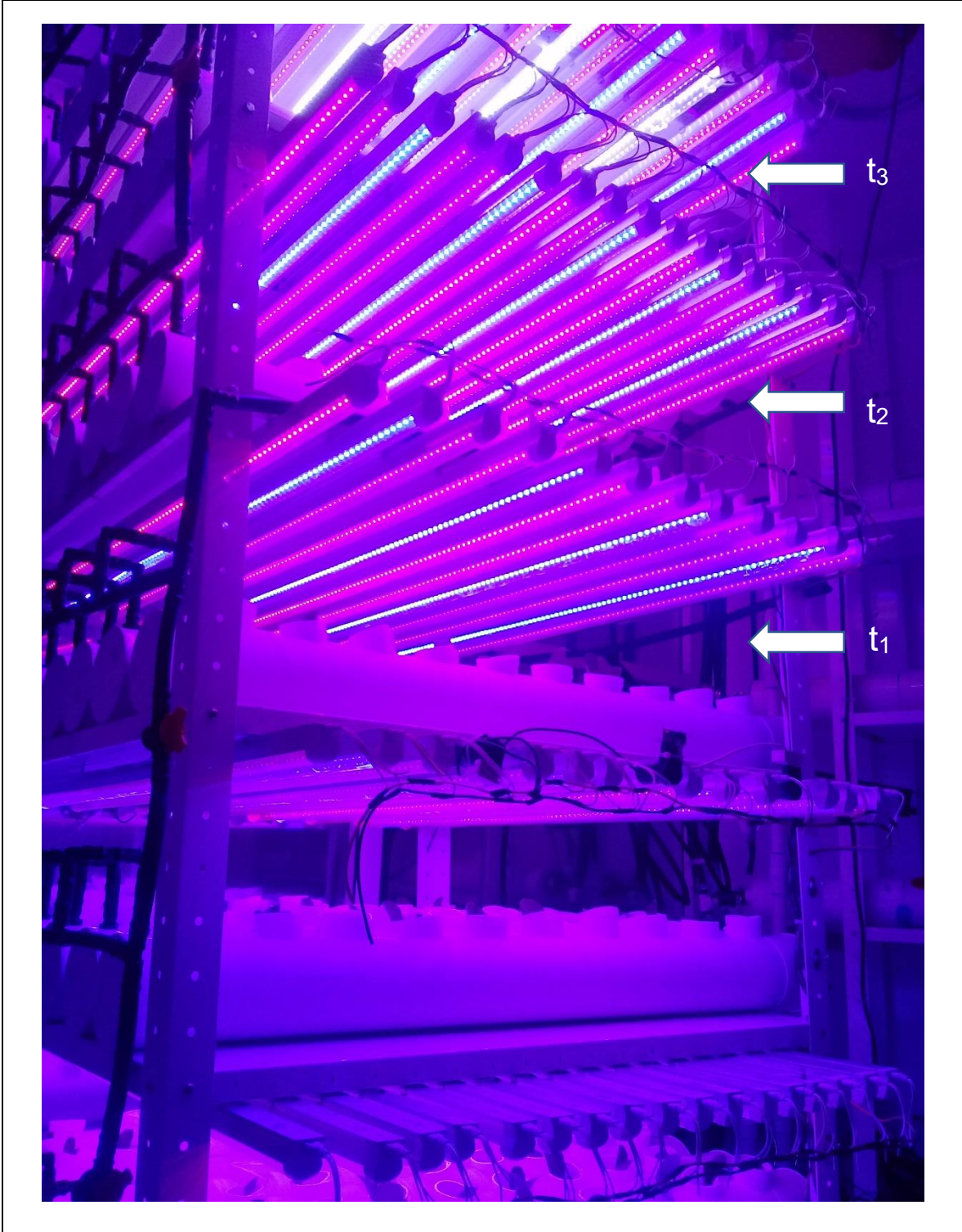
A 4. Equipos utilizados para el desarrollo del sistema de control de encendido/apagado de la bomba hidráulica y sistema de iluminación.



A 5. Sistema hidropónico tipo torre de 6 niveles para la producción de lechuga romana tipo baby bajo el SPFP.



A 6. Tratamientos de luz establecidos en el sistema hidropónico tipo torre para la producción de lechuga romana tipo baby bajo el SPFP.



A 7. Crecimiento de cultivo de lechuga romana tipo baby a los 8 DDT bajo el SPFP sujeto a el tratamiento de luz $t_3=224.47 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$.



A 8. Crecimiento de cultivo de lechuga romana tipo baby a los 16 DDT bajo tres tratamientos de intensidad de luz: $t_1=121.41$; $t_2=140.31$ y $t_3=224.47 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$.

