



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO®

Instituto Tecnológico de Tlajomulco



TESIS

**CULTIVO AEROPÓNICO DE CHILE HABANERO (*Capsicum chinense*)
CON LUZ LED Y EFECTO DE NANOPARTÍCULAS DE $MgFe_2O_4$**

QUE PRESENTA:

INGENIERA MARÍA DEL CARMEN DE LOERA HERNÁNDEZ

DIRECTOR DE TESIS:

DRA. MARTHA ALICIA RODRÍGUEZ MENDIOLA

CO-DIRECTOR DE TESIS:

DR. CARLOS ARIAS CASTRO

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRA EN CIENCIAS EN AGROBIOTECNOLOGÍA**

TLAJOMULCO DE ZÚÑIGA, JALISCO. SEPTIEMBRE, 2022

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Tecnológico de Tlajomulco en particular al programa de Maestría en Ciencias en Agrobiotecnología por permitirme el ingreso a este posgrado.

Al CONACYT, por la beca otorgada durante la realización de mis estudios de la maestría.

A mi directora de tesis la Dra. Martha Alicia Rodríguez Mendiola por haber compartido sus enseñanzas y la confianza de permitirme llevar este proyecto, por la amistad y los buenos consejos tanto de forma personal como profesional, también por sus desayunos, comidas y presentes.

A mi codirector de tesis el Dr. Carlos Arias Castro por todos los aprendizajes, aportaciones, amistad y consejos.

A mis asesores el Dr. Martin Eduardo Ávila Miranda por sus aportaciones en mis tutoriales.

Y la maestra Martha Elizabeth Dueñas Jaco por todas las enseñanzas y amistad.

A la Dra. Ana Velia por las aportaciones a este trabajo

A la Dra. Alejandra Mancilla por brindarme el apoyo y confianza para usar su equipo de HPLC.

DEDICATORIA

A Dios por mi existir

A mis padres por la educación y el apoyo

A mi hija por ser mi motor

A mi pareja por la compañía y el apoyo

ÍNDICE

Tabla de contenido

ÍNDICE	I
ÍNDICE DE CUADROS	VI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
CAPITULO I	1
1.1 MARCO TEÓRICO	3
1.1.2 Cultivo de chile habanero.....	3
1.1.2.1 Clasificación taxonómica de Capsicum chinense	3
1.1.3 Descripción botánica de Capsicum chinense	3
1.1.4 Etapas fenológicas del chile habanero.....	4
1.1.4.1 Siembra y germinación.....	4
1.1.4.2 Crecimiento de la plántula.....	5
1.1.4.3 Crecimiento vegetativo	5
1.1.4.4 Floración y fructificación.....	5
1.1.5 Capsaicinoides	6
1.1.5.1 Localización de la síntesis de capsaicinoides.....	6
1.1.5.2 Estructura química de los capsaicinoides.....	7
1.1.5.3 Metabolismo de los capsaicinoides	8
1.1.5.4 Regulación del contenido de capsaicinoides por factores ambientales y por desarrollo	10
1.1.6 Metabolitos secundarios presentes en los Capsicum	10
1.1.7 Técnicas utilizadas para la determinación de los distintos metabolitos secundarios	10
Capsaicinoides.....	10
1.1.8 Importancia económica del chile.....	11
1.1.9 Importaciones y exportaciones de chile habanero.....	12
1.1.10 Estados productores de chile habanero.....	12
1.1.11 Ciclos de producción de chile habanero	13
1.1.12 Sistemas de producción de chile habanero en 2020	14
1.1.12.1 Producción (toneladas) y precio de chile habanero.....	15

1.1.14 Manejo del cultivo de chile habanero.....	17
1.1.14.1 Requerimientos climáticos	17
1.1.14.2 Establecimiento del cultivo (INTAGRI 2022)	18
1.1.14.3 Medios de cultivo para la producción de chile habanero.....	19
1.1.16 Problemáticas de la agricultura convencional.....	22
1.1.17 Alternativas de producción	23
1.1.18 Agricultura vertical.....	23
1.1.19 Hidroponía.....	24
1.1.20 Aeroponía	24
1.1.21 Tecnologías de iluminación	27
1.1.22 Espectros utilizados en la agricultura vertical	27
1.1.23 La luz como fuente de energía.....	29
1.1.23.1 Fitocromos.....	31
1.1.23.2 Criptocromos.....	31
1.1.23.3 Fototropinas.....	32
1.1.23.4 UVR8.....	32
1.1.24 Nanotecnología.....	32
1.2 BIBLIOGRAFÍA	35
CAPÍTULO II	41
EL EFECTO DE DIFERENTES LONGITUDES DE ONDA EN EL DESARROLLO VEGETATIVO	41
RESUMEN.....	42
2.1 RESUMEN.....	43
INTRODUCCIÓN	44
2.2 INTRODUCCIÓN.....	45
2.3 OBJETIVO 1	47
2.3.1 Objetivos específicos.....	47
2.4 HIPÓTESIS	47
2.5 MATERIALES Y MÉTODOS	49
2.5.1 Ubicación.....	49
2.5.2 Material vegetal.....	49
2.5.3 Esterilización y siembra de material vegetal	49

2.5.4	Diseño de reactor aeropónico	49
2.5.5	Trasplante.....	50
2.5.6	Tratamientos de luz LED.....	50
2.5.7	Solución nutritiva	51
2.5.8	Variables fenológicas vegetativas de la planta	52
2.5.9	Variables anatómicas de la hoja	53
2.5.9.1	Número de estomas	54
2.5.9.2	Cortes anatómicos de la hoja.....	54
2.5.10	Determinación de clorofila	55
2.5.10.1	Espectrofotómetro.....	55
2.5.10.2	SPAD-502.....	55
2.5.11	Diseño experimental	56
2.6	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	58
2.6.1	Variables de crecimiento de la planta.....	58
2.6.1.1	Longitud de tallo	58
2.6.1.2	Diámetro de tallo	59
2.6.1.3	Longitud de la raíz	60
2.6.1.4	Número de hojas	61
2.6.2	Variables anatómicas de la hoja	62
2.6.2.1	Número de estomas	62
2.6.2.2	Cortes Anatómicos de las hojas	63
2.6.3	Determinación de clorofilas	65
2.6.3.1	Clorofilas totales	65
2.7	CONCLUSIONES	68
2.8	BIBLIOGRAFÍA	70
CAPÍTULO III.....	72	
EL EFECTO DE DIFERENTES IRRADIANCIAS DE LUZ LED BLANCA EN EL DESARROLLO VEGETATIVO Y GENERATIVO	72	
3.1 RESUMEN.....	74	
INTRODUCCIÓN	76	
3.2 INTRODUCCIÓN.....	77	
OBJETIVOS	E HIPÓTESIS	78

3.3 OBJETIVO 2	79
3.3.1 Objetivos específicos.....	79
3.4 HIPÓTESIS	79
3.5 MATERIALES Y MÉTODOS	81
3.5.1 Ubicación.....	81
3.5.2 Material vegetal.....	81
3.5.3 Esterilización y siembra material vegetal.....	81
3.5.4 Diseño de reactor aeropónico	82
3.5.5 Trasplante.....	82
3.5.6 Establecimiento de los tratamientos de luz LED blanca	82
3.5.7 Solución nutritiva.....	83
3.5.8 Estimación del Área foliar	84
3.5.9 Variables fenológicas vegetativas de la planta	85
3.5.10 Variables fenológicas generativas de la planta.....	86
3.5.11 Abscisión de flores	86
3.5.12 Variables del fruto.....	86
3.5.13 Determinación de contenido de clorofilas	87
3.5.13.1 SPAD-502.....	87
3.5.14 Extracción y cuantificación de capsaicina y dihidrocapsaicina.....	87
3.5.14.1 Curva de calibración de capsaicina y dihidrocapsaicina	87
3.5.14.2 Extracción de capsaicina y dihidrocapsaicina	89
3.5.14.3 Cuantificación de capsaicinas y dihidrocapsaicina.....	89
3.5.15 Extracción y cuantificación de carotenoides totales.....	90
3.6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	93
3.6.1 Variables fenológicas vegetativas de la planta (raíz y tallo).....	93
3.6.2 Variables fenológicas vegetativas de la planta (área foliar y hojas)	95
3.6.2.1 Área foliar.....	95
3.6.2.2. Hojas.....	95
3.6.3 Variables fenológicas generativas de la planta (flor)	97
3.6.4 Fechas de floración	97
3.6.5 Abscisión de flores	98
3.6.6 Variables del fruto	99

3.6.7 Contenido de clorofilas	101
3.6.8 Determinación de Capsaicina, dihidrocapsaicina y carotenos totales.....	102
3.6.9 Consumo de agua	103
3.7 CONCLUSIONES	106
3.8 BIBLIOGRAFÍA	108
CAPÍTULO IIII	111
EFFECTO DE NANOPARTÍCULAS MgFe ₂ O ₄ EN LA GERMINACIÓN <i>IN VITRO</i>	111
4.1 RESUMEN.....	113
INTRODUCCIÓN	114
4.2 INTRODUCCIÓN.....	115
4.3 OBJETIVO 3	116
4.3.1 Objetivos específicos.....	116
4.4 HIPÓTESIS	116
4.5 MATERIALES Y MÉTODOS	118
4.6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	122
4.7 CONCLUSIONES.....	127
4.8 BIBLIOGRAFÍA	129

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.1 Clasificación taxonómica de <i>Capsicum chinense</i>	3
Cuadro 1.2 Hectáreas cosechadas de chile habanero en los estados productores de México, clasificado por el tipo de tecnología (cielo abierto, macro tunel, malla sombra e invernadero).	14
Cuadro 1.3 Producción, rendimiento, precio medio rural y valor de la producción de chile habanero en los estados productores de México	16
Cuadro 1.4 Consumo hídrico por planta en tres sistemas de producción de chile habanero.	18
Cuadro 1.5 Solución nutritiva para chile habanero.	19
Cuadro 1.6 Concentración de micronutrientes en la solución nutritiva durante todo el ciclo del cultivo.	20
Cuadro 1.7 Régimen nutrimental alternativo para la producción de chile habanero en sistema hidropónico e invernadero.	20
Cuadro 1.8 Análisis de Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas de la cadena productiva del Chile Habanero.....	21
Cuadro 1.9 Beneficios de la agricultura vertical de interior.	24
Cuadro 1.10 Agricultura de interior de alta tecnología. Comparación de los sistemas hidropónicos y aeropónicos.	26
Cuadro 2.1 Tratamientos aplicados con distintas longitudes de onda de luz LED a plantas en el sistema aeropónico.....	51
Cuadro 2.2 Solución nutritiva hidropónica para el crecimiento y desarrollo de plantas de chile habanero.	51
Cuadro 2.3 Nutrientes utilizados en unidades de mEq y su equivalencia en gramos por litro	52
Cuadro 2.4 Efecto de las diferentes longitudes de onda de luz LED (azul, rojo, blanco y mix) en el número de estomas en un área de 0.7mm x 0.5mm. Letras diferentes significan tratamientos con diferencia significativa de acuerdo al método de comparación de medias tuckey ANOVA ($p < 0.05$).	63
Cuadro 3.1 Solución nutritiva hidropónica para el crecimiento y desarrollo de plantas de chile habanero.	83
Cuadro 3.2. Nutrientes utilizados en unidades de mEq y su equivalencia en gramos por litro.	83
Cuadro 3.3 Fechas de floración en las irradiancias 35,100 y 250 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$	86
Cuadro 3.4. Diluciones para los estándares de capsaicina, dihidrocapsaicina y metanol.....	88
Cuadro 3.5 Características de la columna y de metodología para cuantificación de capsaicina y dihidrocapsaicina.	90
Cuadro 3.6 Efecto de las diferentes irradiancias de luz LED blanca (35,100 y 250 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) en las fechas de floración.	98

Cuadro 3.7 Efecto de las diferentes irradiancias de luz LED blanca (35,100 y 250 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) en el porcentaje de abscisión de flores..... 99

Cuadro 3.8 Características de frutos obtenidos en con luz LED blanca con una irradiancia de 250 $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ en sistema aeroponico 100

Cuadro 3.9 Efecto de la irradiancia de 250 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ de luz LED blanca, en el contenido de capsaicinoides y carotenos totales en tres frutos de chile habanero. 102

Cuadro 3.10 Consumo de agua de 7 plantas colocadas en reactor aeropónico, durante 4 meses. 103

Cuadro 4.1 Contenido de los diferentes tratamientos de nanopartículas FeMg_2O_4 aplicados en el medio MS en la siembra *in vitro*. 118

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.2 Etapas fenológicas del cultivo de chile. Fuente: CQM, 2015.....	5
Figura 1.3. Corte longitudinal de fruto de chile habanero mostrando la morfología del mismo, loculos (A), semillas (B), pericarpio (C) y placenta (D). Fuente: de auditoría propia.	7
Figura 1.4. Estructura química de los capsaicinoides más frecuentes en los frutos del género <i>Capsicum</i> (Estrada y colaboradores, 2000).	8
Figura 1.5 Ruta propuesta para la biosíntesis de los capsaicinoides en el género <i>Capsicum</i> . PAL, fenilalanina amonio liasa; Ca4H, ácido cinámico 4 hidroxilasa; Ca3H cumarato 3 hidroxilasa; COMT, ácido cafeico O-metiltransferasa; pAMT, presunta aminotransferasa de la vainillina; BCAT, aminotransferasa de los aminoácidos ramificados, lvdH α isovalerato deshidrogenasa; Kas β -cetoacil sintasa; ACL, proteína acarreadora de grupos acilo; FAT, tioesterasa; DST, desaturasa; CS capsaicinoide sintasa. La flecha punteada representa a reacciones por caracterizar. (Vázquez- Flota, <i>et al.</i> , 2007)	9
Figura 1.6 Productos elaborados a partir de capsaicina y otros metabolitos secundarios del chile habanero.....	11
Figura 1.7 Estados productores de chile habanero en México. Fuente: SIAP (2020).....	13
Figura 1.8 Ciclos agrícolas del cultivo de chile habanero en México. Fuente: SIAP (2020).	14
Figura 1.9 Diagrama de sistema aeropónico para chiles con baja presión. Imagen obtenida del Holandés picante.	25
Figura 1.10 Espectro de luz natural diurna (a), espectro de luz LED especial para la agricultura (b), espectro de luz LED de uso común (c). Fuente google imágenes.	28
Figura 1.11 Espectros de luz LED optimizados para cada etapa de desarrollo en la planta de la marca Kroptek, A) espectro KP-4, B) espectro KP-8, C) espectro KP-1, D) espectro KP-2, E) espectro KP-3.	29
Figura 1.12 Roles de la luz en la vida de una planta. Fuente: Berkovich, et al., 2017.	31
Figura 2.1 Variables fenológicas vegetativas de la planta.	53
Figura 2.2 Selección del área específica para realizar cortes transversales en la hoja.	54
Figura 2.3 Selección de hojas y macerado para determinación de clorofila.	55
Figura 2.4 Efecto de las diferentes longitudes de onda de luz LED (A=azul, R=rojo, B=blanco y M=mix) en la longitud del tallo, durante un periodo de ocho semanas. Letras diferentes significan tratamientos con diferencia significativa de acuerdo al método de comparación de medias Tuckey ANOVA ($p < 0.05$).	59
Figura 2.5 Efecto de los diferentes espectros de luz LED (A=azul, R=rojo, B=blanco y M=mix) en la diámetro del tallo durante un periodo de ocho semanas. Letras diferentes significan tratamientos con diferencia significativa de acuerdo al método de comparación de medias Tuckey ANOVA ($p < 0.05$).	60
Figura 2.6 Efecto de las diferentes longitudes de onda de luz LED (A=azul, R=rojo, B=blanco y M=mix) en la longitud de la raíz durante un periodo de ocho semanas. Letras diferentes significan tratamientos con diferencia significativa de acuerdo al método de comparación de medias Tuckey ANOVA ($p < 0.05$).	61

Figura 2.7 Efecto de las diferentes longitudes de onda de luz LED (A=azul, R=rojo, B=blanco y M=mix) en el número de hojas, durante un periodo de ocho semanas. Letras diferentes significan tratamientos con diferencia significativa de acuerdo al método de comparación de medias Tuckey ANOVA ($p < 0.05$). 62

Figura 2.8 Efecto de las diferentes longitudes de onda de luz LED (azul, rojo, blanco y mix) en el número de los estomas en el envés de las hojas de chile habanero..... 63

Figura 2.9 Cortes anatómicos de hojas de chile habanero, irradiadas con diferentes longitudes de onda de luz LED (a=azul, b=rojo, c=mix, d=blanco)..... 65

Figura 2.9 Clorofilas totales capturadas por el equipo de medición SPAD 502 (a), clorofilas totales determinadas por espectrofotometría (b). Letras diferentes significan tratamientos con diferencia significativa de acuerdo al método de comparación de medias Tuckey ANOVA ($p < 0.05$)..... 66

Figura 3.1 Variables fenológicas vegetativas de la planta. 85

Figura 3.2 Curva de calibración para (a) capsaicina y (b) dihidrocapsaicina, mediante cromatografía líquida de alta resolución con detector de arreglo de diodos (HPLC-PDA). $y =$ ecuación lineal, $R^2 =$ coeficiente de determinación. 89

Figura 3.3 Efecto de las diferentes irradiancias de luz LED blanca ($35, 100$ y $250 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) En la longitud de la raíz (a), longitud del tallo (b), y el diámetro de tallo (c) durante un periodo de ocho semanas. Letras diferentes significan tratamientos con diferencia significativa de acuerdo al método de comparación de medias tuckey ANOVA ($p < 0.05$). 94

Figura 3.4 Comparación de plantas en el desarrollo de raíz y tallo bajo los tratamientos de irradiancia de luz LED blanca ($35, 100$ y $250 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) 94

Figura 3.5 Efecto de las diferentes irradiancias de luz LED blanca ($35, 100$ y $250 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) en el área foliar. Letras diferentes significan tratamientos con diferencia significativa de acuerdo al método de comparación de medias Tuckey ANOVA ($p < 0.05$)..... 95

Figura 3.6 Efecto de las diferentes irradiancias de luz LED blanca ($35, 100$ y $250 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) en el diámetro de hoja (a), longitud de hoja (b) y número de hojas (c) durante un periodo de ocho semanas. Letras diferentes significan tratamientos con diferencia significativa de acuerdo al método de comparación de medias tuckey ANOVA ($p < 0.05$). 96

Figura 3.7 Comparación de plantas en el desarrollo de hojas y área foliar y tallo bajo los tratamientos de irradiancia de luz LED blanca ($35, 100$ y $250 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) 97

Figura 3.8 Efecto de las diferentes irradiancias de luz LED blanca ($35, 100$ y $250 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) en las variables diámetro de peciolo, longitud de peciolo, longitud de pétalo y diámetro de pétalo en plantas de chile habanero durante un periodo de ocho semanas. Letras diferentes significan tratamientos con diferencia significativa de acuerdo al método de comparación de medias Tuckey ANOVA ($p < 0.05$). 97

Figura 3.9 Frutos de chile habanero en etapa madura obtenidos bajo el tratamiento con la irradiancia de $250 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ de luz LED blanca. 101

Figura 3.10 Efecto de las diferentes irradiancias de luz LED blanca ($35, 100$ y $250 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) en la concentración de clorofilas durante un periodo de ocho semanas capturadas por el equipo SPAD-502.

Letras diferentes significan tratamientos con diferencia significativa de acuerdo al método de comparación de medias tuckey ANOVA ($p < 0.05$). 102

Figura 4.1 Diseño experimental con medio MS y diferentes concentraciones de $MgFe_2O_4$ 119

Figura 4.2 Efecto de la concentración de nanopartículas de $MgFe_2O_4$. en la germinación *in vitro* de semillas de *C. chinense* durante 29 días. Control medio MS sin nanopartículas, tratamientos: 2mg/L, 5mg/L, 10mg/L y 20mg/L..... 122

Figura 4.3 Efecto de la concentración de nanopartículas de $MgFe_2O_4$ en las características fenológicas de plantas cultivadas *in vitro* de *C. chinense*, evaluadas a los 26 y 69 después de la siembra en medio MS. Letras iguales no representan diferencias significativas, según la prueba de Duncan ($p \leq 0.05$). 124

Figura 4.4 Fotografías representativas del efecto de la concentración de nanopartículas de $MgFe_2O_4$ en el desarrollo de plantas cultivadas *in vitro* de *C. Chinense*, evaluadas a los 26 después de la siembra. a) Control medio MS sin nanopartículas. $MgFe_2O_4$ (mg/L): b) 2, c) 5, d) 10 y e) 20..... 125

CAPITULO I

MARCO TEÓRICO

1.1 MARCO TEÓRICO

1.1.2 Cultivo de chile habanero

1.1.2.1 Clasificación taxonómica de *Capsicum chinense*

La comisión nacional para conocimiento y uso de la biodiversidad (CONABIO, 2011), presentan la clasificación de chile habanero describiendo al reino y especie al que pertenece. (Cuadro 1)

Cuadro 1.1 Clasificación taxonómica de *Capsicum chinense*

Reino	Plantae
Subreino	<i>Trachebionta</i>
Superdivisión	<i>Spermatophyta</i>
División	<i>Magnoliophyta</i>
Clase	<i>Asteridae</i>
Subclase	<i>Dicotyledoneae</i>
Orden	<i>Solanales</i>
Familia	<i>Solanaceae</i>
Genero	<i>Capsicum</i>
Especie	<i>Capsicum chinense</i> Jacq.

Fuente: CONABIO, 2011.

1.1.3 Descripción botánica de *Capsicum chinense*

Es una planta de ciclo anual, su altura puede oscilar entre 75 y 120 centímetros (Tun, 2001). El tallo es grueso, erecto y robusto; con crecimiento semideterminado (fig.1D). Las hojas son simples, lisas, alternas y de forma lanceolada, de tamaño variable, lo mismo que

su color, el cual puede presentar diferentes tonos de verde, dependiendo de la variedad. Tiene una raíz principal de tipo pivotante, que profundiza de 0.40 a 1.20 metros, puede alcanzar longitudes mayores a los 2 metros (López, 2003).

La floración comienza cuando la planta se encuentra bien desarrollada. Las flores se presentan de forma individual o en grupos de dos o más en cada una de las axilas, y son blancas (fig. 1B). Su tamaño varía entre 1.5 y 2.5 centímetros de diámetro de la corola. El número de sépalos y pétalos es variable, de cinco a siete, aun dentro de la misma especie, lo mismo que la longitud del pedúnculo floral. El fruto es una baya poco carnosa y hueca; tiene entre tres y cuatro lóbulos (fig. 1C), las semillas (fig. 1A) se alojan en las placentas y son lisas y pequeñas, con testa de color café claro a oscuro, y su periodo de germinación varía entre ocho y quince días. Las plantas presentan en promedio hasta seis frutos por axila; éstos son de un tamaño entre 2 y 6 centímetros. El color es verde cuando son tiernos, y cuando están maduros pueden ser anaranjados, amarillos, rojos o cafés y su sabor siempre es picante, aunque el grado de picor depende del cultivo (Tun, 2001; Ayala, 2002; Soria, 2002).



Figura 1.1 Morfología de *Capsicum chinense*, donde se visualiza las semillas (A), flor (B), corte longitudinal del fruto (C) y planta completa de chile habanero (D).

1.1.4 Etapas fenológicas del chile habanero

El Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal describe a través de su guía de producción de chile las etapas fenológicas del chile habanero.

1.1.4.1 Siembra y germinación

El período de preemergencia varía entre 8 y 12 días, y es más rápido cuando la temperatura es mayor.

1.1.4.2 Crecimiento de la plántula

Luego del desarrollo de las hojas cotiledonales, inicia el crecimiento de las hojas verdaderas, que son alternas y más pequeñas que las hojas de una planta adulta. Posteriormente, el crecimiento es más lento en la parte aérea, mientras la planta sigue desarrollando el sistema radicular, es decir, alargando y profundizando la raíz pivotante y empezando a producir algunas raíces secundarias laterales.

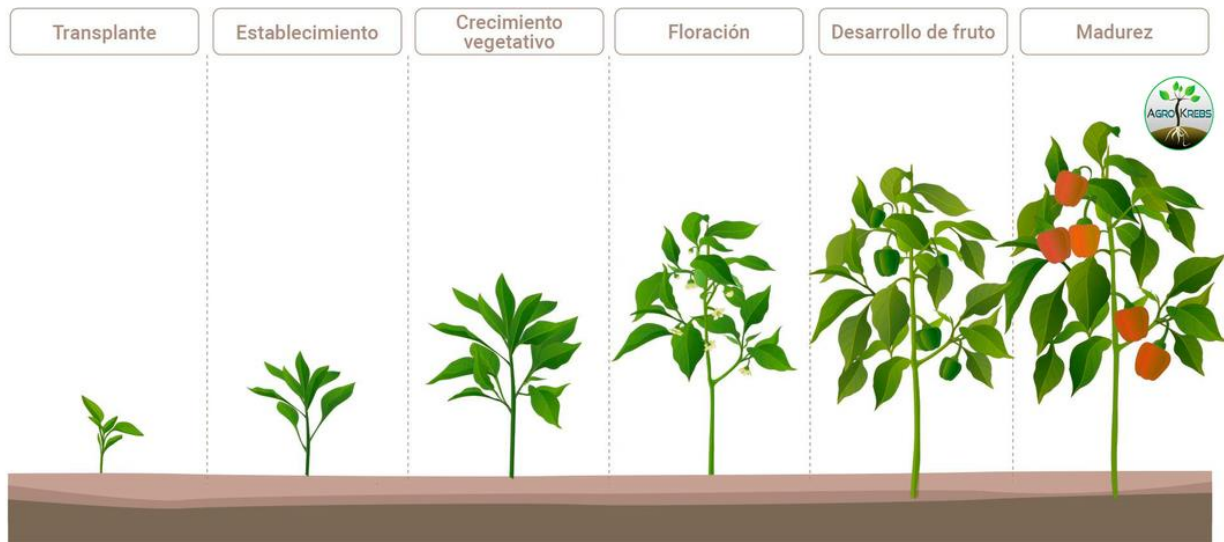


Figura 1.2 Etapas fenológicas del cultivo de chile. Fuente: CQM, 2015.

1.1.4.3 Crecimiento vegetativo

A partir de la producción de la sexta a la octava hoja como se muestra en la figura 1.2, la tasa de crecimiento del sistema radicular se reduce gradualmente; en cambio la del follaje y de los tallos se incrementa, las hojas alcanzan el máximo tamaño, el tallo principal se bifurca y a medida que la planta crece, ambos tallos se ramifican. Generalmente la fenología de la planta se resume en: germinación y emergencia, crecimiento de la plántula, crecimiento vegetativo rápido, floración y fructificación.

1.1.4.4 Floración y fructificación

Al iniciar la etapa de floración, el chile produce abundantes flores terminales en la mayoría de las ramas, aunque debido al tipo de ramificación de la planta, parece que fueran

producidas en pares en las axilas de las hojas superiores. El período de floración se prolonga hasta que la carga de frutos cuajados corresponda a la capacidad de madurarlos que tenga la planta. Bajo condiciones óptimas, la mayoría de las primeras flores produce fruto, luego ocurre un período durante el cual la mayoría de las flores aborta. A medida que los frutos crecen, se inhibe el crecimiento vegetativo y la producción de nuevas flores.

Cuando los primeros frutos empiezan a madurar, se inicia una nueva fase de crecimiento vegetativo y de producción de flores. De esta manera, el cultivo de chile tiene ciclos de producción de frutos que se traslapan con los siguientes ciclos de floración y crecimiento vegetativo. Este patrón de fructificación da origen a frutos con distintos grados de madurez en las plantas, lo que usualmente permite cosechas semanales o bisemanales durante un período que oscila entre 6 y 15 semanas, dependiendo del manejo que se dé al cultivo. El mayor número de frutos y los frutos de mayor tamaño se producen durante el primer ciclo de fructificación, aproximadamente entre los 90 y 100 días. Los ciclos posteriores tienden a producir progresivamente menos frutos o frutos de menor tamaño, como resultado del deterioro y agotamiento de la planta.

1.1.5 Capsaicinoides

1.1.5.1 Localización de la síntesis de capsaicinoides

Los capsaicinoides son compuestos que generan el picor en los chiles, su formación radica en rutas independientes a metabolitos primarios, convirtiéndose en metabolitos secundarios, estos compuestos se sintetizan y acumulan en pequeñas vesículas en las vacuolas de células epiteliales en el tejido de la placenta del fruto. (Stewart *et al.*, 2007; Zamski *et al.*, 1987; Ruiz-Lau, 2011).

Judd *et al.*, (1999) describe que los capsaicinoides se concentran a lo largo de las células epidérmicas en la división de los lóculos (figura 1.3 A) del fruto que suelen ser entre tres y cuatro conectando la placenta (figura 1.3 B) con el pericarpio (figura 1.3 C).

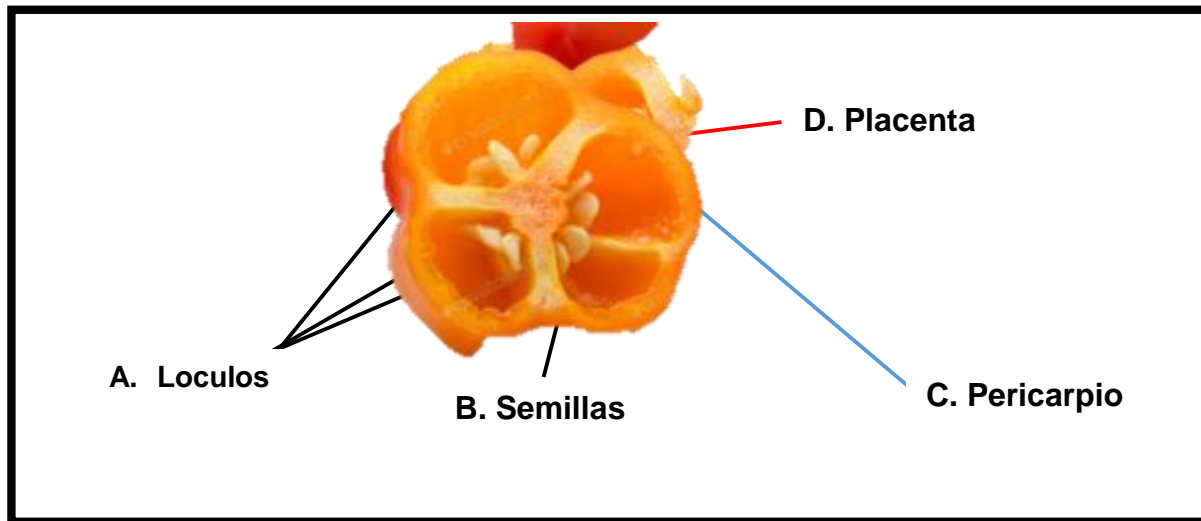


Figura 1.3. Corte longitudinal de fruto de chile habanero mostrando la morfología del mismo, loculos (A), semillas (B), pericarpio (C) y placenta (D). Fuente: de auditoria propia.

1.1.5.2 Estructura química de los capsaicinoides

Los capsaicinoides son compuestos fenólicos, amidas que se forman al unirse la vainillilamina con un ácido graso. Se conocen alrededor de 20 capsaicinoides de los cuales la capsaicina [(E)-N-(4-hidroxi-3-metoxibencil)-8-metil-6-nonenamida] y la dihidrocapsaicina (6,7-dihidroderivado) (fig. 4) representan el 90% del total de los capsaicinoides. (Bennett, 1968; Ruiz-Lau, 2011).

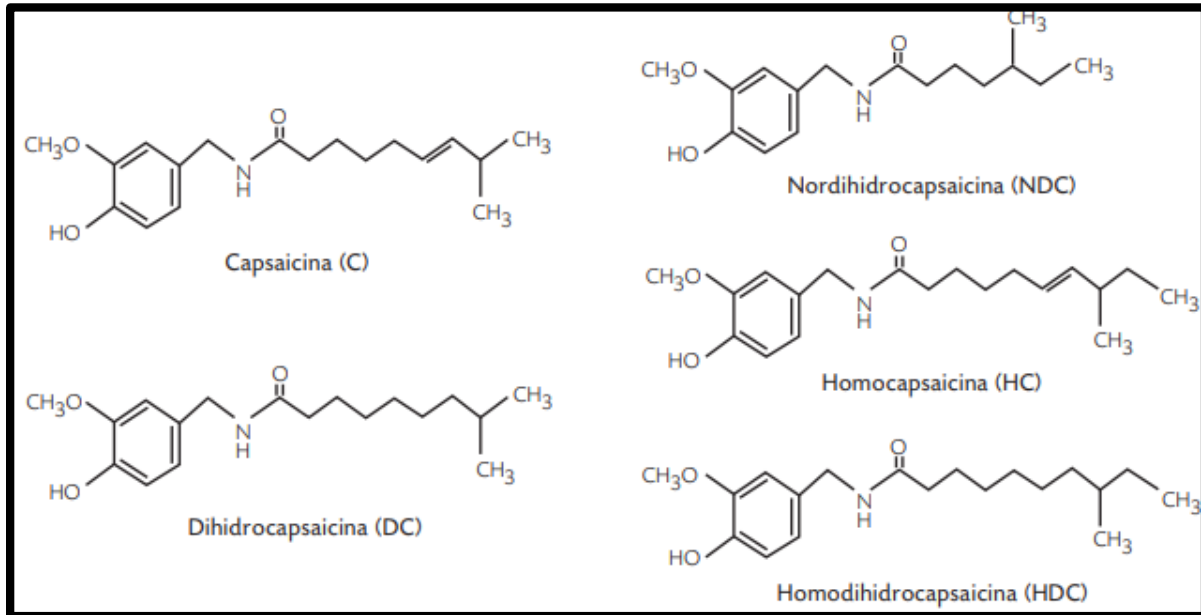


Figura 1.4. Estructura química de los capsaicinoides más frecuentes en los frutos del género *Capsicum* (Estrada y colaboradores, 2000).

1.1.5.3 Metabolismo de los capsaicinoides

La porción fenólica es la vainillilamina, que se forma a partir de la fenilalanina por medio de la ruta de los fenilpropanoides. El ácido graso se forma a partir de aminoácidos de cadena lateral ramificada, ya sea valina o leucina. Las diferencias estructurales de los diversos capsaicinoides residen precisamente en la naturaleza de la cadena lateral, que puede ser de 9 u 11 carbonos de largo, con un número variable de enlaces dobles colocados en diferentes posiciones (fig. 5) (Vázquez-Flota, *et al.*, 2007).

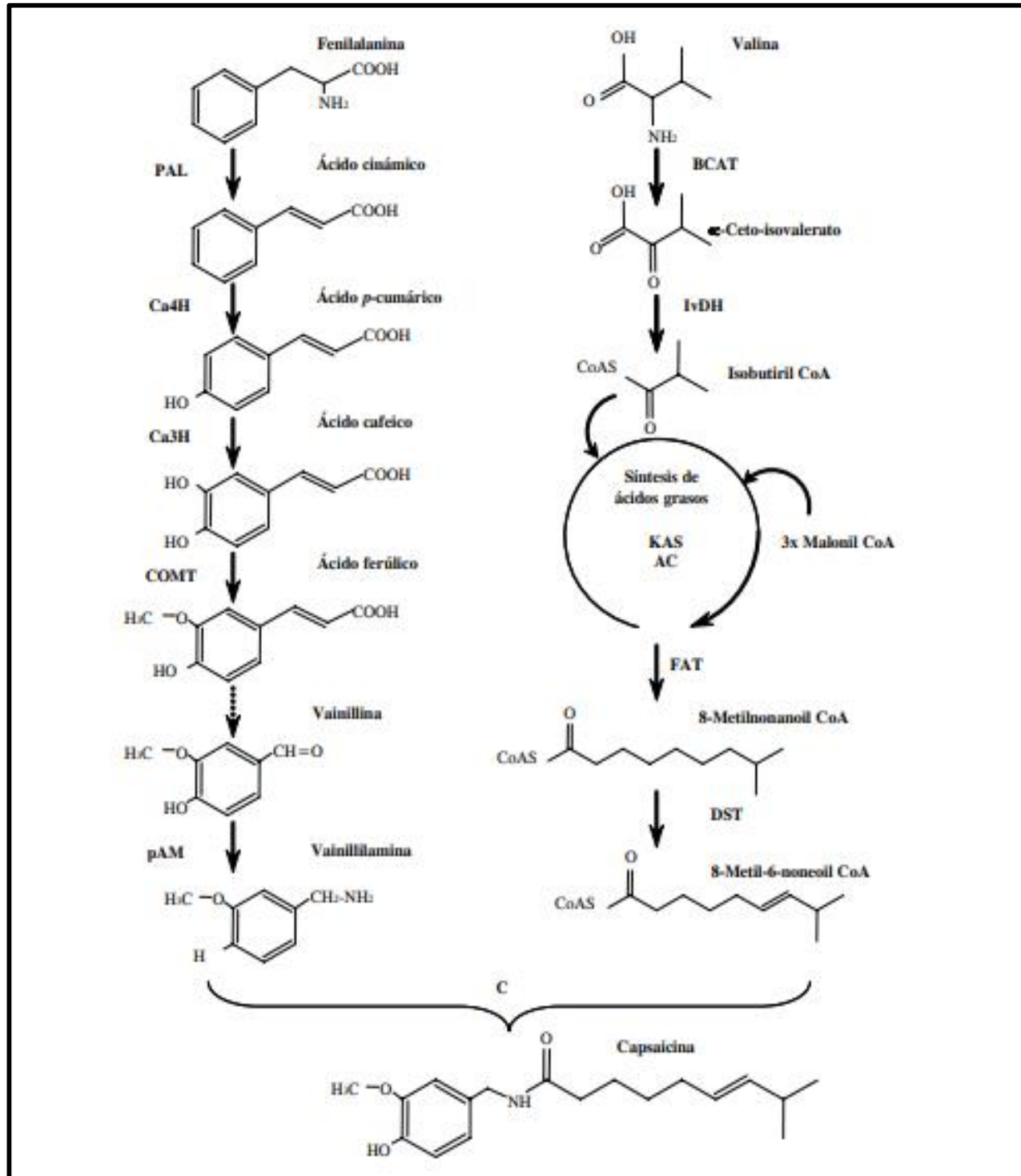


Figura 1.5 Ruta propuesta para la biosíntesis de los capsaicinodes en el género *Capsicum*. PAL, fenilalanina amonio liasa; Ca4H, ácido cinámico 4 hidroxilasa; Ca3H, cumarato 3 hidroxilasa; COMT, ácido cafeico O-metiltransferasa; pAMT, presunta aminotransferasa de la vainillina; BCAT, aminotransferasa de los aminoácidos ramificados, IvDH, α-cetoisovalerato deshidrogenasa; Kas, β-cetoacil sintasa; ACL, proteína

acarreadora de grupos acilo; FAT, tioesterasa; DST, desaturasa; CS capsaicinoide sintasa. La flecha punteada representa a reacciones por caracterizar. (Vázquez- Flota, *et al.*, 2007)

1.1.5.4 Regulación del contenido de capsaicinoides por factores ambientales y por desarrollo

El contenido de capsaicinoides puede ser diferente debido a dos variables que mencionan los autores Iwai *et al.*, (1979), y Zewdie *et al.*, (2000), la primera es la genética de cada especie de chile, y segunda la interacción del medio ambiente con la planta. Cada especie en particular tiene un rango conocido en la cantidad de capsaicinoides, y son clasificados desde el más bajo hasta el de mayor contenido, pero un estrés, o ambiente favorable pueden alterar drásticamente el picor en los frutos de chile por ejemplo la limitación de agua, el estado nutricional, la posición del fruto en los tallos, los genotipos y heridas en el fruto. (Kirschbaum-Titze *et al.*, 2002; Sung *et al.*, 2005)

1.1.6 Metabolitos secundarios presentes en los Capsicum

Los frutos de Capsicum son gran fuente de metabolitos secundarios, los más importantes y característicos de estos son los capsaicinoides, sin embargo contiene otros importantes compuestos. Entre ellos se encuentran el ácido ascórbico el cual es considerado una vitamina (C), con un contenido cerca de 135 mg/ 100 g de fruto fresco (Antonelli *et al.*, 2018) otros metabolitos con actividad biológica en los chiles son los carotenoides, tocoferoles, flavonoides y compuestos fenólicos (Segura-Campos, *et al.*, 2013; Hernández-Zerega, 2017).

1.1.7 Técnicas utilizadas para la determinación de los distintos metabolitos secundarios

Capsaicinoides

Para realizar con más exactitud un análisis de capsaicinoides existen distintas herramientas, como son los métodos instrumentales, con el uso de estándares y equipos que proporcionan el contenido y tipo de capsaicinoides uno de ellos es el uso de HPLC (cromatografía líquida de alta resolución) descrito por ASTA (1985).

1.1.8 Importancia económica del chile

La importancia económica del cultivo de chile habanero se centra en su fruto, sus características peculiares como son la diversidad de colores, sabor, aroma y el contenido de uno de sus metabolitos secundarios más conocidos; en este caso los capsaicinoides, ha propiciado a ser un producto de alto valor agregado. El interés por este fruto no es únicamente por el consumo en fresco, también se utiliza como un condimento, o para elaboración de productos gastronómicos, es fuente de colorantes naturales, vitaminas (A, C Y E) y minerales (fig. 1.6). La capsaicina es uno de los principales capsaicinoides y es el más utilizado en la industria farmacéutica debido a sus varias propiedades, como estimulante de apetito, antiinflamatorio, contra-irritante, anestésico, derivando subproductos con extractos de chile para elaborar ungüentos, lociones, cremas etc., por otro lado contiene propiedades que ahora podrían incursionar en el sector agrícola como un inhibidor natural de agentes patógenos. Además, la oleorresina que se extrae de los frutos, su aplicación se extiende a la industria química para la elaboración de pinturas, barnices, gases lacrimógenos, y además se han creado extractos concentrados de picante, los cuales pueden utilizarse en recubrimiento de cables (Ruiz-Lau, 2011; Xing *et al.*, 2006).

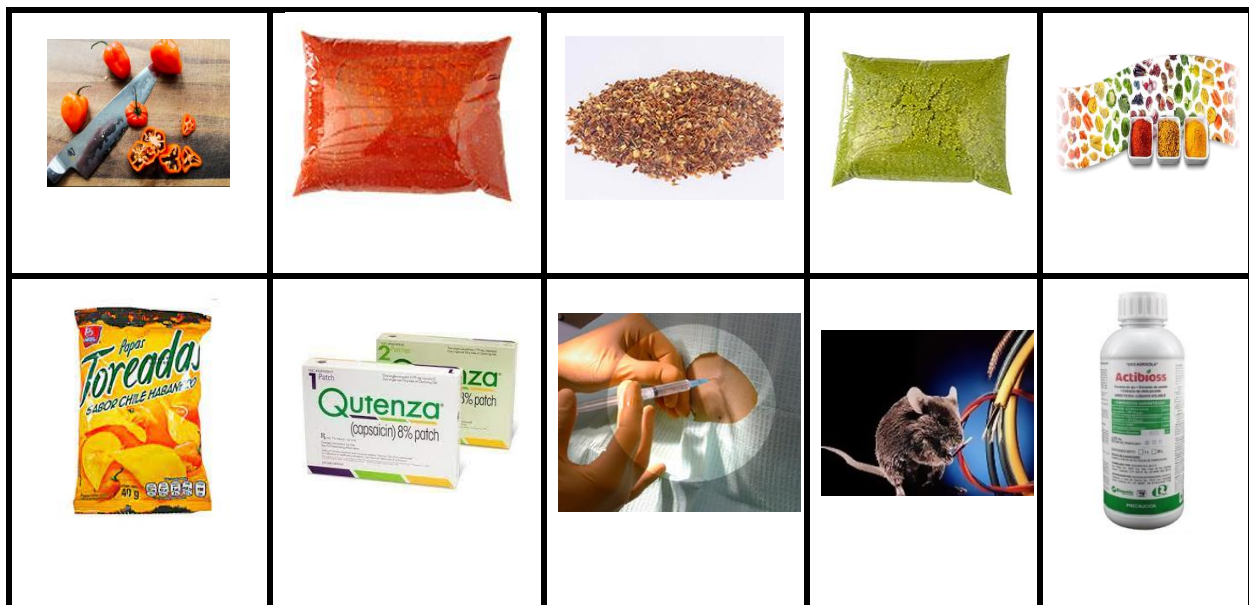


Figura 1.6 Productos elaborados a partir de capsaicina y otros metabolitos secundarios del chile habanero.

1.1.9 Importaciones y exportaciones de chile habanero

En México casi el 30% de la producción se destina al mercado extranjero, los pimientos y chiles mexicanos se encuentran en el primer y tercer lugar de ranking mundial de exportaciones, colocándose como cultivos estratégicos con potencial de mercado (SAGARPA, 2018). En el caso, del chile verde, nuestro país ocupa el tercer lugar a nivel internacional en exportaciones, con envíos por un millón 42 mil 751 toneladas, las cuales tuvieron un valor de 984.7 millones dólares. Siendo Estados Unidos, Canadá, Guatemala, Japón, Italia y Alemania los principales importadores de chile verde mexicano (SAGPARPA, 2018), en la actualidad ha incrementado la demanda en 20 países más en América, Asia y Europa.

Otros países que producen chile verde son China, Indonesia, Turquía, España, Estados Unidos y Nigeria. (GOB, 2017).

1.1.10 Estados productores de chile habanero

Actualmente la producción de chile habanero se centra en 19 estados de la República Mexicana, la forma de producir este cultivo es distinta en cada estado, dependiendo de las condiciones económicas del productor.

Los principales estados productores de chile habanero en México son Sinaloa (24.67%), Tabasco (19.98%), Campeche (11.75%), Yucatán (10.53%) y Quintana Roo (7.57%) acaparando el 74.5% (fig. 1.7) de superficie que se siembran en el país como se observa en la figura 1.7.

Los estados donde no se produce son: Durango, Guanajuato, Guerrero, Hidalgo, Jalisco, Estado de México, Querétaro, Puebla, Tlaxcala, Morelos, Zacatecas y la Ciudad de México.

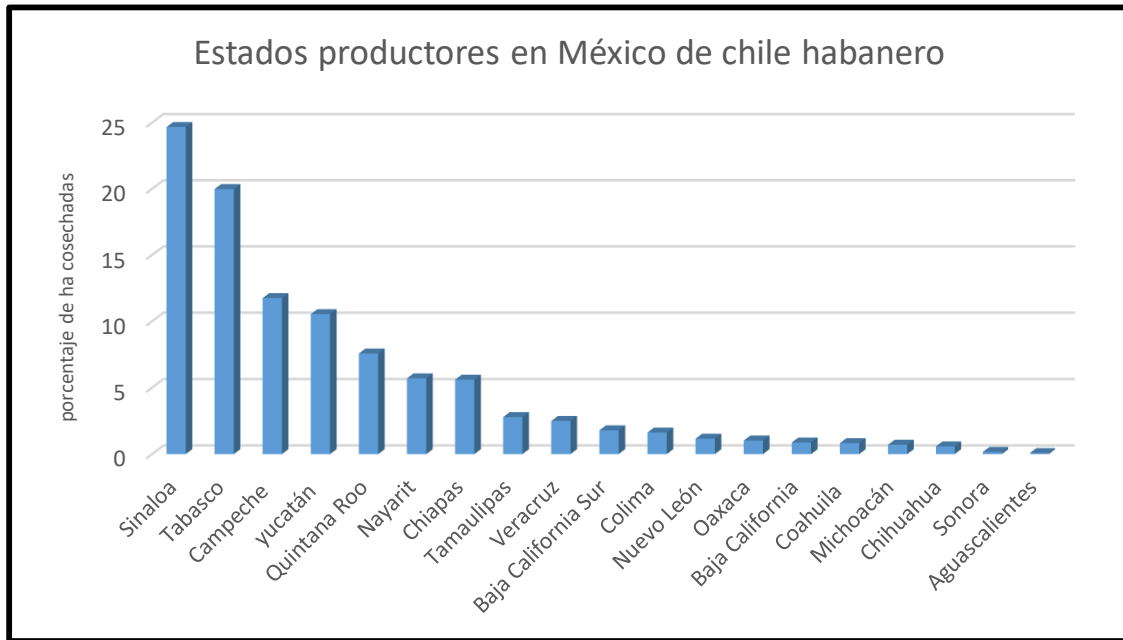


Figura 1.7 Estados productores de chile habanero en México. Fuente: SIAP (2020).

1.1.11 Ciclos de producción de chile habanero

El ciclo agrícola del cultivo se divide en dos estaciones: otoño-invierno y primavera-verano (fig. 1.8). De acuerdo a la imagen la temporada otoño- invierno es la más adecuada para sembrar con un porcentaje de 66.22% de tierras cultivadas (cuadro 1.2). Debido a que productores dependen de las lluvias del temporal para poder producir este cultivo, quienes cuentan con sistema de riego o algún tipo de tecnología, logran producir en cualquier etapa del año.

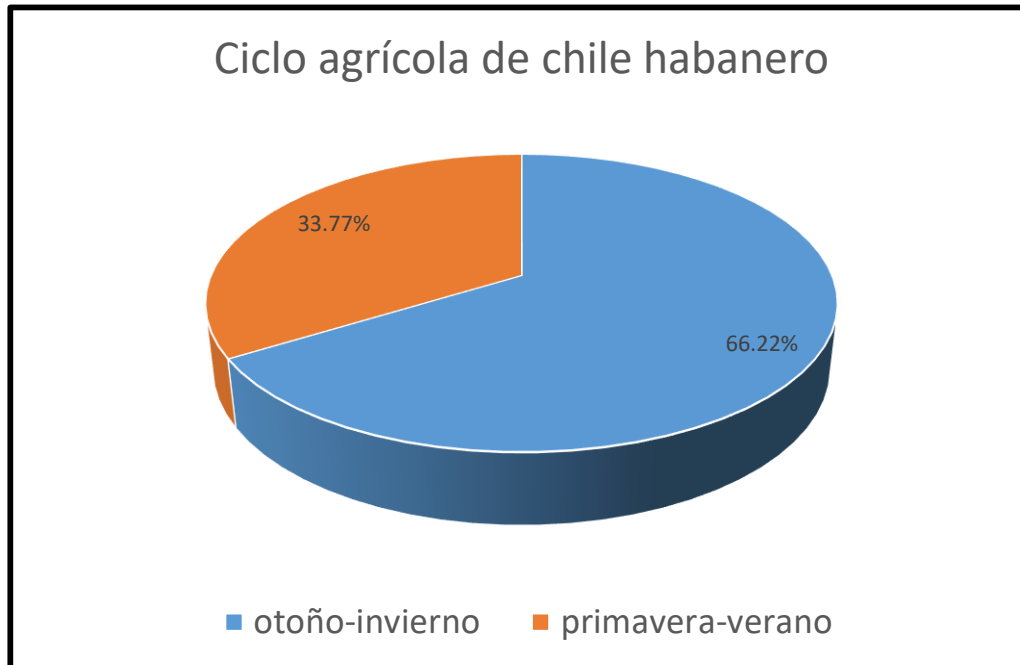


Figura 1.8 Ciclos agrícolas del cultivo de chile habanero en México. Fuente: SIAP (2020).

1.1.12 Sistemas de producción de chile habanero en 2020

Hoy en día se encuentran distintos sistemas de producción para el cultivo de chile habanero, como es el sistema cielo abierto, en macro tunel, malla sombra e invernadero (cuadro 1.2).

Cuadro 1.2 Hectáreas cosechadas de chile habanero en los estados productores de México, clasificado por el tipo de tecnología (cielo abierto, macro tunel, malla sombra e invernadero).

Estado	Cielo abierto ha	Macro tunel ha	Malla sombra ha	Invernadero ha
Sinaloa	296			
Tabasco	239.75			
Campeche	141			
Yucatán	120.32		3.22	2.9
Quintana Roo	80.91			10.02
Nayarit	68.5			
Chiapas	62.25		5	

Tamaulipas	19	10		4.5
Veracruz	30			
Baja California Sur	15.5		6	
Colima	19.5			
Nuevo León	14			
Oaxaca	12.3			
Baja California	10.5			
Coahuila	10			
Michoacán	8.5			
Chihuahua			7	
Sonora			2	
Aguascalientes				1

Fuente: SIAP (2020).

En la actualidad son pocos los estados que emplean algún tipo de tecnología para el cultivo de chile habanero, en el cuadro 1.2, Muestra a Tamaulipas el único estado con 10 ha cosechadas en macro tunel, por otro lado el sistema en malla sombra se tiene registro de 5 estados (Yucatán, Chiapas, Baja California Sur, Chihuahua y Sonora) con una cantidad de 23.22 ha, y la producción en invernadero está conformado por los estados de Yucatán, Quintana Roo, Tamaulipas y Aguascalientes con 18.42 ha. El resto de los estados productores aun cultivan de forma convencional (cielo abierto) con 1,148.03 ha cosechadas.

1.1.12.1 Producción (toneladas) y precio de chile habanero

La producción del chile habanero se considera de alto valor agregado por el uso amplio en la industria alimentaria, farmacéutica y cosmética, entre otras, debido a los capsaicinoides, metabolitos secundarios de interés, dando lugar a un cultivo redituable. En vista a esto son

más los estados que toman interés por producir, incluso a obtener mejores precios de venta por tonelada tal es el caso de Nuevo León, su precio por tonelada es de \$29,000.00 pesos (cuadro), al ser un estado fronterizo con Estados Unidos, le da oportunidad de ofertar en mejor precio su producto, así como obtener mejores tratos directos con empresas. En cambio Chiapas presenta los precios más bajos en el mercado (cuadro 1.3), posiblemente a intermediarios que consiguen comprar las cosechas a un menor precio para revenderla a uno más alto, afectando directamente en los gastos de producción del productor.

Cuadro 1.3 Producción, rendimiento, precio medio rural y valor de la producción de chile habanero en los estados productores de México

Estados	Producción (Ton)	Rendimiento (Ton/ha)	Precio medio rural (\$/Ton)	Valor de la producción (miles de pesos)
Aguascalientes		25.50	24,044.90	613.14
Baja California	25.50	21.52	11,920.35	2,693.52
Baja California Sur	225.96	28.69	23,796.88	14,678.87
Campeche	616.84	14.21	21,906.58	43,882.61
Coahuila	2,003.17	21.05	32,800.00	6,904.40
Colima	210.50	23.15	12,018.80	5,425.65
Colima	451.43	22.66	11,258.77	17,156.90
Chiapas	1,523.87	35.00	25,000.00	6,125.00
Chihuahua	245.00	6.94	17,190.25	1,014.05
Michoacán	58.99	14.75	16,176.91	16,343.86
Nayarit	1,010.32	28.00	29,000.00	11,368.00
Nuevo León	392.00	6.32	15,892.57	1,235.96
Oaxaca	77.77	16.40	23,641.39	35,251.67
Quintana Roo	1,491.10	28.42	12,058.38	101,444.35
Sinaloa	8,412.77	65.00	15,000.00	1,950.00
Sonora	130.00	10.25	16,356.16	40,181.53
Tabasco	2,456.66	26.55	26,197.06	23,297.05
Tamaulipas	889.30	6.60	12,507.32	2,475.20
Veracruz	197.90	12.30	25,688.71	39,939.00
Yucatán	1,554.73	0.00	0.00	371,980.77
TOTAL	21,973.81			

Fuente: SIAP (2020).

La producción total actual que se mantiene en el país es de 21, 973.81 toneladas y un ingreso de 371 millones de pesos mexicanos (SIAP, 2020), se espera tenga un aumento en los próximos años.

1.1.13 Costos de producción de chile habanero

Los principales estados que mantienen la mayor diversidad de chiles habaneros son Yucatán, Campeche y Quintana Roo quienes además cuentan con la denominación de origen (DOF, 2010), actualmente el estado de Yucatán cultiva 126.4 hectáreas de chile habanero (SIAP, 2020) con un costo aproximado de inversión de 200 a 250 mil pesos por hectárea, obteniendo rendimientos de 20 ton/ha (Avilés *et al.*, 2021). Estos costos son elevados por las actividades de control que se llevan durante el ciclo, control de malezas quienes son hospederas de mosquita blanca y virus (DIAZ, 2003) y plagas que atacan directamente como el picudo del chile (Ramírez *et al.*, 1993).

1.1.14 Manejo del cultivo de chile habanero

1.1.14.1 Requerimientos climáticos

Para un desarrollo óptimo del cultivo de chile habanero las zonas más apropiadas son las templadas y subtropicales. Con altitudes entre 0 y 2700 msnm. Y con un rango de precipitación de 600 a 1250 mm (FAO, 1994). En cambio si se tiene algún tipo de tecnología en el sistema de producción los requerimientos de agua pueden disminuir como los muestra García-Casas (2018), al elaborar un trabajo de investigación donde se puede eficientar el consumo de agua en el cultivo de chile habanero (cuadro 1.4). Obteniendo un ahorro con el sistema hidropónico de un 31% en consumo de agua por planta.

Cuadro 1.4 Consumo hídrico por planta en tres sistemas de producción de chile habanero.

Sistema	Consumo de agua (L)	Consumo de agua por planta (L)
Hidroponía	3125a	62.5a
Invernadero	9023	180.46
Cielo abierto	10023	200.46

Imagen García Casas (2018).

El chile habanero necesita rangos de temperatura mínima de 10°C y máxima 35°C considerando óptima 30 °C. Temperaturas menores de 10°C y mayores a 35°C limitan su desarrollo (Ramírez *et al.*, 2006). La temperatura para la germinación fluctúa entre los 18 y 35 °C, siendo la óptima de 30°C López et al., (2014).

No tolera temperaturas de 15 °C. El cultivo se adapta a diferentes condiciones de suelos, aunque prefiere los suelos profundos, de textura franca, y un pH que oscile entre 6.5 a 7 (INTAGRI, 2022).

1.1.14.2 Establecimiento del cultivo (INTAGRI 2022)

Preparación del terreno. Subsuelo y dos pasos de rastra, realización de camas de siembra, instalar sistema de riego y por último el acolchado si este se utiliza, para el trasplante el suelo debe de estar humedecido 15 cm

Trasplante. Plántulas con un buen vigor y altura de 10 a 15 cm, con 3 o 4 pares de hojas verdaderas.

Densidad de población. Bajo cubierta (invernadero o malla) cultivo a doble hilera, con separación entre hileras de 40 a 50 cm y entre plantas entre los 30 a 50 cm, obteniendo densidades de 22,000 a 41,666 plantas por hectárea. A campo abierto camas de 1.5 m y

de 40 a 60 cm entre plantas para obtener densidades de entre 16,500 a 14,500 plantas por hectárea.

1.1.14.3 Medios de cultivo para la producción de chile habanero

Este cultivo por lo regular se produce en sistemas convencionales a campo abierto, por lo que es escasa la información sobre soluciones nutritivas hidropónicas por ende es común utilizar la solución nutritiva universal de Steiner (1984), sin embargo el ir mejorando las condiciones de los cultivos a formas de producción con algún tipo de tecnología implica elaborar soluciones aptas para cada etapa de crecimiento del cultivo de chile habanero, tal es el caso del CENID RASPA (villas *et al.*, 2010, 2011) donde evaluaron por dos años soluciones nutritivas para este cultivo, consistió en aplicar de 12 a 25 meq L⁻¹ encontrando una solución equilibrada con 15 y 17 meq L⁻¹ (cuadro 1.5).

Cuadro 1.5 Solución nutritiva para chile habanero.

Periodo de desarrollo	Solución nutricional (meq L ⁻¹)	Concentración	Iones					
			NO ₃ ⁻	H ₂ PO	SO ₄ ²⁻	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
Trasplante a inicio de floración	15	%	0.75	0.15	0.10	0.34	0.42	0.24
		meq L ⁻¹	11.25	2.25	1.50	5.10	6.30	3.60
Inicio de floración a última cosecha	17	%	0.75	0.15	0.10	0.33	0.45	0.22
		meq L ⁻¹	12.75	0.15	0.10	0.33	0.45	0.22

Fuente: CENID RASPA 2010,2011.

Cuadro 1.6 Concentración de micronutrientes en la solución nutritiva durante todo el ciclo del cultivo.

Nutrimento	Concentración (meq L ⁻¹)
Boro (B)	0.3
Cobre (Cu)	0.2
Fierro (Fe)	4.0
Manganeso	1.0
Molibdeno	0.1
Zinc	0.4

Fuente: CENID RASPA 2010,2011.

De igual forma López-Gómez, (2020) elaboro un régimen nutrimental alternativo para sistema hidropónico e invernadero evaluando tres concentraciones de nitrato en la etapa vegetativa (10, 12 y 14 meq L⁻¹), combinadas cada una con tres relaciones de nitrato: fosfato: sulfato en la etapa de floración y con tres relaciones nitrato: potasio en la etapa de fructificación (cuadro 1.7).

Cuadro 1.7 Régimen nutrimental alternativo para la producción de chile habanero en sistema hidropónico e invernadero.

Etapa fenológica	Composición química de las soluciones nutritivas (meq L ⁻¹)				
	NO ₃ ⁻	H ₂ PO ₄	SO ₄ ²⁻	K ⁺	Ca ²⁺
Vegetativa	14	0.75	5.25	7	4
Floración	14	1.25	4.75	7	4
Fructificación	14	0.75	5.25	5	4.61

1.1.15 Análisis de la cadena productiva del chile habanero

A pesar de ser un cultivo rentable, la tecnología utilizada para el chile habanero es de un nivel muy bajo, dado que era un cultivo de traspatio, lo que representa pequeñas superficies

cultivadas, y es preciso mencionar que la mayoría de los productores son de escasos recursos, solo a través de programas como Fondo Nacional de Apoyo para las Empresas de Solidaridad (FONAES), han sido apoyados con plántulas, semillas, invernaderos, información, etc., (Corales García *et al.*, 2014).

Flores-López en 2020 realizó un análisis FODA (cuadro 1.8) recopilando las problemáticas y beneficios que se tienen en los estados con la denominación de origen, esperando que se pueda fortalecer los eslabones productivos.

Cuadro 1.8 Análisis de Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas de la cadena productiva del Chile Habanero.

Fortalezas	<ol style="list-style-type: none"> 1. Mayor pungencia y atributos diferenciales a las condiciones regionales. 2. Fuerte arraigo en el estado. 3. Subproductos de importancia biológica; extracción de capsaicina 4. Uso amplio en la industria farmacéutica, alimentaria y cosmética. 5. Diversificación del producto en la industria de alimentos. 6. Gusto y preferencia del consumidor. 7. Incremento de las exportaciones en salsas.
Oportunidades	<ol style="list-style-type: none"> 1. Mercado de exportación se ha registrado una creciente demanda, fresco e industrializado. 2. Nuevos y novedosos usos de la capsaicina 3. No existen restricciones fitosanitarias para la exportación de este chile y favorece su distribución 4. Programas de apoyo limitados
Debilidades	<ol style="list-style-type: none"> 1. Dispersión de las parcelas productivas.

Amenazas	<ol style="list-style-type: none"> 2. Escasa o incipiente organización e integración a la comercialización e industrialización de productos. 3. Bajo nivel tecnológico en los diferentes eslabones. 4. Desfavorables condiciones edáficas, alta heterogeneidad en los suelos y dependiente de la fertilización. 5. Nulo desarrollo de tecnología postcosecha. 6. Incremento de intermediario. 7. Deficiencias en la comercialización 8. No hay integración de cadena productiva.
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Otros competidores: Belice 2. Producción absorbidos por la maquila 3. Abandono de tierra 4. Pocos jóvenes integrados a la producción 5. Pocos incentivos para la comercialización

Origen: María Flores López (2020)

1.1.16 Problemáticas de la agricultura convencional

La crisis del cambio climático, abre pauta a reevaluar si nuestros sistemas de producción agrícolas son eficientes ante las futuras (o presentes) problemáticas, y al desorbitante uso de fertilizantes, aplicación desmedida de productos químicos en los cultivos (plaguicidas), riegos excesivos (por ejemplo riego rodado), impactando directamente a la salud del consumidor, y a los suelos agrícolas; ocasionando pérdida de materia orgánica, erosión, disminución de microorganismos benéficos, salinidad, dando como resultado suelos infértiles. Esto se ha vuelto tan común, que los espacios para producir disminuyen a medida que incrementa la densidad de producción y la densidad poblacional. En los últimos años se ha invadido espacios que estaban destinados para conservación de especies vegetales y animales, dañando por completo ecosistemas, agotando manglares, ríos, selvas, etc. Colocándose en lugares de más difícil acceso, alejándose de sus puntos de venta, distancias

largas para adquirir insumos, mayor gasto de combustible, contratación de servicios costosos con cámaras enfriadoras para transportar el producto evitando pérdidas por maduración, finalizando con gastos elevados de producción. (Waldron 2018; Al-Kodmany 2018; Kalantari *et al.*, 2020).

1.1.17 Alternativas de producción

La evolución de nuevas tecnologías permite dar un respiro ante las necesidades de cambiar nuestro panorama en la forma de cultivar. Las exigencias han llevado a la creación de lugares con características de protección, enfocándose en un espacio donde la planta pueda desarrollarse sin verse afectada por los constantes cambios del clima, como la lluvia, temperaturas altas, heladas, granizo, viento, en un entorno donde no compita con otras plantas o hierbas (maleza) por los nutrientes del suelo, fuera del alcance de plagas y enfermedades, eficientando el consumo de agua y nutrientes (Bielinski, 2010).

Una de estas alternativas ha sido la agricultura protegida que hace referencia a los invernaderos el cual está constituido por estructuras metálicas con cubiertas de plástico o malla, aislando al cultivo de factores bióticos y abióticos, en estos espacios se pueden producir diversidad de cultivos (Bielinski, 2010). Sin embargo existe una nueva forma de producir llamada agricultura urbana quien ha aportado soluciones a problemas ya conocidos, y consiste en cultivar en espacios reducidos dentro de la zona urbana, acortando los tiempos de entrega y reduciendo el gasto de combustible (Despommier, 2013).

1.1.18 Agricultura vertical

Los investigadores y empresarios se han inclinado por desarrollar nuevas tecnologías para la producción de alimentos, esto implica la optimización del ambiente, y la fabricación de estructuras verticales. Consiste en crear un espacio de condiciones controladas, e incluso la luz añadiéndola de forma artificial, sin exposiciones a factores bióticos y abióticos,

obteniendo eficiencia en fertilizantes y ahorro de agua, a través de sistemas tecnificados (hidroponía y aeroponía) maximizando la producción por m² (Kalantari., *et al* 2017; Hedenblad *et al.*, 2017). Los beneficios de la agricultura vertical no solo acapara una mayor producción, si no el ámbito social y ambiental, tal y como se describe en el cuadro 1.9.

Cuadro 1.9 Beneficios de la agricultura vertical de interior.

Factor	Ventajas	Ambiental	Social	Ciencias económicas
Ubicación	Proximidad a suministro y consumidor Trabajadores locales	Uso reducido de recursos naturales	Comida fresca Fácilmente disponible	Menos costo de energía
Operación	Producción durante todo el año Consumo reducido de agua Uso reducido de fertilizantes y pesticidas	Menos polución Menos tensión de recursos natural	Más agua para beber u otros fines Comida de mejor calidad	Menos costo de operación
Tecnología	Alta productividad Escalabilidad en producción de alimentos	Eficiencia en el uso de espacios Ahorro en el uso de la tierra cultivable	Aumento en el suministro de alimentos	Ingresos altos

Fuente Wong 2020.

1.1.19 Hidroponía

La hidroponía es un sistema de crecimiento de plantas sin suelo utilizando como medio de cultivo una solución con nutrientes, la planta se coloca en macetas, canastillos o canaletas y/o sustratos químicamente inertes. Las raíces pueden estar suspendidas parcialmente o mediante flujos con la solución nutritiva (Son *et al.*, 2020).

1.1.20 Aeroponía

La aeroponía es una variante del sistema hidropónico que consiste en un ambiente cerrado para las raíces. La diferencia de este sistema a los demás, es una disminución en el gasto de agua, y la eliminación de suelos y/o sustratos. En este sistema la planta se divide en dos, la parte aérea, como son tallos, ramas, hojas, flores y frutos, y estarán expuestas al ambiente

mientras que las raíces estarán suspendidas en el aire como se muestra en la figura 9. Las plantas suelen estar soportadas por canastillos o tablas, y por tutores si este la requiere. Los riegos y las frecuencia de estos se realizan por un temporizador, que estará conectado a la bomba, y mediante boquillas asperjara las raíces, creando una nube en el ambiente llena de nutrientes, propiciando así una mejor aireación a las raíces, logrando acelerar el crecimiento y desarrollo de la planta. (Wong, 2020).

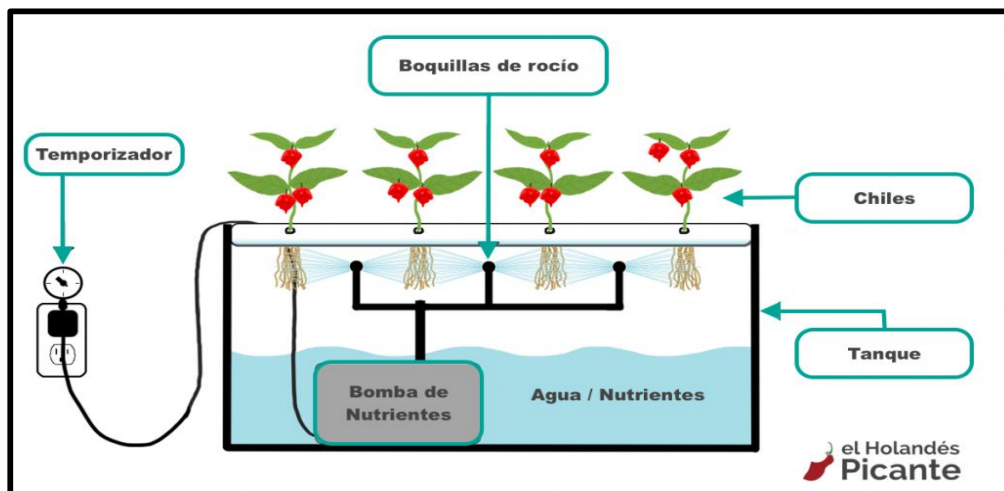


Figura 1.9 Diagrama de sistema aeropónico para chiles con baja presión. Imagen obtenida del Holandés picante.

El método de cultivo a seleccionar depende en su mayoría de la capacidad y preparación tecnológica del productor, del recurso económico, y los tipos de cultivo.

En el cuadro 10 se observa una comparación de los sistemas más utilizados en ambiente controlado: hidroponía y aeroponía, describiendo las características claves, los beneficios principales y la tecnología en común y aplicable. En un análisis realizado por el portal de estadística, investigación y estudios de mercado Statista en 2019, reporta un porcentaje de 51% de aplicación de sistemas hidropónicos, y un 20 % en sistemas aeropónicos y 13% en suelo en sistemas de producción en ambiente controlado, esto significa un avance en la forma de producir, sustituyendo el suelo en la forma convencional de producir.

Cuadro 1.10 Agricultura de interior de alta tecnología. Comparación de los sistemas hidropónicos y aeropónicos.

Método de cultivo	Características claves	Beneficios principales	Tecnología comunes/aplicables
Hidroponía	Sin suelo, utiliza agua como medio de cultivo.	Fomenta el rápido crecimiento de las plantas; reduce incluso elimina los problemas de cultivo relacionados con el suelo; disminuye el uso de fertilizantes o pesticidas.	Sistemas computarizados y de monitoreo; teléfonos celulares, computadoras portátiles y tabletas, aplicaciones de cultivo de alimentos; sistemas y software de control remoto (sistemas de cultivo a distancia); estanterías automatizadas, sistemas de apilamiento, cintas móviles y torres altas; sistemas de iluminación LED programables; aplicaciones de energías renovables (paneles solares, aerogeneradores, geotermia, etc.) sistemas de circuito cerrado, digestores anaeróbicos; sistemas de nutrientes programables; climatización, sistemas HVAC; sistemas de recirculación y reciclaje de agua; colectores de agua de lluvia: sistemas para matar insectos; robots.
Aeroponía	Una variante de la hidroponía; consiste en rociar las raíces de las plantas con neblina o soluciones nutritivas.	Además de los beneficios mencionados anteriormente, requiere menos agua.	

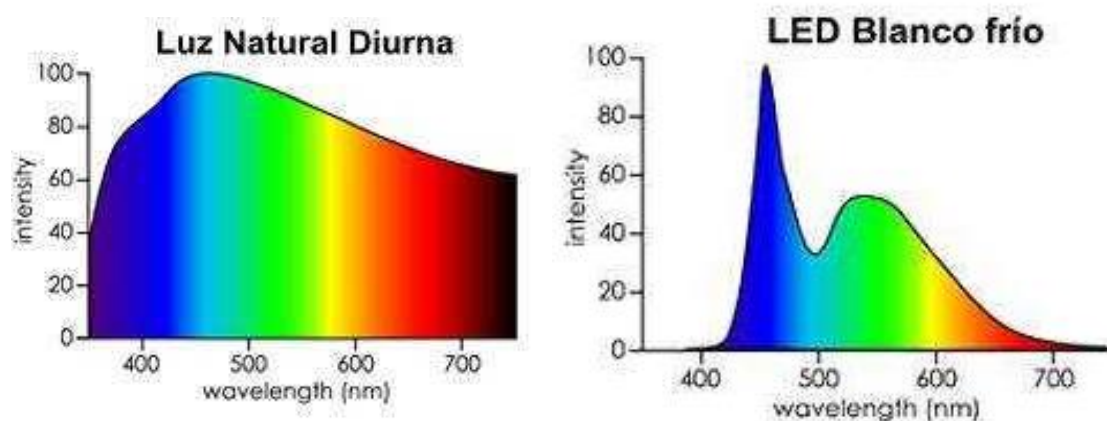
Fuente: Kheir Al-Kodmany 2018.

1.1.21 Tecnologías de iluminación

Uno de los componentes más importantes para la producción en sistemas controlados ha sido la luz añadida de forma artificial por medio de lámparas de luz LED, brindando eficiencia en el consumo eléctrico, a diferencia de los invernaderos, las plantas que se producen en interiores dependen completamente de luz artificial para su desarrollo (Wong, 2020). Con una tasa de eficiencia de 28 a 30% (Eve, 2015) esperando mejore en algunos años. Los LEDs son de larga vida útil, bajo costo, y al ser LEDs fríos, no generan calor y daño en las plantas.

1.1.22 Espectros utilizados en la agricultura vertical

La radiación es un factor importante para el desarrollo de la planta y conocer de antemano el espectro principal que utilizan las plantas es necesario, para tomar decisiones a futuro si se utiliza de forma artificial. La luz diurna figura 1.10, está compuesta por todo el espectro de luz visible, cuenta con todas las longitudes de onda necesarias para las plantas, por otro lado observamos un espectro de luz LED blanco frío, que está en menor intensidad en algunas longitudes de onda, generando cambios en el metabolismo de la planta, y por ultimo un espectro de luz LED con mayor intensidad en longitudes de onda específicas para la planta, generando menores cambios a la luz LED blanca fría.



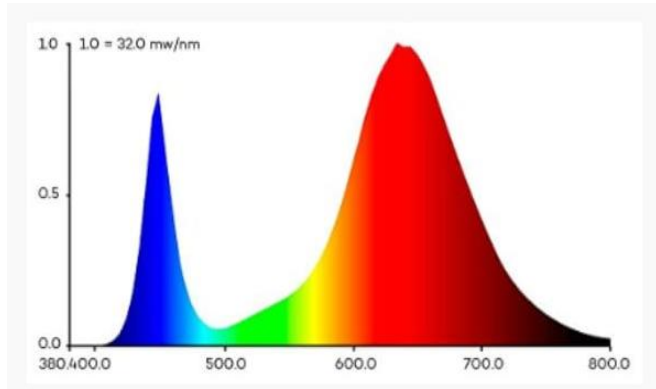


Figura 1.10 Espectro de luz natural diurna (a), espectro de luz LED especial para la agricultura (b), espectro de luz LED de uso común (c). Fuente google imágenes.

La demanda e importancia por obtener un espectro eficiente para el buen desarrollo de las plantas, ha llevado a las empresas que se dedicaban a producir LED's para uso común, ahora opten por formular espectros para cultivos de interior, por ejemplo la empresa Kroptek ha realizado pruebas internas e investigación académica, múltiples ensayos en varios tipos de plantas durante diferentes fases de crecimiento permitiendo recopilar los datos necesarios para perfeccionar una serie de 5 espectros, basados en las necesidades hortícolas más comunes. El espectro A que se muestra en la figura 1.11, muestra una gran versatilidad, superando el crecimiento de las plantas, es una luz blanca utilizada particularmente en plantas verdes, el espectro B se utiliza para cultivos florales y frutales donde se busca la pigmentación, el espectro C se diseñó especialmente para la etapa de crecimiento vegetativo y mencionan que también es utilizada con éxito para injertos, el espectro D, con luz roja alta y azul medio es utilizado para la etapa de floración de una planta, logrando un rápido crecimiento y formación de flores y frutos. El espectro E es una mezcla de la luz roja con luz azul creando la luz purpura, popularmente utilizada en salas de cultivo en las últimas décadas, también es ideal para acelerar la velocidad de floración o fructificación por ejemplo para cultivos de tomates, fresas u ornamentales.

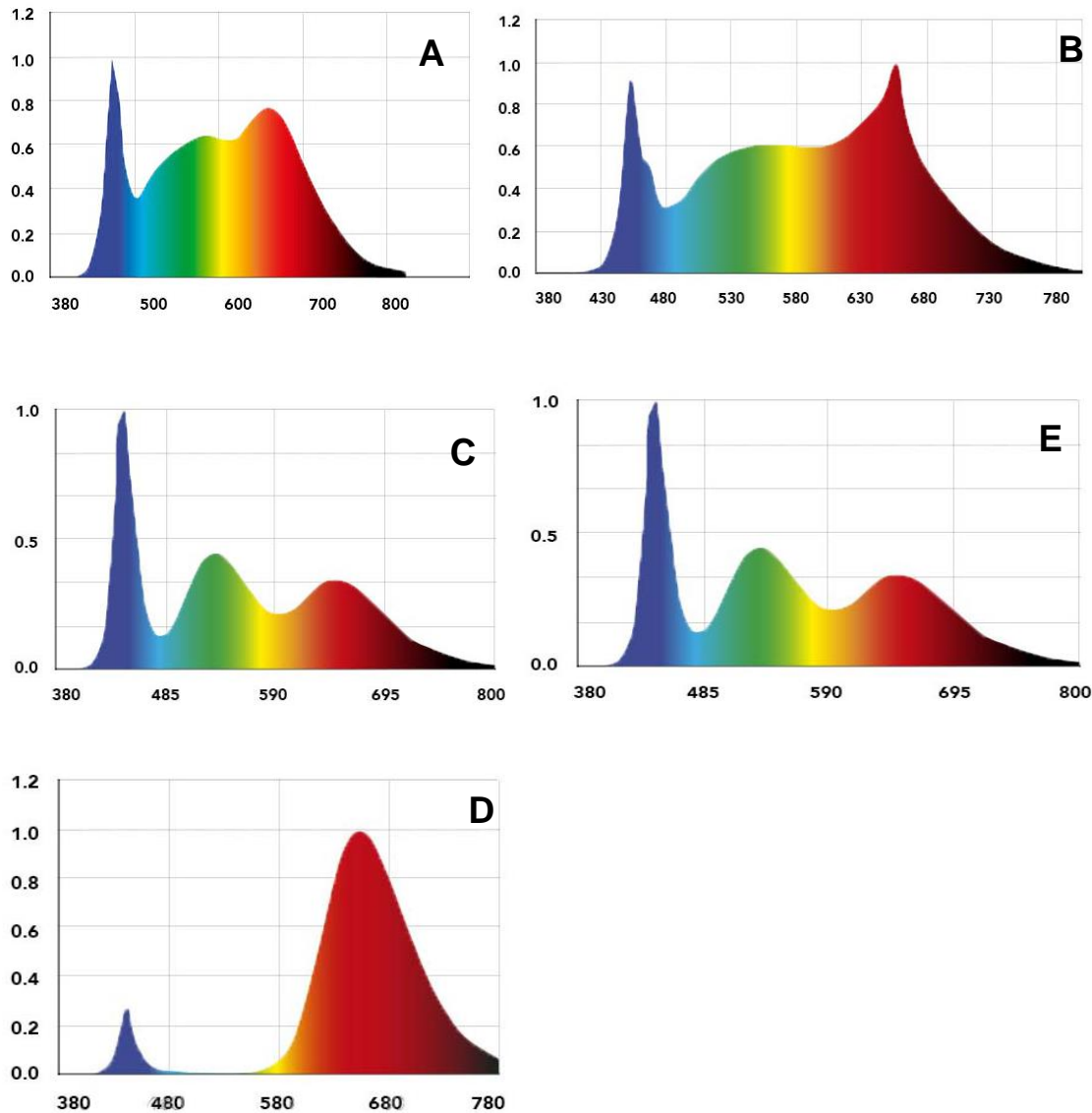


Figura 1.11 Espectros de luz LED optimizados para cada etapa de desarrollo en la planta de la marca Kroptek, A) espectro KP-4, B) espectro KP-8, C) espectro KP-1, D) espectro KP-2, E) espectro KP-3.

Cabe mencionar que cada empresa formula sus propios espectros de acuerdo a sus criterios, por lo que puede existir una gran diversidad de espectros en el mercado.

1.1.23 La luz como fuente de energía

La luz está compuesta por distintas zonas, la zona ultravioleta, la luz visible y zona infrarroja (Abe, 2010). La longitud de onda de la zona ultravioleta abarca de 100 a 400nm, la luz visible de 400 a 700nm y la zona infrarroja de 700 a 1000nm.

Para el caso de las plantas estas solo perciben la luz en la zona visible (400-700nm) y se conoce como PAR, Radiación Fotosintéticamente Activa (McCree, 1971), tienen la capacidad de percibir las variaciones e intensidades de la luz y su composición espectral (Fiorucci, 2017)

La luz se considera indispensable para el crecimiento de las plantas, actuando en distintos procesos metabólicos, considerándose primordial la fotosíntesis, en si la luz cumple distintos roles en la vida de una planta figura 1.12.

El primer rol de la luz es la fuente de energía para la síntesis de carbohidratos a través de la fotosíntesis, el segundo es una señal morfogénica para regular procesos y la tercera es una señal de reacciones bioquímicas dependientes de la luz (Berkovich *et al.*, 2017).

Las plantas cuentan con distintos fotorreceptores de luz, los fotosistemas P680 y P700, contienen pigmentos fotosintéticos llamados clorofilas que captan la luz del sol o artificial y generan un efecto dependiente como el rompimiento de la molécula de agua para generar ATP Y NADPH y a su vez generar moléculas de oxígeno (Yachandra *et al.*, 1996). Las clorofilas más abundantes son la clorofila a y la clorofila b (Shoaf *et al.*, 1976). A su vez existen pigmentos accesorios, llamados carotenoides y xantofilas, estos también absorben longitudes de onda de luz azul y verde, y ayudan en el proceso de la fotosíntesis a disipar el exceso de energía, fotoprotección, entre otros, (Frank, 1997).

Las respuestas a señales lumínicas como la calidad, cantidad y fotoperiodo se deben a fotorreceptores que actúan indirectamente al aparato fotosintético, y ayudan a que ocurra ciertas respuestas metabólicas y morfogenéticas en el crecimiento, desarrollo y productividad de las plantas. Estos fotorreceptores son los fitocromos (luz roja), criptocromos, fototropinas (azul y UV-A), y UV-R8 (UV-B), (Chen, 2004).

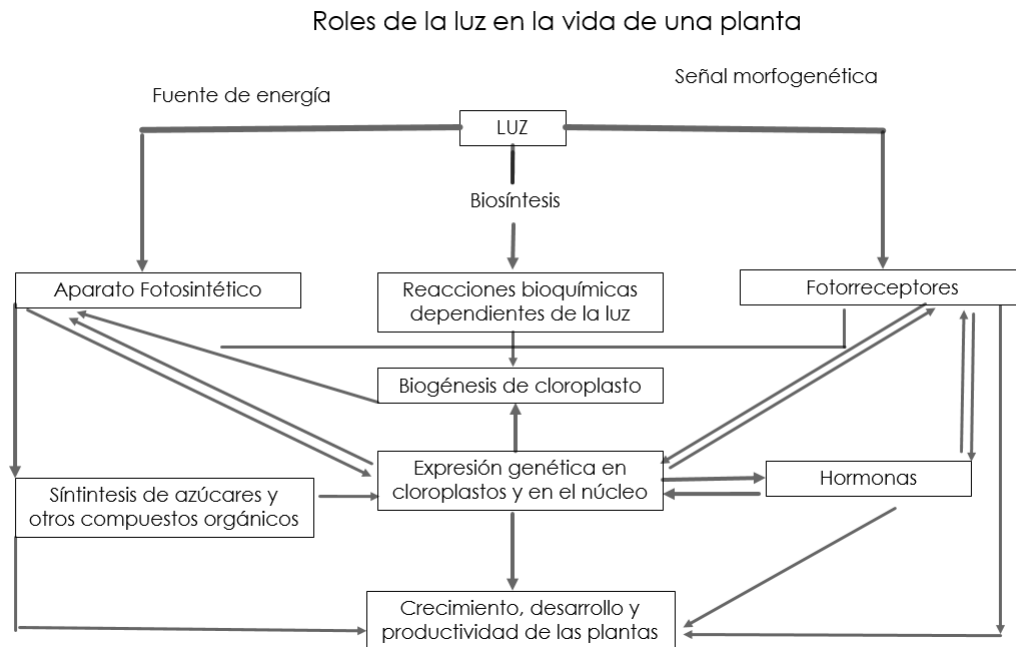


Figura 1.12 Roles de la luz en la vida de una planta. Fuente: Berkovich, et al., 2017.

1.1.23.1 Fitocromos

En respuesta a la señal de luz roja las moléculas de los fitocromos pueden actuar de un estado inactivo a activo o viceversa de activo Pfr a inactivo Pr y empezar una cascada de señalización, los fitocromos se encuentran en el citoplasma de forma inactiva, y de forma activa se trasladan al núcleo, actuando en el cambio de expresión de numerosos genes (Kircher *et al.*, 1999). Se conoce la participación de los fitocromos en procesos de germinación de semillas, floración, forma del fruto, desarrollo de plántulas, eliminación de etiolación, ritmos circadianos (Neff, 1998; Hennig, 1999; Guo, 1998) etapas primerizas de la biosíntesis de clorofilas y carotenoides, y traducción de proteínas del cloroplasto (Yamazaki, 2010)

1.1.23.2 Criptocromos

Los criptocromos son fotorreceptores de la luz azul-UV-A y se encuentran en el núcleo de las células. Los criptocromos median el control de la luz, elongación del tallo, expansión de la hoja, floración fotoperiódica y reloj circadiano (Lin, 2003).

En algunos de los casos los criptocromos actúan en conjunto con los fitocromos (Casal, 2000)

1.1.23.3 Fototropinas

Las fototropinas están asociados con la membrana celular (Lin 2003), median las respuestas de fotomovimiento, incluido el fototropismo, la reubicación de cloroplastos y la apertura de estomas (Briggs, 2002), el período de oscilación circadiano, floración y elongación del hipocótilo (Kim *et al.*, 2007).

1.1.23.4 UVR8

La señalización de la luz al fotorreceptor UVR8 inicia respuestas de estrés de la planta, como la biosíntesis de flavonoides, la inhibición del crecimiento del hipocótilo y supresión de la expansión de las células de las hojas (Jenkins, 2014).

1.1.24 Nanotecnología

La nanotecnología es el estudio y creación de materiales a nano escala. Su potencial es tal que se puede utilizar en diferentes campos incluso en la agricultura, optimizando los sistemas agroalimentarios (Buzea, 2007).

Desarrollando productos de uso agrícola y aminorando la huella de aplicaciones de productos químicos para la reducción y/o control de plagas y enfermedades, también se ha encontrado su aplicación de forma nutrimental mejorando el desarrollo de los cultivos en distintas etapas vegetativas o reproductivas (Khot *et al.*, 2012) y obtención de producciones más altas (Fraceto *et al.*, 2016).

Las nanopartículas metálicas por lo regular tienden a tener una actividad antimicrobiana (Lira-Sandoval, 2018), y efectos positivos en la germinación de semillas (Adhikari *et al.*, 2016).

Se han hecho innumerables estudios para conocer la concentración óptima para que estas sean aplicadas a las plantas, conocer su dosis adecuada así como la dosis toxica (Da Costa, 2016). La forma es que se aplican las nanopartículas también varía puede ser de forma foliar o a través de las raíces mediante riegos (López-Moreno, 2016).

La mayoría de los efectos apuntan a respuestas positivas en el desarrollo y crecimiento de las semillas y plantas con el uso de nanopartículas, beneficiando el sector primario de la agricultura, y prácticas más amigables con el medio ambiente al no generar un daño ambiental.

BIBLIOGRAFÍA

1.2 BIBLIOGRAFÍA

- Abe, R. (2010). Recent progress on photocatalytic and photoelectrochemical water splitting under visible light irradiation. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 11(4), 179–209 pp.
- Adhikari, T., Kundu, S., & Rao, A. (2016). Zinc delivery to plants through seed coating with nano-zinc oxide particles. *Journal of Plant Nutrition*, 39(1), 136-146 pp.
- Alejandro Moreno Reséndez, Juanita Aguilar Durón, Armando Luévano González (2011), CARACTERÍSTICAS DE LA AGRICULTURA PROTEGIDA Y SU ENTORNO EN MÉXICO. *REVISTA MEXICANA DE AGRONEGOCIOS*. 29, 763-774 pp.
- Al-Kodmany, Kheir. (2018). The Vertical Farm: A Review of Developments and Implications for the Vertical City. *Buildings*. 8. 24.
- American Spice Trade Association (1985). Official analytical methods of the American Spice Trade Association. 3rd ed. Amer. Spice Trade Assn., Englewood Cliffs, N.J
- Antonelli M, Burzo M.L., Pecorini G., Massi G., Landolfi R., Flex A. (2018). Scurvy as cause of purpura in the XXI century: a review on this ancient disease. *European Review for Medical and Pharmacological Sciences*, 22, 4355-4358 pp.
- Ayala V. H. D. (2002). Le Ik: Los chiles en Guatemala. *Journal of Experimental Botany* 54(388): 1655-1664 pp.
- Bennett, D.J., Kirby, G.W. (1968). Constitution and biosynthesis of capsaicin. *Journal of the Chemical Society C-Organic*, 4:442-446 pp.
- Berkovich, Yu., Konovalova, I.O., Smolyanina, S.O., Erokhin, A.N., Avercheva, Olga., Bassarskaya, Elizaveta., Kochetova, Galina., Zhigalova, Tatyana., Yakovleva, O.S., Tarakanov, I.G.. (2017). LED crop illumination inside space greenhouses. *REACH - Reviews in Human Space Exploration*. 6. 11.
- Bielinski M. Santos, Henner A. Obregón-Olivas, y Teresa P. Salamé-Donoso (2010). Producción de Hortalizas en Ambientes Protegidos: Estructuras para la Agricultura Protegida. IFAS extensión.
- Briggs WR, Christie JM. (2002). CRYPTOCHROME STRUCTURE/SIGNAL TRANSDUCTION 491 Phototropins 1 and 2: versatile plant blue-light receptors. *Trends Plant Sci*. 7:204–210 pp.
- Buzea, C., I.I. Pacheco, and K. Robbie (2007). Nanomaterials and nanoparticles: sources and toxicity. *Biointerphases* 2:17–71 pp.
- Casal JJ. (2000) Phytochromes, cryptochromes, phototropin: photoreceptor interactions in plants. *Photochem Photobiol*; 71(1):1-11 pp.
- CENTA (2019) CENTRO NACIONAL DE TECNOLOGÍA AGROPECUARIA Y FORESTAL. Guía Técnica para el Cultivo de Chile Dulce <http://www.centa.gob.sv/docs/guias/hortalizas/Guia%20Chile.pdf>

- Chen, Meng., Chory, Joanne., Fankhauser, Christian. (2004). Light Signal Transduction in Higher Plants. Annual review of genetics. 38. 87-117 pp.
- CONABIO (2011), 21809_especie.pdf (conabio.gob.mx)
- Da Costa, M., & Sharma, P. (2016). Effect of copper oxide nanoparticles on growth, morphology, photosynthesis, and antioxidant response in *Oryza sativa*. *Photosynthetica*, 54(1), 110-119 pp.
- Despommier, D. (2013). Farming up the city: The rise of urban vertical farms. *Trends Biotechnol.* 31, 388–389 pp.
- DÍAZ P., R. (2003). Distribución de geminivirus en la Península de Yucatán y estrategias moleculares para su control. Tesis de Doctorado. CINVESTAV-IPN. Unidad Irapuato. Irapuato, Gto. México. 118 p.
- DOF - Diario Oficial de la Federación (2010) declaratoria General de Protección de la Denominación de Origen Chile Habanero de la Península de Yucatán.
- Estrada B, Bernal M, Díaz J, Pomar F, Merino F (2000) Fruit development in *Capsicum annum*: changes in capsaicin, lignin, free phenolics, and peroxidase patterns. *J Agr Food Chem.* 48 (12), 6234–6239 pp.
- Eve, L. (2015). PlantLab Could Grow Fruit and Vegetables for the Entire World in a Space Smaller than Holland. *Inhabitat*. Available online: <http://inhabitat.com/dutch-company-plantlabs-agriculturalrevolution-could-grow-the-worlds-fruit-and-veg-in-a-space-smaller-than-holland/> (accessed 23 June, 2022)
- FAO. (1994). ECOCROP 1. The adaptability level of the FAO crop environmental requirements database. Versión 1.0. AGLS.FAO. Rome, Italy.
- Fiorucci, A.-S., Fankhauser, C. (2017). Plant strategies for enhancing access to sunlight. *Current Biology*, 27(17), R931–R940 pp.
- Flores López María L., Sánchez Osorio Ever. (2020). Entorno prodEn Metabolómica y cultivo del chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq) de la Península de Yucatán(332). Mérida, Yucatán: CIAT
- Fraceto, L., Grillo, R., de Medeiros, G., Scognamiglio, V., Rea, G., Bartolucci, C. (2016). Nanotechnology in Agriculture: which innovation potential does it have?. *Frontiers in Environmental Science*, 4(20), 1-5 pp.
- Frank, H., Desamero, Z., Farhoosh, R., Erickson, J., Bautista, J., (1997). On the photophysics and photochemical properties of carotenoids and their role as light-harvesting pigments in photosynthesis. *Pure and Applied Chemistry - PURE APPL CHEM.* 69. 2117-2124 pp.
- García Casas, K. D. (2018) DETERMINACIÓN DE CAPSAICINA Y CONSUMO DE AGUA DEL CHILE HABANERO *CAPSICUM CHINENSE* EN TRES SISTEMAS DE PRODUCCIÓN. [tesis de Maestría en Ciencias en, Centro Interdisciplinario de

- Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Durango] Repositorio Institucional-CIIDIR.
- GOB (2017). Chile Habanero, con Denominación de Origen | Fideicomiso de Riesgo Compartido | Gobierno | gob.mx (www.gob.mx)
- Guo, H., Yang, H., Mockler, T., Lin, Ch., (1998). Regulation of flowering time by Arabidopsis photoreceptors. *Science* 279, 1360–1363 pp.
- Hedenblad, E.; Olsson, M. Urban Growth Analysis of Crop Consumption and Development of a Conceptual Design to Increase Consumer Adoption of Vertical Greenhouses. Master's Thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2017. Available online: http://www.tekniskdesign.se/download/Hedenblad_Olsson.pdf.
- Hennig L., Poppe C., Unger S., Schäfer E. (1999) Control of hypocotyl elongation in Arabidopsis thaliana by photoreceptor interaction. *Planta*; 208(2):257-263 pp.
- Hernández-Zerega L.C. (2017). Compositional and phytochemical characterization of four improved varieties of Puerto Rico sweet chili pepper (*Capsicum chinense*). College of Agricultural Sciences: Department of Food Science and Technology. 7, 14-16 pp.
- INTAGRI. (2022). Cultivo de Chile Habanero. Serie Hortalizas, Núm. 32. Artículos Técnicos de INTAGRI. México. 5 p.<https://www.intagri.com/articulos/hortalizas/cultivo-de-chile-habanero>
- Iwai, K., T. Suzuki., H. Fujiwake. (1979). Formation and accumulation of pungent principle of hot pepper fruits, capsaicin and its analogues, in *Capsicum annum* L. var. *annuum* cv. 'Karayatsubusa' at different growth stages after flowering. *Agr. Biol. Chem.* 43:2493–2498 pp.
- Jenkins, G. I. (2014). The UV-B photoreceptor UVR8: From structure to physiology. *The Plant Cell Online*, 26(1), 21–37 pp.
- Judd, W., C.S. Campbell, E. Kellogg, P.F. Stevens. (1999). *Plant systematics. A phylogenetic approach*, p. 244–247 pp. Sinauer Associates, Inc., Sunderland, MA.
- Kalantari, F.; Tahir, O.M.; Joni, R.A.; Fatemi, E., (2017) Opportunities and Challenges in Sustainability of Vertical Farming: A Review. *J. Landsc. Ecol*, 2, 2.
- Kalantari, F., Nochian, A., Darkhani, F., Asif, N. (2020). The Significance of Vertical Farming Concept in ensuring Food Security for High-Density Urban Areas. 105-111 pp.
- Khot, L., Sankaran, S., Maja, J., Ehsani, R., Schuster, E. (2012). Applications of nanomaterials in agricultural production and crop protection: a review. *Crop Protection*, 35, 64-70 pp.
- Kim, W.-Y., Fujiwara, S., Suh, S.-S., Kim, J., Kim, Y., Han, L., et al. (2007). ZEITLUPE is a circadian photoreceptor stabilized by GIGANTEA in blue light. *Nature*, 449(7160), 356–360 pp.

- Kircher, Stefan & Kozma-Bognar, Laszlo & Kim, Lana & Ádám, Éva & Harter, Klaus & Schäfer, Eberhard & Nagy, Ferenc. (1999). Light Quality-Dependent Nuclear Import of the Plant Photoreceptors Phytochrome A and B. *The Plant cell*. 11. 1445-56 pp.
- Kirschbaum-Titze P., Hiepler C., Mueller-Seitz E., Petz M. (2002). Pungency in paprika (*Capsicum annuum*). 1. Decrease of capsaicinoid content following cellular disruption. *J. Agric. Food Chem.* 50 1260–1263 pp.
- Kroptek, (2021). *Expertos en el espectros lumínico*. Espectro lumínico LED para el cultivo - Kroptek | Sobre nuestra tecnología.
- Lin CT. (2002). Phototropin blue light receptors and lightinduced movement responses in plants. *Science* STKE2002:E5
- Lin, Chentao & Shalitin, Dror. (2003). Cryptochrome Structure and Signal Transduction. *Annual review of plant biology*. 54. 469-96 pp.
- Lira Saldivar, R. H., Méndez Argüello, B., De los Santos Villareal, G., Vera Reyes, I. (2018). Potencial de la nanotecnología en la agricultura. *Acta Universitaria*, 28 (2), 9-24 pp.
- López R. G. (2003). Chilli, la especia del nuevo mundo. *Ciencias* 69, 66-75 pp.
- López-Gómez, J. D.; Sotelo N., H.; Villegas-Torres, O. G.; Andrade R., M. (2020). Rendimiento y Calidad del Chile Habanero en Respuesta a la Poda de Conducción y Régimen Nutricional. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 11 (2): 315-325 pp.
- López-Moreno, M., Avilés, L., Pérez, N., Irizarry, B., Perales, O., CedenoMattei, Y., Román, F. (2016). Effect of cobalt ferrite (CoFe₂O₄) nanoparticles on the growth and development of *Lycopersicon lycopersicum* (tomato plants). *Science of the Total Environment*, 550, 45-52 pp.
- McCree, K. J. (1971). The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants. *Agricultural Meteorology*, 9, 191–216 pp.
- Neff, Michael & Chory, Joanne. (1998). Genetic Interactions between Phytochrome A, Phytochrome B, and Cryptochrome 1 during *Arabidopsis* Development. *Plant physiology*. 118. 27-35 pp.
- RAMÍREZ C., J. L.; DÍAZ P., R.; AVILÉS B., W. I. (1993). Mosquita blanca. *Bemisia tabaci* Genn. Avances de investigación en Yucatán. Folleto Técnico. INIFAP. CIRSE. Campo Experimental Zona Henequenera. Mérida, Yuc., 16 p.
- Ramírez, J. G., B. W, Avilés., E. R. Dzip. (2006). Áreas con Potencial Productivo para Chile Habanero (*Capsicum chinense*, Jacq) en el Estado de Yucatán. En: Primera Reunión Nacional de Innovación Agrícola y Forestal. INIFAP, COFUPRO, CICY, AMEAS y OTRAS INSTITUCIONES. Mérida, Yucatán, Mexico. 66 pp.
- Román López, A., Cabrera Rodarte, D., Catalán Valencia, E., Macías Rodríguez, H., Villa Castorena, M. y Inzunza Ibarra, M. (2014). Producción hidropónica de chile habanero

- en invernadero. Coyoacán, Mexico: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias
- Ruiz-Lau, N., Medina-Lara, F., & Martínez-Estévez, M. (2011). El chile habanero: su origen y usos. *Ciencia*, 70-77 pp.
- SAGARPA 2018, Amplían potencial de mercado a nivel internacional chiles y pimientos mexicanos | Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural | Gobierno | gob.mx (www.gob.mx)
- Segura- Campos M.R., Ramírez-Gómez K., Moguel- Ordoñez Y., Betancur-Ancona D. (2013). Polyphenols, Ascorbic Acid and Carotenoids Contents and Antioxidant Properties of Habanero Pepper (*Capsicum chinense*) Fruit. *Food and Nutrition Sciences*, 4, 47-54 pp.
- Shoaf, W. T., & Lium, B. W. (1976). Improved extraction of chlorophyll a and b from algae using dimethyl sulfoxide. *Limnology & Oceanography*, 21(6), 926–928 pp.
- SIAP. (2021). www.gob.mx/siap.
- Son, J. E., Kim, H. J., and Ahn, T. I. (2020). "Hydroponic systems," in: *Plant Factory: An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production, 2nd Edn*, eds T. Kozai, G. Niu, and M. Takagaki (Cambridge, MA: Academic Press), 273–283 pp.
- Soria F. M.; A. Trejo; J. Tun; R. Saldívar. (2002). Paquete tecnológico para la producción de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) SEP. SEIT. Instituto Tecnológico Agropecuario de Conkal, Yucatán. Pág. 1-21.
- Steiner, A. A. (1984). The universal nutrient solution. ISOSC. In: *Proceedings of 6th International Congress on Soilless Culture*. Lunteren, The Netherlands. 633-649 pp.
- Stewart, C., Jr., M, Mazourek, G.M. Stellari, M. O Connell, M. Jahn. (2007). Genetic control of pungency in *C. chinense* via the *Pun 1* locus. *J. Expt. Bot.* 58. 58:979-991 pp.
- Sung, Y., Y.Y. Chang, N.L. Ting (2005). Capsaicin biosynthesis in water stressed hot pepper fruits. *Botanical Bulletin of Academia Sinica* 46: 35-42 pp.
- The United Nations. *World Population Prospects: The 2017 Revision*; United Nations: New York, NY, USA, 2017.
- Tun D. J. de la C. (2001). Chile Habanero: Características y Tecnología de Producción. Centro de Investigación Regional del Sureste. Mocochoá, Yucatán. 5-17 pp.
- Vázquez-Flota, Miranda-Ham, M de L, Monforte-González, M., Gutiérrez- Carbajal, G., Velázquez- García, C., Nieto-Pelayo, Y. (2007). La biosíntesis de capsaicinoides, el principio picante del Chile. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 30 (4): 353-360 pp. Sociedad Mexicana de Fitogenética, A.C. México.

- Villa C. M., E. A. Catalán V., M. A. Inzunza I. A. Román L. y H. Macías R. (2010). Población de plantas y manejo de la solución nutrimental del chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) en invernadero. XXII Semana Internacional de Agronomía. pp. 569-573 pp.
- Villa C. M., E. A. Catalán V., M. A. Inzunza I. A. Román L. y H. Macías R. (2011). Fitorreguladores del crecimiento y nutrición de plantas de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) en invernadero. AGROFAZ: 7-11 pp.
- W. I. Avilés B, J. Jasso A., R. Guerrero M. (2021). EVALUACIÓN DE HERBICIDAS PARA EL CONTROL DE MALEZA EN CHILE HABANERO (*Capsicum chinense* Jacq.) EN EL ESTADO DE YUCATÁN, MÉXICO. Memoria del XLII CONGRESO NACIONAL DE LA CIENCIA DE LA MALEZA. Pag 65-74 pp.
- Waldron, Diana. (2018). Evolution of vertical farms and the development of a simulation methodology. WIT Transactions on Ecology and the Environment. 217. 975-986 pp.
- Wong, Chui & Teo Zhi Wei, Norman & Shen, Lisha & Yu, Hao. (2020). Seeing the lights for leafy greens in indoor vertical farming. Trends in Food Science & Technology. 106. 48-63 pp.
- Xing, F., Cheng, G., Yi, K., (2006). Study on the antimicrobial activities of the capsaicin microcapsules. J. Appl. Polym. Sci 102, 1318–1321 pp.
- Yachandra, V. K., Sauer, K., & Klein, M. P. (1996). Manganese cluster in photosynthesis: Where plants oxidize water to dioxygen. Chemical Reviews, 96(7), 2927–2950 pp.
- Yamazaki, Jun-ya. (2010). Is light quality involved in the regulation of the photosynthetic apparatus in attached rice leaves?. Photosynthesis research. 105. 63-71 pp.
- Zamski, E., O. Shoham, D. Palevitch, A. Levy. (1987). Ultrastructure of capsaicinoids-secreting cells in pungent and non-pungent red pepper (*Capsicum annuum* L.) cultivars. Bot. Gaz. 148:1–6 pp.
- Zewdie, Y., P.W. Bosland. (2000). Evaluation of genotype, environment, and genotype-byenvironment interaction for capsaicinoids in *Capsicum annuum* L. Euphytica 111:185–190 pp.

CAPÍTULO II

EL EFECTO DE DIFERENTES LONGITUDES DE ONDA EN EL
DESARROLLO VEGETATIVO

RESUMEN

2.1 RESUMEN

El chile habanero podría desarrollarse en un sistema controlado que consiste en el uso de luz LED como fuente de energía artificial en sistema aeropónico de interior, en el cual los nutrientes provienen de una disolución acuosa que es asperjada periódicamente a las raíces colgantes. Las ventajas de este sistema es la reducción de consumo de agua, nutriente, pesticida, así como el control de temperatura, pH, C.E., humedad. Se tiene muy poca información acerca del crecimiento de plantas chile habanero en ambiente controlado así como los efectos en su desarrollo fenológico y anatómico. Por lo que el objetivo del presente trabajo fue evaluar la respuesta sobre el desarrollo de plantas y los cambios anatómicos de hojas de chile habanero en un sistema aeropónico con diferentes longitudes de onda de luz LED. La investigación se desarrolló en el laboratorio de Biotecnología vegetal, en el área de posgrado del Instituto Tecnológico de Tlajomulco. Se utilizó un diseño completamente al azar con cuatro tratamientos, y seis repeticiones. Se sembró semilla de chile habanero *in vitro*, se trasplantaron en el sistema aeropónico con luz LED, los tratamientos fueron: azul (472nm), roja 685 (nm), mezcla de azul y roja (mix 578nm) y blanca (espectro visible 535nm). Las variables evaluadas fueron longitud de raíz, longitud y diámetro de tallo y número de hojas así como la concentración de clorofilas totales con dos equipos diferentes (SPAD-502 y espectrofotómetro). Estructura anatómica transversal de hojas y número de estomas. Se logró adaptar las plántulas *in vitro* en un sistema aeropónico con luz LED. La luz LED roja favoreció el crecimiento de la planta, y concentración de clorofilas totales. La luz LED Azul indujo un crecimiento más compacto en la planta mismo que se reflejó en una concentración baja de clorofilas totales y número de estomas, por el contrario la irradiancia de luz LED blanca incremento el número de estomas en el envés de la hoja. Se encontraron diferencias anatómicas en los cortes transversales de las hojas, la luz blanca fue el único tratamiento que logro inducir la floración. En conclusión los diferentes espectros de luz LED condujeron un cambio en las las distintas variables de desarrollo vegetativo de la planta, y solo con luz LED blanca las plantas propiciaron a desarrollar flores, sin embargo no fructificaron.

INTRODUCCIÓN

2.2 INTRODUCCIÓN

El cultivo de chile habanero es un cultivo de alta importancia económica derivado a todos los subproductos que se obtienen de sus metabolitos secundarios en especial de los capsaicinoides. Los nuevos sistemas de producción como es la aeroponía y la tecnología de luz LED da hincapié a producir de una forma más amigable con el medio ambiente, disminuyendo costos de insumos, y gasto de agua.

La luz es indispensable para el desarrollo y crecimiento de una planta, y al ser sustituido por luz artificial causa efectos fotosintéticos, morfológicos, y cambios en la estructura anatómica de las hojas.

La luz artificial ha abierto un nuevo campo en la investigación evaluando los beneficios de los LED's en la horticultura. Es importante conocer que parte del espectro electromagnético se va evaluar, cuanta energía es emitida y que efecto tiene sobre las plantas.

Al no contar con información del tipo de espectro que necesita el cultivo de chile habanero para desarrollarse y llegar a la etapa de fructificación, se pretende con este trabajo evaluar longitudes de onda monocromática, dicromática así como todo el espectro de luz visible, y capturar si hay diferencias entre los espectros hacia las plantas.

OBJETIVOS E HIPOTESIS

2.3 OBJETIVO 1

Cultivar chile habanero en un sistema aeropónico con diferentes longitudes de luz LED

2.3.1 Objetivos específicos

- Obtención de plántulas *in vitro* de chile habanero y su adaptación *ex vitro* a un sistema aeropónico, utilizando diferentes longitudes de onda de luz LED (azul, roja, blanco y mix)
- Evaluar el efecto de diferentes longitudes de onda de luz LED en el desarrollo fenológico vegetativo, incluyendo contenido de clorofila, anatomía de la hoja y frecuencia estomática, en plantas de chile habanero en sistema aeropónico
- Evaluar el efecto de las diferentes longitudes de onda de luz LED en la etapa generativa de chile habanero en sistema aeropónico.

2.4 HIPÓTESIS

Las diferentes longitudes de onda de luz LED permitirán el desarrollo vegetativo del cultivo de chile habanero en sistema aeropónico.

MATERIALES Y MÉTODOS

2.5 MATERIALES Y MÉTODOS

2.5.1 Ubicación

El presente trabajo se realizó en las instalaciones del Instituto Tecnológico de Tlajomulco, ubicado en el municipio de Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco, México. El municipio de Tlajomulco se localiza en la porción media de la región centro del estado, en las coordenadas 20° 28' de latitud norte y 103° 27' de longitud oeste, a una altura de 1,575 metros sobre el nivel del mar. El clima del municipio es semiseco con invierno y primavera secos, y semicálidos sin estación invernal definida. La temperatura media anual es de 19.7° C, y tiene una precipitación media anual de 821.9 milímetros. Los vientos dominantes son de dirección norte. El promedio de días con heladas al año es de 4.3.

El laboratorio de Biotecnología vegetal ubicado en el área de postgrado, dentro de las instalaciones del instituto cuenta con un área específica, para llevar a cabo el desarrollo de los cultivos, con temperaturas regulables, así como agua y luz LED necesaria para la óptima producción de cualquier cultivo mediante infraestructura de tipo vertical.

2.5.2 Material vegetal

Para la siembra se utilizaron semillas de chile habanero de la marca HIT de Bodega Aurrera.

2.5.3 Esterilización y siembra de material vegetal

Las semillas de chile habanero (*Capsicum chinense* spp.) fueron desinfectadas en la campana de flujo laminar realizando la desinfección con 2 gotas de tween 20 y cloro comercial al 1% (6ml) por 30 minutos en agitación, posteriormente se realizaron tres lavados con agua destilada estéril, al terminar, las semillas se colocaron en una caja Petri con papel estéril, después con el uso de pinzas se situaron las semillas en los frascos con medio MS (Murashige & Skoog, 1969), sin hormona, y por último se sellaron los frascos con parafilm. Se incubó en la cámara de cultivo a 25°C por 20 días para el día del trasplante o hasta haber obtenido una plántula con dos hojas verdaderas.

2.5.4 Diseño de reactor aeropónico

El sistema consistió en una cabina cerrada con puertas corredizas (para evitar la entrada de contaminantes y luz) donde divide la parte aérea de la planta (tallos, ramas y hojas) a la parte

radicular. La parte aérea está compuesta por un techo donde se colocaron 16 focos de la marca HUE Philips (White and color ambiance, 10W, 800 lumen), para ser la fuente de luz artificial que requieren las plantas, la parte que divide estas dos áreas, (aérea, y radicular) era una tapa de plástico duro, con 28 orificios donde se colocaron los canastos tipo hidropónicos, y dentro de ellos una esponja para ser el soporte de la planta. El área donde se colocó la raíz era una caja plástica de color negro, en donde se encontraba un sistema de riego compuesto por cintilla y aspersores, con entrada y salida de agua. La parte del tanque y bomba se colocaron en la parte inferior de la cabina, y con ayuda de tubería de material pvc, este llegaba a la parte de la caja, se utilizaron temporizadores para el control de los riegos y de la luz.

2.5.5 Trasplante

El trasplante se realizó a los 20 días después de la siembra, se colocaron en el sistema aeropónico, donde se adaptaron por un periodo de siete días en luz LED blanca con un fotoperiodo de 12 horas luz, 12 horas oscuridad y riego únicamente con agua purificada temporizado a 1 min por hora y una temperatura de 25 a 30°C.

2.5.6 Tratamientos de luz LED

Transcurrido el tiempo de adaptación de las plántulas, se procedió a colocar los tratamientos de luz LED, se colocó papel unisel cubierto con papel aluminio para dividir los cuatro tratamientos, cada tratamiento se colocó seis plantas, los colores a utilizar en cada tratamiento fueron:

Luz azul - 472.5nm

Luz roja – 685nm

Luz blanca – 535nm

Luz mix (combinación de luz roja y azul) – 578.75nm

Los cuales fueron igualados en energía con respecto a la luz azul, debido a que la energía de los focos utilizados era menor en este.

Cuadro 2.1 Tratamientos aplicados con distintas longitudes de onda de luz LED a plantas en el sistema aerónico.

Tratamiento	Longitud de onda	Irradiancia $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$	Número de plantas
1	Azul	25	6
2	Rojo	45	
3	Blanca	35	
4	Mix (Azul:rojo)	38	

2.5.7 Solución nutritiva

La solución nutritiva que se utilizó para este experimento fue la descrita por Villas, (2010, 2011) desarrollada en el INIFAP.

Cuadro 2.2 Solución nutritiva hidropónica para el crecimiento y desarrollo de plantas de chile habanero.

Período de desarrollo	Solución nutricional (meq L ⁻¹)	Concentración	Iones					
			NO ₃ ⁻	H ₂ PO ₄	SO ₄ ²⁻	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
Trasplante a inicio de floración	15	%	0.75	0.15	0.10	0.34	0.42	0.24
		Meq L ⁻¹	11.25	2.25	1.50	5.10	6.30	3.60

Con respecto al cuadro 2.3 se pueden obtener las cantidades de cada fertilizante para preparar 20 litros de solución. Esto se obtuvo multiplicando los meq L⁻¹ requeridos de cada fertilizante por el peso equivalente del fertilizante, para darnos la cantidad que se requiere en 1000 litros de solución, y por

ultimo este se divide entre 1000 para darnos la cantidad por litro y se multiplica por los 20 litros que se requieren como se tiene en el siguiente cuadro.

Cuadro 2.3 Nutrientes utilizados en unidades de mEq y su equivalencia en gramos por litro.

Fertilizante	Peso del fertilizante 1 meq L ⁻¹	Solución Inifap meq L ⁻¹	Mezcla final g 20 L ⁻¹
Ca (NO ₃) ₂ .2H ₂ O	100	6.30	12.6
KNO ₃	101	4.95	9.8
NH ₄ NO ₃	115	2.25	5.18
K ₂ SO ₄	87	0.15	0.26
MgSO ₄	60	3.60	4.32

Para cubrir el requerimiento de micro nutrientes se utilizó un mix de micros de la marca Az Micros agregando 0.60g en 20 litros.

El pH se mantuvo de 6 a 6.5 y la CE de 1.5 a 1.8 mS/cm

2.5.8 Variables fenológicas vegetativas de la planta

Las variables se tomaron semanalmente desde la primera hasta la octava semana, las mediciones se hicieron en unidades milimétricas con el uso de un Calibrador Vernier Digital Lcd pie de Rey Steren Her-411, las variables que se tomaron en cuenta fueron:

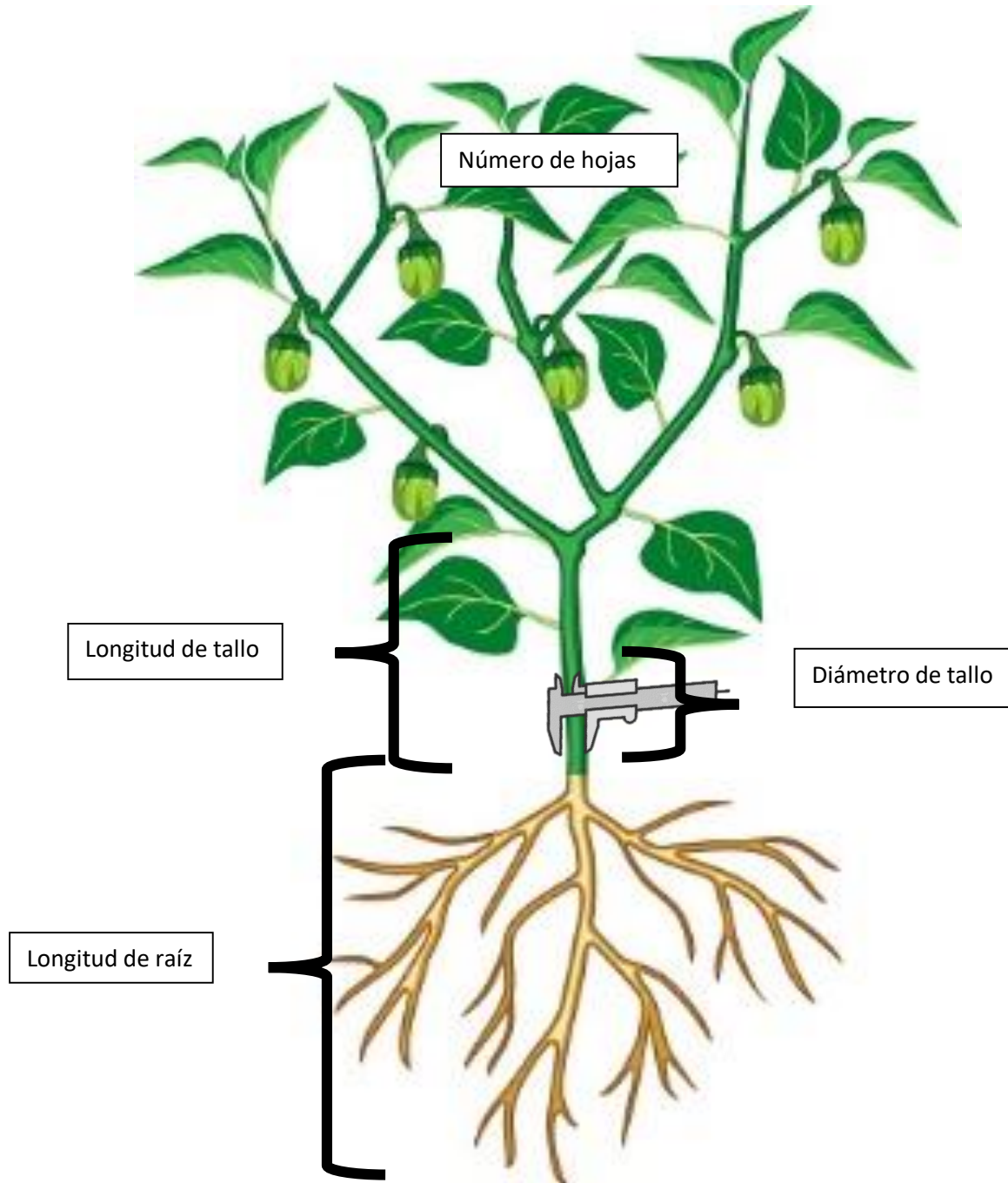


Figura 2.1 Variables fenológicas vegetativas de la planta.

2.5.9 Variables anatómicas de la hoja

2.5.9.1 Número de estomas

Se utilizó la metodología de Barrientos (2003) Para la observación de estomas a través del método de impresiones epidérmicas con esmalte transparente, se seleccionó una hoja completamente desarrollada de cada tratamiento de luz LED, a las cuales se les colocó esmalte en el envés de la hoja y se esperó hasta que se secó (20 minutos aprox.) después se retiró cuidadosamente el esmalte de la hoja, la impresión obtenida se cortó en una medida de 0.5mm x 0.7mm con el uso de navaja y se observó bajo el microscopio de la marca LEICA proporcionado por el área de microscopia en el laboratorio de biotecnología vegetal con el objetivo de 40X para el conteo de los estomas.

2.5.9.2 Cortes anatómicos de la hoja

Para la observación de los cortes anatómicos de la hoja se seleccionó la segunda hoja de cada planta por tratamiento. El corte se realizó en la parte media de la hoja (Figura 2.2) de manera manual con el uso de navajas para uso de micrótopo. Las muestras fueron colocadas en portaobjetos agregando una gota de agua para evitar la deshidratación de la muestra, posteriormente se colocó el cubre objetos y se observó bajo el microscopio de la marca LEICA proporcionado por el área de microscopia en el laboratorio de Biotecnología vegetal con el objetivo de 40X para observar la estructura de clorofilas, parénquima empalizado y el parénquima esponjoso.



Figura 2.2 Selección del área específica para realizar cortes transversales en la hoja.

2.5.10 Determinación de clorofila

2.5.10. 1 Espectrofotómetro

La metodología se basó en Val et al., (1985) con modificaciones, se pesó 5 gramos de muestra de hoja en peso fresco (hojas de la parte media de la planta), utilizando como solvente acetona (5 ml) y una pequeña cantidad de ácido ascórbico, se trituro la muestra en un mortero (Figura 2.3) y se centrifugo a 10,000 rpm por dos minutos. Se realizaron lecturas de absorbancias a 662nm (Cl a), 645nm (Cl b), los valores obtenidos fueron sometidos a las ecuaciones descritas por la metodología.

$$\text{Cl a } (\mu\text{g.ml}^{-1}) = 10.81 \text{ Abs } 662 - 0.75 \text{ Abs } 645$$

$$\text{Cl b } (\mu\text{g.ml}^{-1}) = 19.02 \text{ Abs } 645 - 3.98 \text{ Abs } 662$$

$$\text{Cl t } (\mu\text{g.ml}^{-1}) = 6.83 \text{ Abs } 662 + 18.27 \text{ Abs } 645$$



Figura 2.3 Selección de hojas y macerado para determinación de clorofila.

2.5.10.2 SPAD-502

Los valores en unidades SPAD se realizaron en 4 hojas de cada tratamiento, plantas diferentes, en la parte media de la planta, promediando los valores obtenidos.

2.5.11 Diseño experimental

El experimento se estableció en un diseño completamente al azar. Los datos se sometieron a un análisis de varianza (ANOVA), a la prueba de comparación de medias de Tuckey ($P < 0.05$) en un software estadístico InfoStat.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de esta investigación se basan en las diferencias entre cuatro tratamientos de luces LED con distinta irradiancia pero equivalentes en energía aplicados como luz artificial, evaluando el efecto en el crecimiento y desarrollo de plantas de chile habanero y concentración de compuestos fitoquímicos, en condiciones de aeroponía.

2.6.1 Variables de crecimiento de la planta

2.6.1.1 Longitud de tallo

Los resultados de la gráfica 2.4 ilustran el efecto de la luz al paso de las semanas en la variable de la longitud del tallo, desde el inicio hasta la cuarta semana no mostró diferencia entre los tratamientos, fue hasta la quinta semana que se observó un efecto sobresaliente de la luz blanca (84.53mm) y luz mix (84.55mm), con un mayor desarrollo, seguido de la luz roja (70.25mm) y por último la luz azul (51 mm), continuando en aumento esta tendencia hasta la octava semana. Se tiene descrito un crecimiento más compacto o de menor altura a plantas que se desarrollaron en luz azul (Berkovich et al., 2017). Al aplicar un porcentaje de luz roja esta promueve la elongación en las plantas, y esto se ve reflejado en un aumento en el crecimiento del tallo.

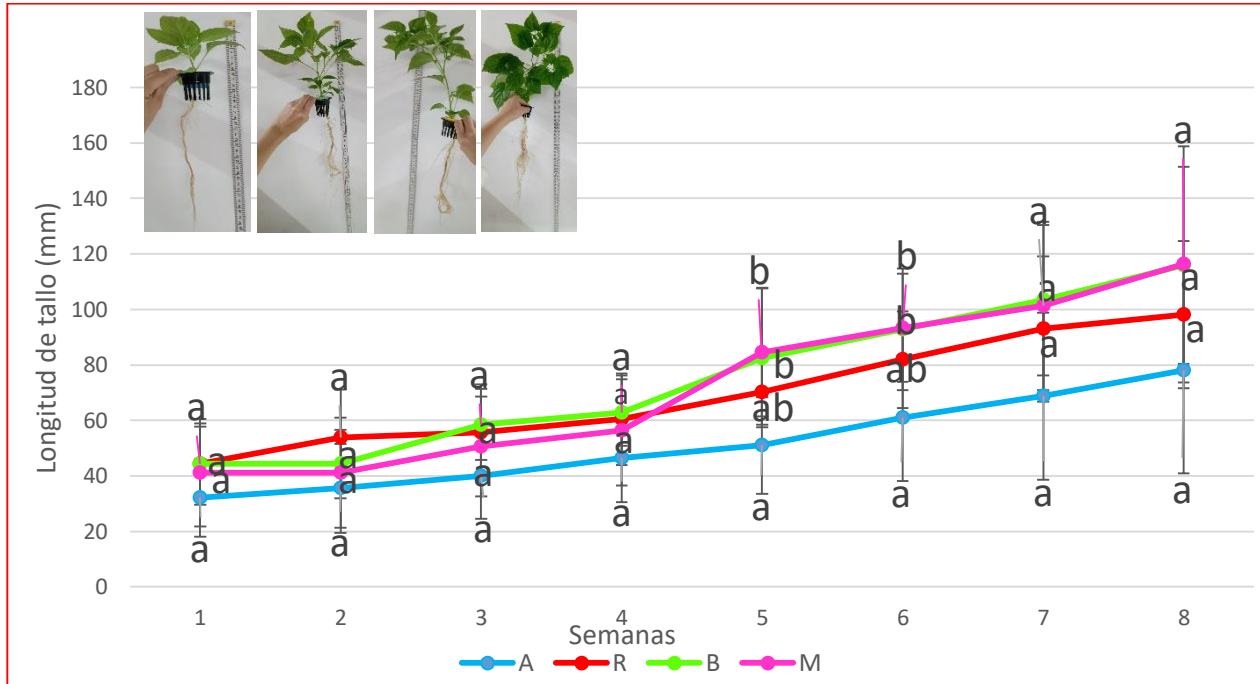


Figura 2.4 Efecto de las diferentes longitudes de onda de luz LED (A=azul, R=rojo, B=blanco y M=mix) en la longitud del tallo, durante un periodo de ocho semanas. Letras diferentes significan tratamientos con diferencia significativa de acuerdo al método de comparación de medias Tuckey ANOVA ($p < 0.05$).

2.6.1.2 Diámetro de tallo

Algo similar sucedió con la variable del diámetro del tallo (Figura 2.5) coincidiendo en no mostrar algún efecto del tipo de luz en las primeras cuatro semanas, fue a partir de la quinta semana donde se observa un aumento en el diámetro del tallo en los tratamientos de luz roja (2.3mm) y blanca (2.2mm), disminuyendo en la luz mix (1.96mm), y en menor tamaño la luz azul (1.71mm), para la sexta semana los tres primeros tratamientos obtuvieron un promedio de 2.7mm cada uno, sin embargo la luz azul fue estadísticamente diferente con un promedio de 1.9 mm. Mendoza-Paredes, (2021) comparó diferentes composiciones espectrales de luz azul con luz roja aplicando una irradiancia de $241 \mu\text{mol m}^{-2}\text{S}^{-1}$ y un testigo de luz fluorescente, sin embargo no mostró diferencias entre sus tratamientos.

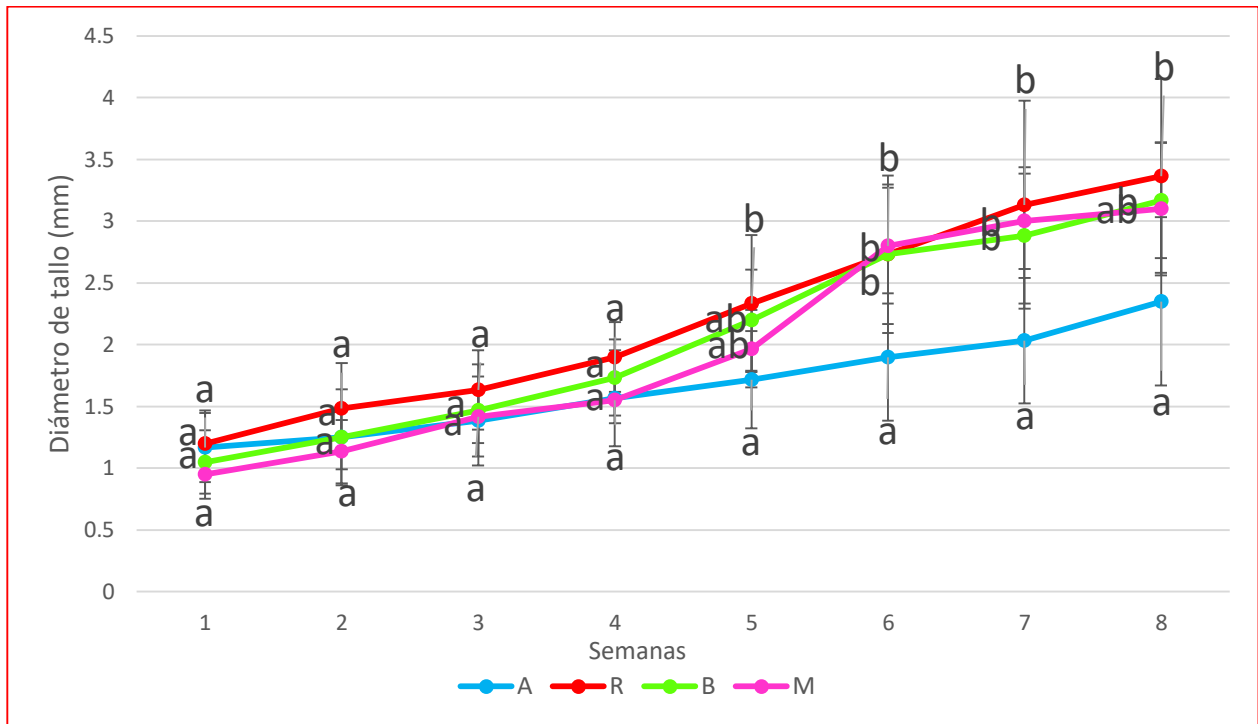


Figura 2.5 Efecto de los diferentes espectros de luz LED (A=azul, R=rojo, B=blanco y M=mix) en la diámetro del tallo durante un periodo de ocho semanas. Letras diferentes significan tratamientos con diferencia significativa de acuerdo al método de comparación de medias Tuckey ANOVA ($p < 0.05$).

2.6.1.3 Longitud de la raíz

La longitud de raíz mostró diferencias desde la primera semana (Figura 2.6), la luz roja aumentó el crecimiento de la raíz, seguido por la luz mix, blanco y por último la luz azul, para la octava semana la longitud de la raíz de las plantas irradiadas con la luz mix fue estadísticamente diferentes a las raíces bajo la luz roja y blanca, y diferentes estos tratamientos, a la luz azul (238mm) donde se observó un crecimiento menor de la raíz. XU *et al.*, (2019) evaluaron seis tratamientos de espectros en diferentes proporciones, el mayor desarrollo de la raíz fue dado por el tratamiento 8R1B1P1G, lo que indica que la luz compuesta por rojo-azul-púrpura-verde estimula el enraizamiento de plántulas de cultivo de tejidos de *C. lanceolata*. Se tiene conocimiento que la luz azul, a través de su fotorreceptor llamados criptocromos tanto cry1 como cry2, inhibe el crecimiento de las raíces y reduce los niveles de auxina (Zeng *et al.*, 2010).

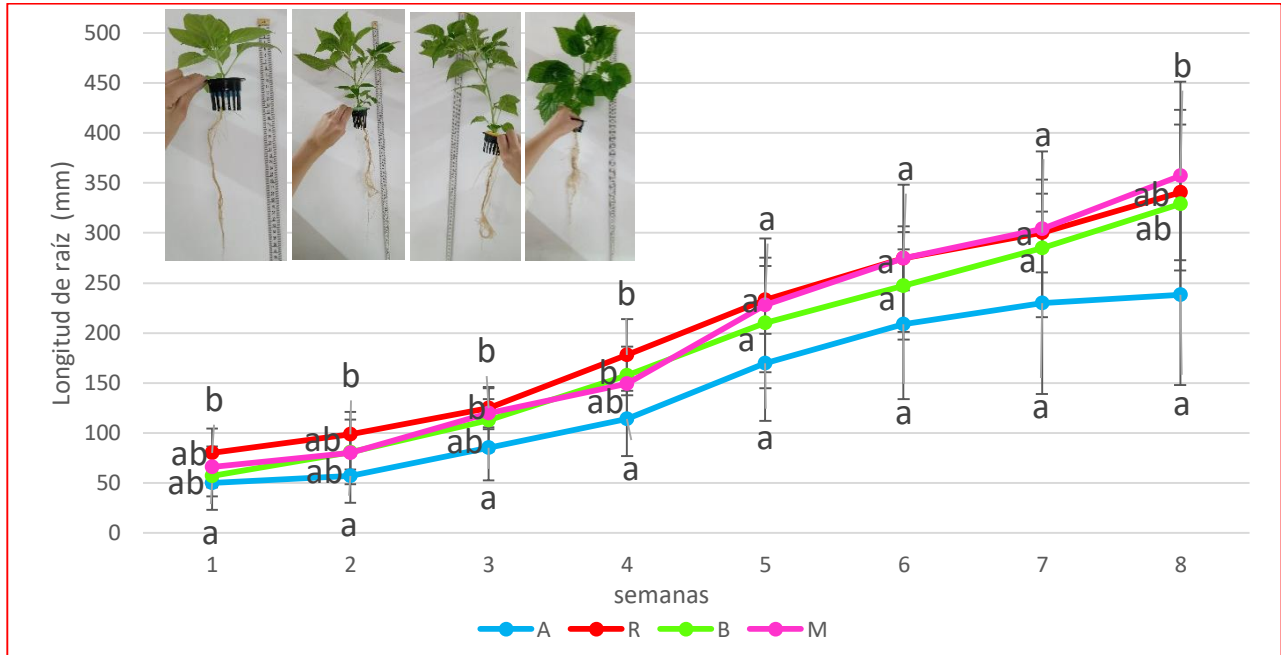


Figura 2.6 Efecto de las diferentes longitudes de onda de luz LED (A=azul, R=rojo, B=blanco y M=mix) en la longitud de la raíz durante un periodo de ocho semanas. Letras diferentes significan tratamientos con diferencia significativa de acuerdo al método de comparación de medias Tuckey ANOVA ($p < 0.05$).

2.6.1.4 Número de hojas

El número de hojas de las plantas crecidas en los diferentes tratamientos no mostró diferencias significativas las primeras cinco semanas (Figura 2.7), los cambios comenzaron a ser notorios hasta la quinta semana como en la mayoría de las variables ya evaluadas. En la última semana se observó un mayor número de hojas en las plantas tratadas con la longitud de onda de color rojo. Maiza, (2019) observó un incremento en el número de hojas en Pak choi con luz LED blanca en comparación de los otros espectros utilizados con una diferencia de 4 hojas a los 14 días, mientras que los otros tratamientos solo se habían desarrollado 2 hojas. Esto indica que para cada cultivo el efecto o del espectro es diferente en cuanto a la producción de hojas, algunas necesitan de todo el espectro, mientras que para otras especies es suficiente uno solo.

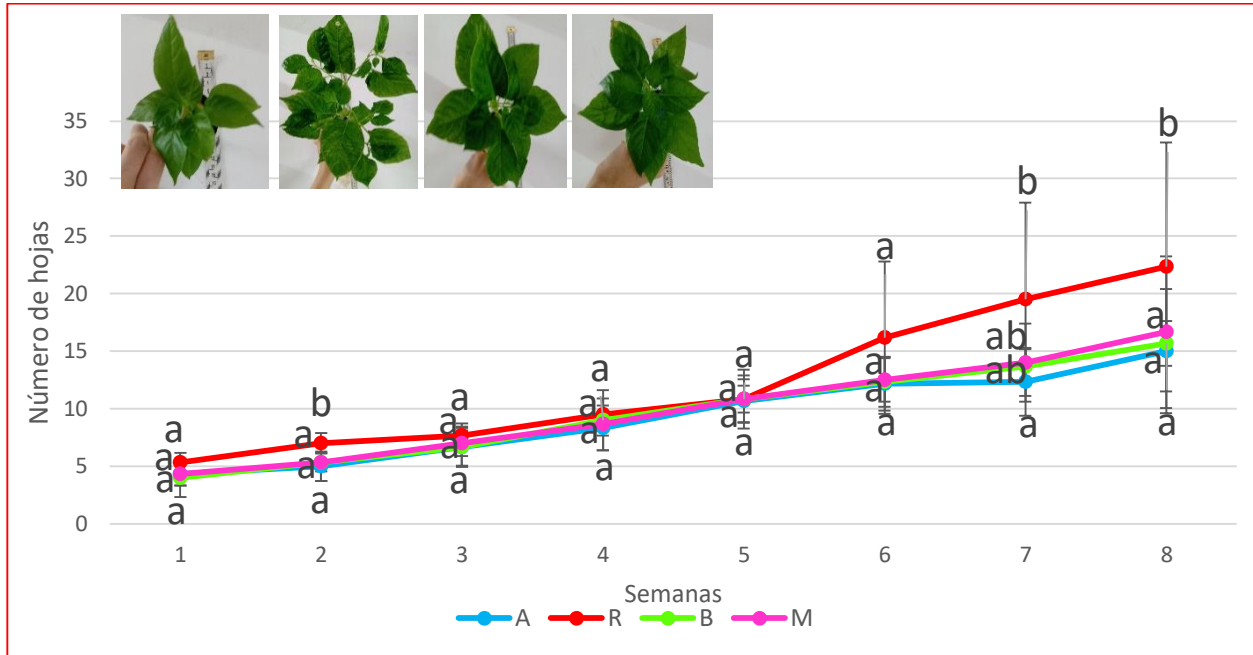


Figura 2.7 Efecto de las diferentes longitudes de onda de luz LED (A=azul, R=rojo, B=blanco y M=mix) en el número de hojas, durante un periodo de ocho semanas. Letras diferentes significan tratamientos con diferencia significativa de acuerdo al método de comparación de medias Tuckey ANOVA ($p < 0.05$).

2.6.2 Variables anatómicas de la hoja

2.6.2.1 Número de estomas

En este resultado se observó diferencias estadísticas entre los distintos tratamientos de longitudes de onda de luz LED en el número de estomas en el envés de la hoja (Cuadro 2.4), la luz azul fue el tratamiento con menor cantidad de estomas (58), mientras que con la luz roja incremento en un aumento de estomas (90), en las hojas irradiadas con luz mix se observaron más estomas (112) pero el mayor número de estomas se observaron en la luz blanca (166) de un tamaño más pequeño, visualmente se aprecia en la figura 2.8 los estomas en el envés de la hoja que estaban bajo las diferentes longitudes de onda de luz LED. Mendoza-paredes (2021), evaluó y cuantificó los estomas en hojas de chile habanero, la mayor cantidad de estomas (159 estomas) se observaron en plantas del tratamiento de luz azul:roja (76%/25.4%) en una intensidad de $241 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$, y la menor cantidad en las plantas con el tratamiento de luz azul (88 estomas) en la misma intensidad ($241 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$).

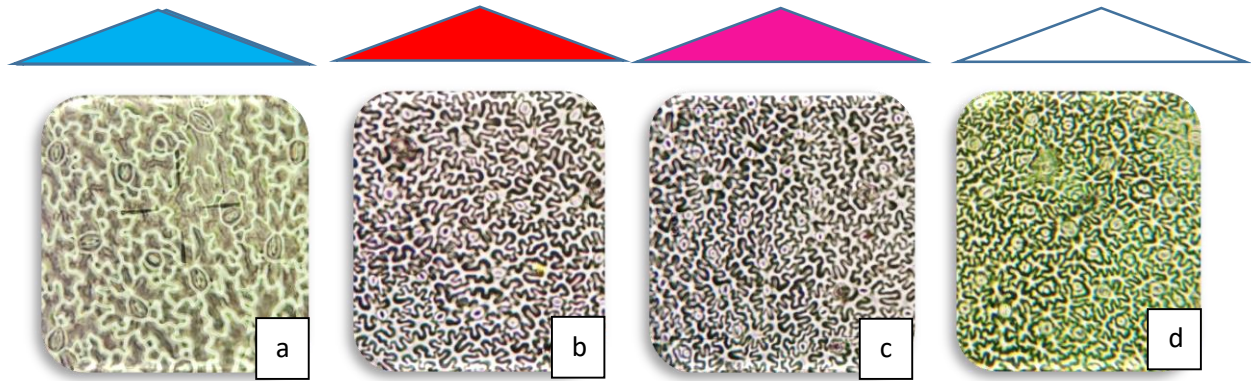


Figura 2.8 Efecto de las diferentes longitudes de onda de luz LED (azul, rojo, blanco y mix) en el número de los estomas en el envés de las hojas de chile habanero.

Nuestros resultados y los de Mendoza-Paredes (2020) muestran que las plantas irradiadas con luz azul en ambos experimentos no fomentaron el máximo número de estomas. Salisbury (1928) señala que el aplicar irradiancias más altas de luz, mayor es el número de estomas en las hojas, en comparación con irradiancias bajas. Casson (2009), explica que la estimulación de la luz en el desarrollo estomático está mediada por fotorreceptores de plantas, principalmente el fotorreceptor de luz roja fitocromo B (phyB) que tiene un papel dominante en la luz blanca, esto podría explicar por qué las plantas con luz blanca incrementaron el número de estomas en las hojas.

Cuadro 2.4 Efecto de las diferentes longitudes de onda de luz LED (azul, rojo, blanco y mix) en el número de estomas en un área de 0.7mm x 0.5mm. Letras diferentes significan tratamientos con diferencia significativa de acuerdo al método de comparación de medias tuckey ANOVA ($p < 0.05$).

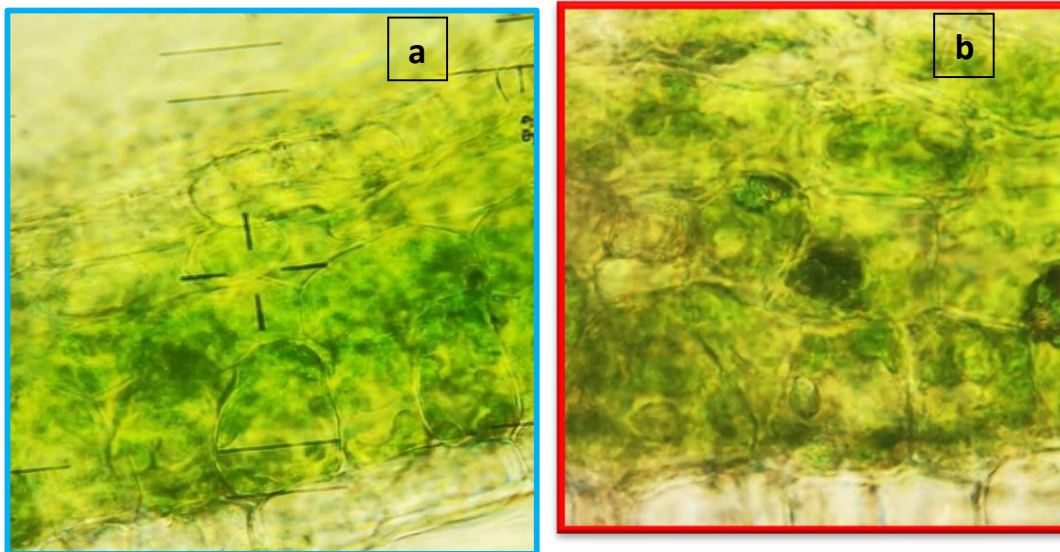
Tratamientos	Luz LED azul	Luz LED roja	Luz LED mix	Luz LED blanca
Estomas	58.5±4.94 a	90±8.48 ab	112±4.24 b	166.5±30.40 c

2.6.2.2 Cortes Anatómicos de las hojas

Las capturas de los cortes anatómicos transversales de las hojas, mostraron diferencia en la arquitectura celular del parénquima empalizada (Figura 2.9).

Las células que estuvieron expuestas a la luz azul (Figura 2.9a), eran des uniformes, engrosadas y con cloroplastos grandes. En cambio las células irradiadas por luz roja (Figura 2.9b), eran de una forma semi-cuadrática y cloroplastos grandes.

En la luz mix también se visualiza un cambio en la forma de las células del parénquima empalizada representando una estructura más ovalada y cloroplastos más pequeños (Figura 2.9c), y por último la luz blanca (Figura 2.9d), donde se muestra células de arquitectura rectangular y uniformes con cloroplastos pequeños. Schuerger *et al.*, (1997) evaluaron las estructuras anatómicas de las hojas de pimiento con diferentes espectros, y obtuvieron resultados similares a los nuestros en cuanto a la luz blanca, obteniendo células rectangulares alargadas, y mencionan que las hojas con células de este tipo son mayormente engrosadas. Autores como Demotes-Mainard (2016) describen que largos periodos de luz monocromática o longitudes de onda dicromática causan cambios en la morfología de las plantas, afectando de manera positiva o negativa el desarrollo.



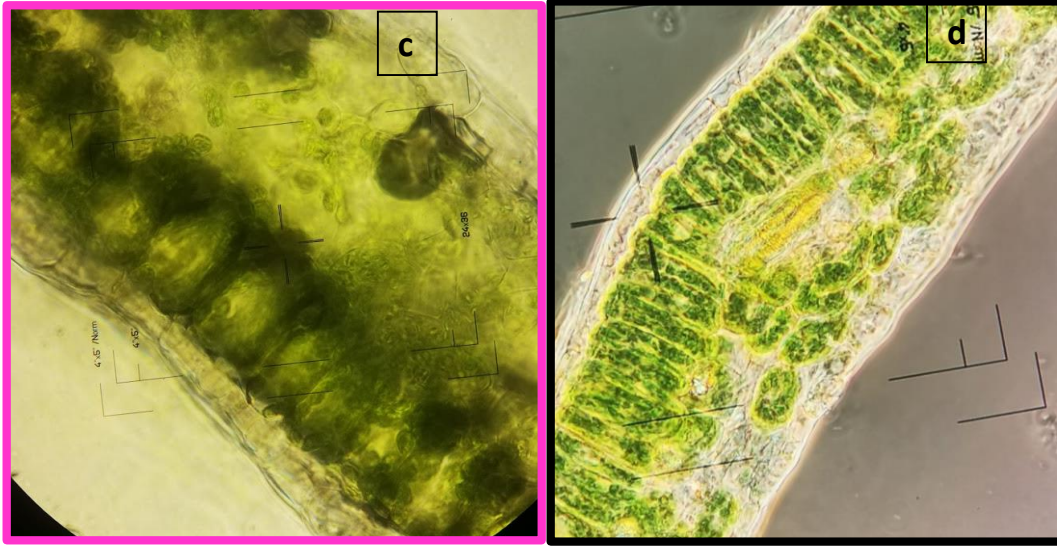


Figura 2.9 Cortes anatómicos de hojas de chile habanero, irradiadas con diferentes longitudes de onda de luz LED (a=azul, b=rojo, c=mix, d=blanco).

2.6.3 Determinación de clorofilas

2.6.3.1 Clorofilas totales

El comportamiento de los pigmentos fotosintéticos mostraron una tendencia similar con el uso del equipo de espectrofotometría (Figura 2.10a) y el equipo SPAD-502 (Figura 2.10b), la luz roja propició una mayor biosíntesis de clorofilas totales, mientras que la luz azul disminuyó la biosíntesis de clorofilas. Mendoza-paredes (2020) publicó resultados en chile habanero, con diferentes longitudes de onda de luz LED, y noto una mayor concentración de clorofila en plantas irradiadas por luz roja.

La biosíntesis de Clorofila según Berkovich *et al.*, (2017) está asociado a la luz roja debido a los fitocromos, que regulan las etapas tempranas de la clorofila.

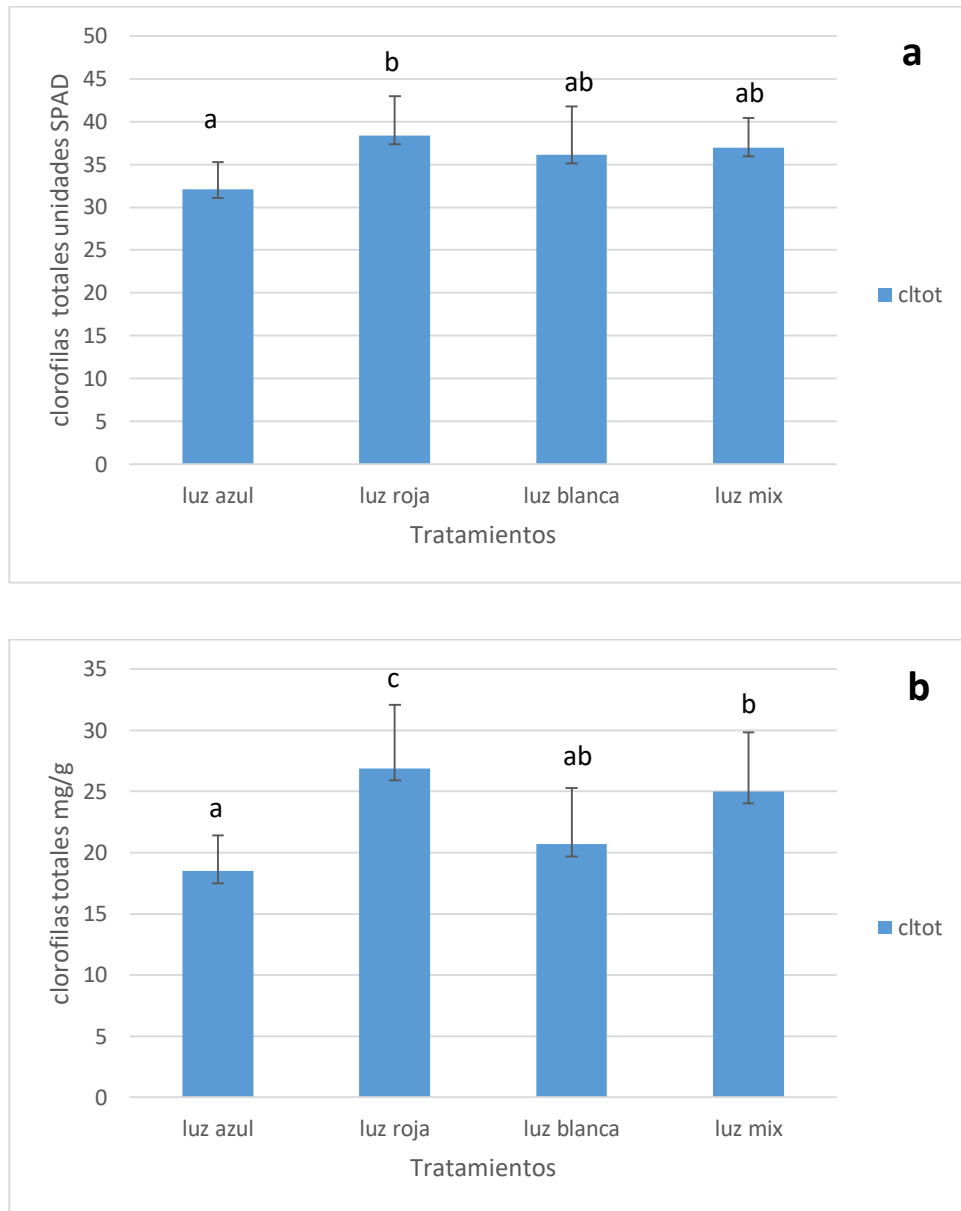


Figura 2.9 Clorofilas totales capturadas por el equipo de medición SPAD 502 (a), clorofilas totales determinadas por espectrofotometría (b). Letras diferentes significan tratamientos con diferencia significativa de acuerdo al método de comparación de medias Tuckey ANOVA ($p < 0.05$).

CONCLUSIONES

2.7 CONCLUSIONES

Las plantas de chile habanero se obtuvieron exitosamente in vitro, y se adaptaron de forma satisfactoria al sistema aeropónico, manteniendo condiciones de temperatura, humedad relativa, fotoperiodos y suministros de nutrientes uniforme. Con riegos y luz automatizados.

Las luces monocromáticas y dicromáticas así como la luz blanca que comprende todo el espectro de luz visible reaccionaron de forma diferente en la arquitectura de la planta, la luz azul propicio a un desarrollo más compacto, así como compuestos fitoquímicos como la clorofila se determinó en menor concentración, y una densidad estomática menor, en cambio las luces de color rojo, blanco y mix sobresalían, mostraban resultados más favorables, plantas mejor desarrolladas, aumento en los pigmentos fotosintéticos, y mayor densidad estomática, y mencionar únicamente la etapa de floración en la luz blanca. Las respuestas de la luz a las plantas, son dependientes de la calidad y cantidad del espectro, dicho esto se necesita mitigar las condiciones de la luz para que las plantas cumplan con cada etapa vegetativa y generativa de forma favorecedora.

BIBLIOGRAFÍA

2.8 BIBLIOGRAFÍA

- Barrientos Priego, A. F., Borys M.I W., Trejo, C., López López L. (2003) Índice y densidad estomática foliar en plántulas de tres razas de aguacatero Revista Fitotecnia Mexicana. 26: 4, 291-299 pp.
- Berkovich, Yu., Konovalova, I.O., Smolyanina, S.O., Erokhin, A.N., Avercheva, O., Bassarskaya, E., Kochetova, G., Zhigalova, T., Yakovleva, O.S., Tarakanov, I.G.. (2017). LED crop illumination inside space greenhouses. REACH - Reviews in Human Space Exploration. 6. 11-24 pp.
- Casson S.A., Franklin, K.A., Gray J.E., Grierson,C.S., White-lam G.C., Hetherington A.M., (2009) Phytochrome B and PIF4 regulate stomatal development in response to light quantity Curr. Biol., 19, 229-234 pp.
- Demotes-Mainard, S., Péron, T., Corot, A., Bertheloot, J., Le Gourrierc, J., Pelleschi-Travier, S., et al. (2016). Plant responses to red and farred lights, applications in horticulture. Environ. Exp. Bot. 121, 4–21 pp.
- Hetherington A. M., Woodward F. I. (2003). The role of stomata in sensing and driving environmental change Nature, 424, 901-908 pp.
- Lake, J.A., and Woodward, F.I. (2008). Response of stomatal numbers to CO₂ and humidity: control by transpiration rate and abscisic acid. New Phytol. 179, 397–404 pp.
- Maiza, R., Kurnia, D. (2019). The Influence of Light Wavelengths Toward the Growth of Brassica rapa L. Journal of Physics: Conference Series.
- Mendoza-Paredes, J., Castillo-González, A., Avitia-García, E., García-Mateos, M., Valdez-Aguilar, L. (2021). Efecto de diferentes proporciones de luz LED azul:roja en plantas de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.). Biotecnia. 23, 110-119 pp.
- Murashige, T; Skoog, F (1962). "A Revised Medium for Rapid Growth and Bio Assays with Tobacco Tissue Cultures". *Physiologia Plantarum*. 15:3, 473–497 pp.
- Philosophical Transactions of the Royal Society of London. 216B, 1-65 pp.
- Román López, A., Cabrera Rodarte, D., Catalán Valencia, E., Macías Rodríguez, H., Villa Castorena, M., Inzunza Ibarra, M. (2014). Producción hidropónica de chile habanero en invernadero. Coyoacán, Mexico: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias
- Salisbury E.J. (1928) On the causes and ecological significance of stomatal frequency, with special reference to the woodland flora.

- Schuerger, A., Brown, Ch., STRYJEWSKI, E. (1997). Anatomical Features of Pepper Plants (*Capsicum annuum* L.) Grown under Red Light-emitting Diodes Supplemented with Blue or Far-red Light. *Annals of botany*. 79, 273-782 pp.
- Val J, Heras L., Monge E. (1985) Nuevas ecuaciones para la determinación de pigmentos fotosintéticos en acetona. *An. Aula Dei*. 17, 231–238 pp.
- Xu Y, Liang Y, Yang M. (2019). Effects of Composite LED Light on Root Growth and Antioxidant Capacity of *Cunninghamia lanceolata* Tissue Culture Seedlings. *Sci Rep*. 9:1, 9766.
- Zeng, J., Wang, Q., Lin, J., Deng, K., Zhao, X., Tang, D., (2010b). *Arabidopsis* cryptochrome-1 restrains lateral roots growth by inhibiting auxin transport. *J. Plant Physiol*. 167, 670–673 pp.

CAPÍTULO III

EL EFECTO DE DIFERENTES IRRADIANCIAS DE LUZ LED BLANCA EN
EL DESARROLLO VEGETATIVO Y GENERATIVO

RESUMEN

3.1 RESUMEN

El chile habanero es un cultivo de gran importancia económica en México debido a su elevada concentración de capsaicina, y derivados usos. Una nueva tecnología es el uso de la luz LED como energía artificial para el crecimiento de plantas en sistema aeropónico y la pulverización con una disolución acuosa rica en nutrientes a las raíces colgantes. Las ventajas de éste sistema al mantener condiciones controladas es la reducción de insumos, agua y recurso humano. La irradiación de luz LED en las plantas tienen efectos significativos en su desarrollo fenológico. El presente trabajo tiene como objetivo evaluar el crecimiento de plantas de chile habanero en un sistema aeropónico con diferentes irradiancias de luz LED blanca. La investigación se desarrolló en el laboratorio de Biotecnología vegetal, en el área de posgrado del Instituto Tecnológico de Tlajomulco. Se utilizó un diseño completamente al azar con tres tratamientos, y siete repeticiones. Se sembró semilla de chile habanero *in vitro*, se trasplantaron en el sistema aeropónico con luz LED blanca, los tratamientos fueron irradiancias de 35, 100 y 250 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Las variables vegetativas evaluadas fueron longitud de raíz, longitud y diámetro de tallo, número de hojas, longitud y diámetro de hoja, la concentración de clorofila, variables generativas: número de flores, número, diámetro y longitud de pétalo, diámetro y longitud de peciolo de la flor, abscisión de flores, variables del fruto: número, peso, diámetro y longitud del fruto. Determinación y concentración de capsaicina, dihidrocapsaicina y carotenos totales realizados en el laboratorio de análisis instrumental. Se logró adaptar las plántulas *in vitro* en un sistema aeropónico con luz LED blanca.

Los resultados mostraron que el tratamiento con la irradiancia de 250 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ favoreció el desarrollo de la planta, así como la floración al disminuir un 16% la abscisión de la flor favoreciendo la etapa de fructificación, la producción de frutos fue relativamente deficiente (8 frutos), y tenían una medida menor a lo reportado a nivel comercial, la concentración de capsaicina fue de 4.82 mg/g de peso seco, la dihidrocapsaicina de 1.35 mg/g de peso seco y los carotenos totales de 160mg/g de peso seco. La irradiancia con 250 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ indujo un mayor número de hojas, e incremento en el área foliar, favoreciendo la concentración de clorofilas totales. El tratamiento con 100 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, mostro en la planta un desarrollo

completo sin llegar a fructificación, y el tratamiento con $35 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ indujo un crecimiento más compacto en la planta y una cantidad mínima de flores sin llegar a ser ovuladas. Se determinó que se requiere al menos una cantidad de $250 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ para obtener frutos en plantas de chile habanero.

INTRODUCCIÓN

3.2 INTRODUCCIÓN

El chile habanero es un cultivo de interés económico, sus propiedades, color y aroma lo catalogan uno de los chiles con más rentabilidad. Tal es la importancia que año con año incrementa la producción, no únicamente en los estados que cuentan con la denominación de origen (DOF, 2010), se han sumado gran parte de los estados de la república mexicana a producir en diferentes sistemas, desde lo convencional, a campo abierto, y aumentando producciones en invernaderos (SIAP, 2020). Las producciones de este cultivo están distribuidos para distintos usos, consumo en fresco, uso farmacéutico, uso industrial, cosmetología entre otros.

Las perspectivas del recurso hídrico son preocupantes, las estimaciones actuales, son para el 2025 una escasez de agua para dos terceras partes de la población mundial.

Datos de la FAO (2017) mencionan a la agricultura como una de las principales causas de la escasez de este recurso abarcando un 70 por ciento del gasto de agua dulce, y contribuyendo a la contaminación por aplicaciones de pesticidas con productos químicos.

La decreciente producción en suelos, da pauta a nuevas alternativas, y/o estrategias para adaptar la agricultura de los estragos del medio ambiente.

La agricultura vertical, los sistemas controlados de producción de interior, las fábricas de plantas, etc. son las nuevas tendencias para una producción sustentable, eficientando el uso de nutrientes, de agua, de espacios al producir de forma vertical y disminuyendo la aplicación de pesticidas.

Estos nuevos sistemas de producción también han sustituido de forma parcial el uso de luz solar por luz artificial mediante diodos emisores de luz (LED), permitiendo cultivar en distintas épocas del año.

Es por eso que el enfoque de este estudio es proporcionar información acerca de la producción de chile habanero en sistema aeropónico con luz LED y mostrar la eficacia que tiene en el desarrollo vegetativo y productivo.

OBJETIVOS E HIPÓTESIS

3.3 OBJETIVO 2

Producir chile habanero en un sistema aeropónico con diferentes irradiancias de luz LED blanca.

3.3.1 Objetivos específicos

- Adaptar las plántulas de chile habanero obtenidas *in vitro* a un sistema aeropónico *ex vitro* con luz LED blanca, y evaluar el efecto de diferentes irradiancias (35, 100 y 250 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) en el desarrollo fenológico.
- Determinar las concentraciones de capsaicina, dihidrocapsaicina, clorofilas y carotenos totales en frutos de chile habanero cultivados en un sistema aeropónico con luz LED blanca (250 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$).
- Cuantificar el consumo de agua de las plantas de chile habanero en sistema aeropónico.

3.4 HIPÓTESIS

Las diferentes irradiancias de luz LED blanca permitirán la producción de frutos y la acumulación de capsaicinoides en el cultivo de chile habanero en sistema aeropónico.

MATERIALES Y MÉTODOS

3.5 MATERIALES Y MÉTODOS

3.5.1 Ubicación

El presente trabajo se realizó en las instalaciones del Instituto Tecnológico de Tlajomulco, ubicado en el municipio de Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco, México. El municipio de Tlajomulco se localiza en la porción media de la región centro del estado, en las coordenadas 20° 28' de latitud norte y 103° 27' de longitud oeste, a una altura de 1,575 metros sobre el nivel del mar. El clima del municipio es semiseco con invierno y primavera secos, y semicálidos sin estación invernal definida. La temperatura media anual es de 19.7° C, y tiene una precipitación media anual de 821.9 milímetros. Los vientos dominantes son de dirección norte. El promedio de días con heladas al año es de 4.3.

El laboratorio de Biotecnología vegetal ubicado en el área de postgrado, dentro de las instalaciones del instituto cuenta con un área específica, para llevar a cabo el desarrollo de los cultivos, con temperaturas regulables, así como con agua y luz LED necesaria para la óptima producción de cualquier cultivo mediante infraestructura de tipo granja vertical.

3.5.2 Material vegetal

Para la siembra se utilizaron semillas de chile habanero de la marca HIT semillas de Bodega Aurrera.

3.5.3 Esterilización y siembra material vegetal

Las semillas de chile habanero (*Capsicum chinense*) fueron desinfectadas en la campana de flujo laminar realizando la desinfección con 2 gotas de tween 20 y cloro comercial al 1% (6ml) por 30 minutos en agitación, posteriormente se realizaron tres lavados con agua destilada estéril, al terminar, las semillas se colocaron en una caja Petri con papel estéril, después con el uso de pinzas se situaron las semillas en los frascos con medio MS (Murashige & Skoog, 1969), sin hormona, y por último se sellaron los frascos con parafilm. Se incubó en la cámara de cultivo a 25°C por 20 días para el día del trasplante o hasta haber obtenido una plántula con dos hojas verdaderas.

3.5.4 Diseño de reactor aeropónico

El sistema consistió en una cabina cerrada con puertas corredizas (para evitar la entrada de contaminantes y luz) las cuales dividen la parte aérea de la planta (tallo, ramas y hojas) de la parte radicular. La parte aérea está compuesta por un techo donde se colocaron lámparas de luz LED blanca, para ser la fuente de luz artificial que requieren las plantas, la parte que divide estas dos áreas, (aérea, y radicular) era una tapa de plástico duro, con 7 orificios donde se colocaron los canastos tipo hidropónicos, y dentro de ellos una esponja para ser el soporte de la planta. El área donde se colocó la raíz era una caja de color negro, en la cual se encontraba un sistema de riego compuesto por cintilla y aspersores, con entrada y salida de agua. La parte del tanque y bomba se colocaron en la parte inferior de la cabina, y con ayuda de tubería pvc, este llegaba a la parte de la caja, se utilizaron temporizadores para el control de los riegos y de la luz y un medidor de temperatura y humedad relativa.

3.5.5 Trasplante

El trasplante se realizó a los 20 días después de la siembra, se colocaron en el sistema aeropónico, donde se adaptaron por un periodo de siete días en luz LED blanca con un fotoperiodo de 12 horas luz, 12 horas oscuridad y riego únicamente con agua purificada temporizado a 1 min por hora y una temperatura de 25 a 30°C.

3.5.6 Establecimiento de los tratamientos de luz LED blanca

Después de la adaptación de las plántulas, se colocaron 7 plantas para cada tratamiento en un reactor distinto, con condiciones uniformes a excepción de la luz. Los tratamientos a utilizar fueron

$35 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$.

$100 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$.

$250 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$.

3.5.7 Solución nutritiva

La solución nutritiva que se utilizó (Cuadro 3.1) para este experimento fue la descrita por Villas et al, (2010, 2011) desarrollada en el INIFAP.

Cuadro 3.1 Solución nutritiva hidropónica para el crecimiento y desarrollo de plantas de chile habanero.

Período de desarrollo	Solución nutricional (meq L ⁻¹)	Concentración	Iones					
			NO ₃ ⁻	H ₂ PO ₄	SO ₄ ²⁻	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
Trasplante a inicio de floración	15	%	0.75	0.15	0.10	0.34	0.42	0.24
		Meq L ⁻¹	11.25	2.25	1.50	5.10	6.30	3.60

En el cuadro.3.2 se pueden obtener las cantidades de cada fertilizante para preparar 20 litros de solución. Esto se obtuvo multiplicando los meq L⁻¹ requeridos de cada fertilizante por el peso equivalente del fertilizante, para darnos la cantidad que se requiere en 1000 litros de solución, y por ultimo este se divide entre 1000 para darnos la cantidad por litro y se multiplica por los 20 litros que se requieren como se tiene en el siguiente cuadro

Cuadro 3.2. Nutrientes utilizados en unidades de mEq y su equivalencia en gramos por litro.

Fertilizante	Peso del fertilizante 1 meq L ⁻¹	Solución INIFAP meq L ⁻¹	Mezcla final g 20 L ⁻¹
Ca (NO ₃) ₂ .2H ₂ O	100	6.30	12.6
KNO ₃	101	4.95	9.8
NH ₄ NO ₃	115	2.25	5.18
K ₂ SO ₄	87	0.15	0.26
MgSO ₄	60	3.60	4.32

Para cubrir el requerimiento de micro nutrientes se utilizó un mix de micros de la marca Az micros agregando 0.60g en 20 litros.

El pH se mantuvo de 6 a 6.5 y la CE de 1.5 a 1.8 mS/cm

3.5.8 Estimación del Área foliar

Para la medición del área foliar utilizamos el Modelo de predicción del área foliar Uzçelik-I (Uzun & Çelik, 1999) que consiste en aplicar una ecuación la cual requiere solo los valores de la longitud y diámetro de la hoja y se incorporan a la siguiente ecuación

$$LA = -50.63 - 1.353 * L/W * PS + 5.347 * W + 0.06 * W^2 * PS + 5.489 * L$$

LA: área foliar, L: longitud de la hoja, L2: longitud de hoja cuadrada, W: ancho de hoja, W2: ancho de hoja cuadrado, L / W: largo / ancho de hoja, PS: especie de planta.

3.5.9 Variables fenológicas vegetativas de la planta

Las variables se tomaron semanalmente desde la primera hasta la octava semana, las mediciones se hicieron en unidades milimétricas con el uso de un Calibrador Vernier Digital Lcd pie de Rey Steren Her-411, las variables que se tomaron en cuenta fueron:

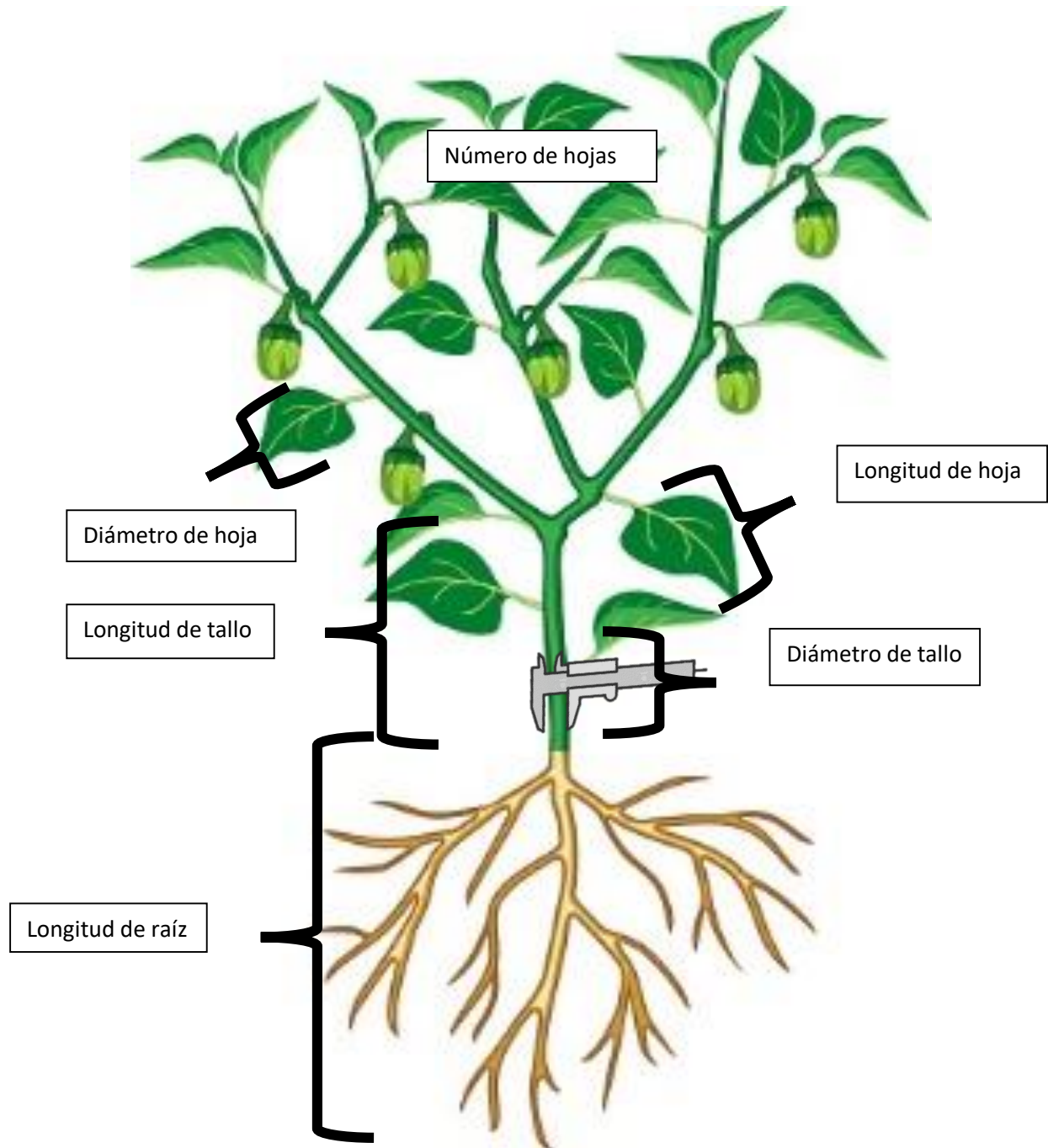


Figura 3.1 Variables fenológicas vegetativas de la planta.

3.5.10 Variables fenológicas generativas de la planta

Las variables se tomaron en distintas fechas de acuerdo a la etapa de floración de cada tratamiento (Cuadro 3.3), las mediciones se hicieron en unidades milimétricas con el uso de un Calibrador Vernier Digital Lcd pie de Rey Steren Her-411, las variables que se tomaron en cuenta fueron:

- Número de pétalos
- Longitud del pecíolo
- Diámetro del pecíolo
- Longitud del pétalo
- Diámetro del pétalo

Cuadro 3.3 Fechas de floración en las irradiancias 35,100 y 250 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$

Fechas de floración	
Tratamientos de luz	Semanas
LED blanca	
250 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$	4
100 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$	8
35 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$	24

3.5.11 Abscisión de flores

Se hizo una cuantificación de las flores obtenidas en todo el ciclo de la plantas mediante la visualización. Adicionalmente se cuantificaron las flores que llegaron a fructificación.

3.5.12 Variables del fruto

Las variables se tomaron en distintas fechas de acuerdo a la etapa de fructificación de cada planta, las mediciones se hicieron en unidades milimétricas con el uso de un Calibrador Vernier Digital Lcd pie de Rey Steren Her-411, las variables que se tomaron en cuenta fueron:

- Número de frutos
- Peso de fruto
- Diámetro de fruto
- Longitud de fruto

3.5.13 Determinación de contenido de clorofilas

3.5.13.1 SPAD-502

Se utilizó el equipo SPAD-502 el cual mide el contenido de clorofilas totales en las hojas y este está estrechamente relacionado a la concentración de nitrógeno. Los valores en unidades SPAD se realizaron en 4 hojas de cada tratamiento, plantas diferentes de cada tratamiento, en la parte media de la planta, promediando los valores obtenidos.

3.5.14 Extracción y cuantificación de capsaicina y dihidrocapsaicina

3.5.14.1 Curva de calibración de capsaicina y dihidrocapsaicina

Se realizó la curva (Figura 3.2) patrón usando la metodología por Canto-Flick et al. (2008), los estándares a utilizar fueron:

Capsaicin \geq 95% from Capsicum (Sigma, M2028-250MG)

Dihydrocapsaicin 90 % from Capsicum sp. (M1022-250MG)

De acuerdo a la pureza de cada estándar se realizaron las concentraciones.

Preparación del patrón de capsaicina: Se disuelve 29.4mg del estándar Capsaicin y se aforó a 14mL con metanol. Esta solución tiene una concentración de 2mg/mL.

Preparación del patrón de Dihidrocapsaicina: Se disuelve 31.08mg del estándar Dihidrocapsaicin y se aforó a 14mL con metanol. Esta solución tiene una concentración de 2mg/mL.

Obteniendo los estándares patrón se prepararon disoluciones a concentraciones de 10, 25, 50, 100, 250, 500, 750, y 1000 $\mu\text{g/mL}$ como se muestra en el cuadro 3.4.

Cuadro 3.4. Diluciones para los estándares de capsaicina, dihidrocapsaicina y metanol.

C [mg/mL]	Capsaicina (μL)	Dihidrocapsaicina (μL)	Metanol (μL)	Volumen total (μL)
10				10,000
25	125	125	9750	10,000
50	250	250	9500	10,000
100	500	500	9000	10,000
250	1250	500	7500	10,000
500	2500	2500	5000	10,000
750	3750	3750	2500	10,000
1000	5000	5000	0	10,000

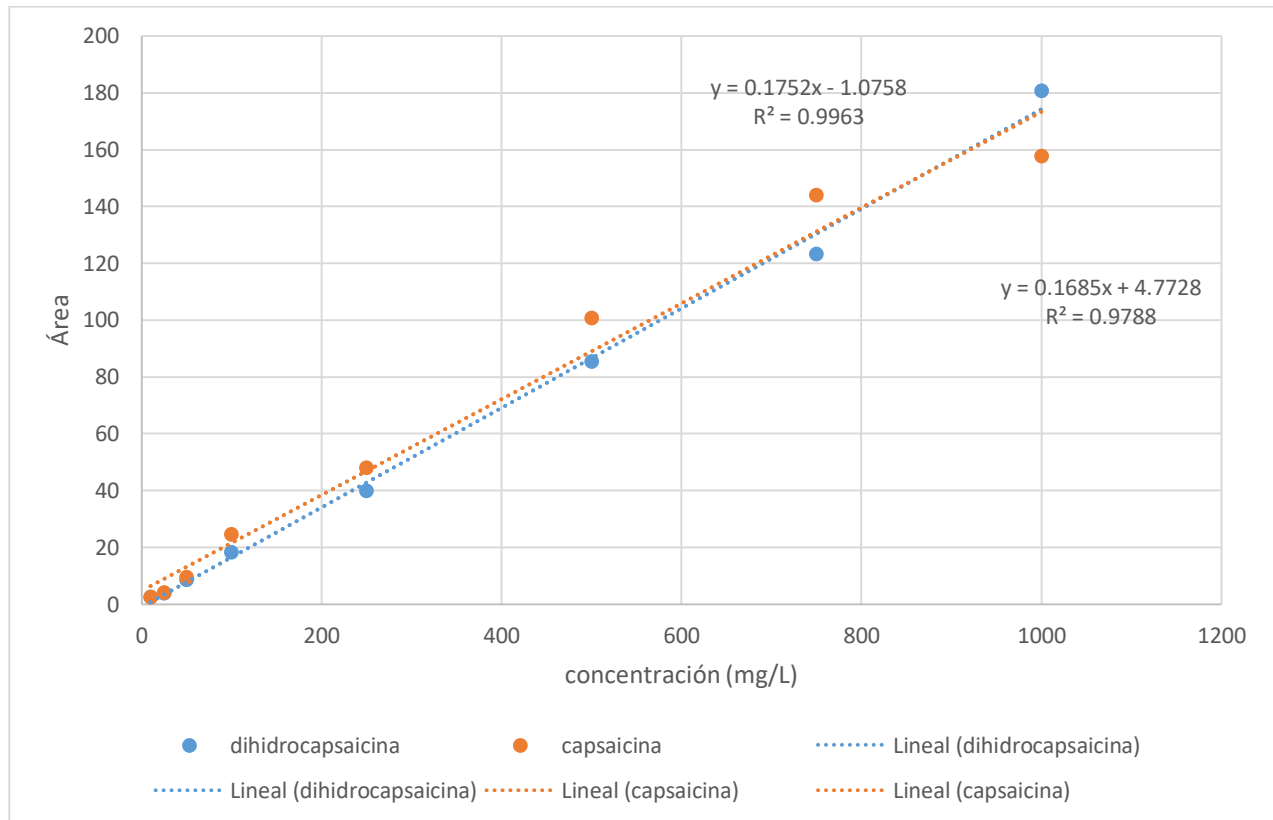


Figura 3.2 Curva de calibración para (a) capsaicina y (b) dihidrocapsaicina, mediante cromatografía líquida de alta resolución con detector de arreglo de diodos (HPLC-PDA). y = ecuación lineal, R^2 = coeficiente de determinación.

3.5.14.2 Extracción de capsaicina y dihidrocapsaicina

Se usó la metodología por Álvarez-Parrilla et al., (2011) se molieron 0.2 g de muestra liofilizada con 10 ml de metanol absoluto. Se sonicó por 15 min y posteriormente se centrifugó a 4215rpm por 5 min para recuperar el sobrenadante. Se repitió el procedimiento de extracción y se combinaron los sobrenadantes.

3.5.14.3 Cuantificación de capsaicinas y dihidrocapsaicina

Para la cuantificación de capsaicinoides se utilizó un equipo de cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) con las condiciones de acuerdo a Ruiz-Lau (2008).

Condiciones de detección de HPLC cuadro 3.5.

Cuadro 3.5 Características de la columna y de metodología para cuantificación de capsaicina y dihidrocapsaicina.

Fase móvil	30% del disolvente A (metanol10%) y 70% del disolvente B (metanol100%).
Flujo	1.0 ml/min.
Presión	264 PSI
Temperatura	30° C
Tiempo	10 min
Volumen de inyección (muestras)	20 µL
Modo	Isocrático

3.5.15 Extracción y cuantificación de carotenoides totales

Los carotenoides totales se extrajeron con el método de Talcott & Howard (1999), con modificaciones usando metanol al 99.8%. Se utilizó 0.2g de muestra liofilizada de fruto, y se añadió 10 ml de metanol, se sonicó por 15 minutos y después se centrifugo a 2000G por 5 minutos. Se repitió dos veces el proceso obteniendo dos extracciones de cada muestra. Para la cuantificación, se leyó la absorbancia a 470 nm, en un espectrofotómetro UV-Visible M-GBC m-Cintra doble Beam. El contenido de carotenoides totales se calculó de acuerdo a la ecuación de Gross (1991) la cual consiste en $(AV \times 106) / (A1\% \times 100G)$, donde A es la absorbancia a 470 nm, V es el volumen total de extracto, A1% es el coeficiente de extinción para una mezcla de disolventes fijados arbitrariamente en 2500, y G es el peso seco (g) de la muestra.

3.5.16 Consumo de agua

Se evaluó el consumo de agua durante 4 meses, iniciando en el trasplante hasta la cosecha de los frutos. La capacidad del tanque de la solución nutritiva fue de 20 litros, la solución se cambiaba cada que la planta absorbía gran parte de los nutrientes aportados, o del consumo de agua.

3.5.17 Diseño experimental

El experimento se estableció en un diseño completamente al azar. Los datos se sometieron a un análisis de varianza (ANOVA), a la prueba de comparación de medias de Tuckey ($P < 0.05$) en un software estadístico InfoStat.

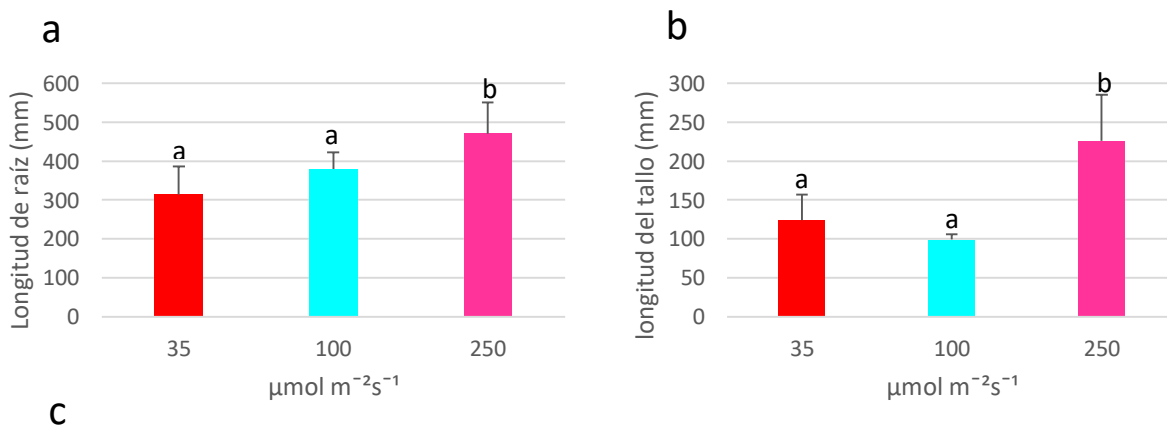
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de esta investigación se basan en las diferencias entre tres tratamientos irradiancias de luz LED blanca, evaluando el efecto en el crecimiento y desarrollo de plantas de chile habanero y concentración de compuestos fitoquímicos, en condiciones de aeropónia.

3.6.1 Variables fenológicas vegetativas de la planta (raíz y tallo)

El crecimiento de la planta se vio afectado por la irradiancia recibida en las variables longitud de raíz (Figura 3.3a), longitud de tallo (Figura 3.3b) y diámetro de tallo (Figura 3.3c), el tratamiento con irradiancia de $250 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ obtuvo un mejor desarrollo en la altura de la planta, en cambio los tratamientos de 35 y $100 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, tenían un menor crecimiento, debido probablemente a la disminución en la intensidad de la luz. En las imágenes de la figura 3.4 se aprecia una planta con tallos y raíces más delgadas (a) que corresponden al tratamiento bajo una irradiancia de $35 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, y con características contrarias (c) una planta con abundante raíz y tallos más fuertes que corresponde al tratamiento con la irradiancia de $250 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Fan et al., (2013) indica que la luz en una baja intensidad puede repercutir en cambios morfológicos como es la altura de la planta, en una reducción de tamaño.



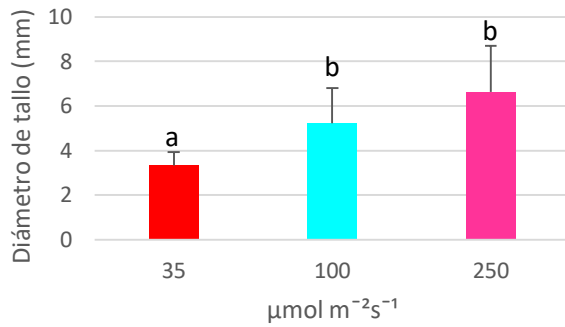


Figura 3.3 Efecto de las diferentes irradiancias de luz LED blanca ($35, 100$ y $250 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) En la longitud de la raíz (a), longitud del tallo (b), y el diámetro de tallo (c) durante un periodo de ocho semanas. Letras diferentes significan tratamientos con diferencia significativa de acuerdo al método de comparación de medias tuckey ANOVA ($p < 0.05$).

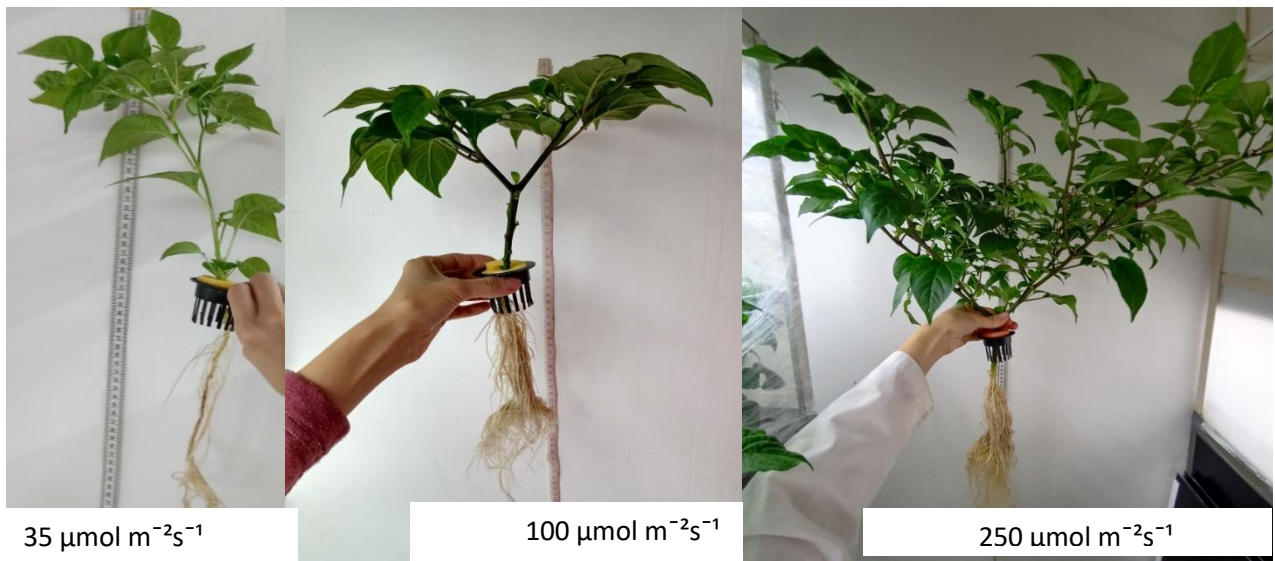


Figura 3.4 Comparación de plantas en el desarrollo de raíz y tallo bajo los tratamientos de irradiancia de luz LED blanca ($35, 100$ y $250 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)

3.6.2 Variables fenológicas vegetativas de la planta (área foliar y hojas)

3.6.2.1 Área foliar

Los tratamientos de 35 y 100 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ de luz blanca en hojas de plantas de chile habanero resultaron estadísticamente iguales (Figura 3.5), por el contrario las plantas bajo el tratamiento con 250 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ fue estadísticamente diferente al presentar mayor área foliar (73.5 cm^2). En general se puede apreciar que depende de la irradiancia este tiene un incremento o disminución en el área foliar. Fan et al., (2013) menciona que las intensidades bajas de la luz puede afectar en el área de la hoja en una disminución de su crecimiento.

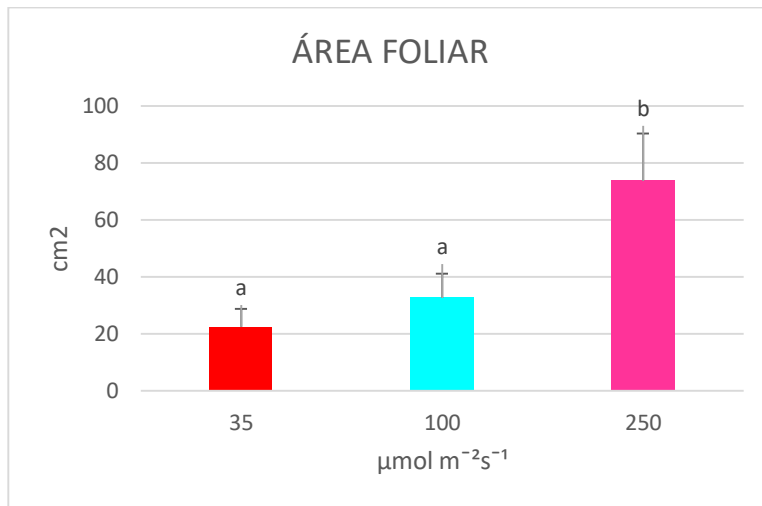


Figura 3.5 Efecto de las diferentes irradiancias de luz LED blanca (35, 100 y 250 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) en el área foliar. Letras diferentes significan tratamientos con diferencia significativa de acuerdo al método de comparación de medias Tuckey ANOVA ($p < 0.05$).

3.6.2.2. Hojas

Para las variables diámetro, longitud y número de hojas el comportamiento también fue diferente, el diámetro de la hoja (Figura 3.6a) no fue diferente entre los tratamientos, en cambio las variables longitud de hoja (Figura 3.6b) y número de hojas (Figura 3.6c) fueron estadísticamente más altos en el tratamiento con la irradiancia de 250 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Estos resultados son similares con los reportados por Maiza (2019) quien observó un incremento en el diámetro, longitud y número de hojas en Pak choi con luz LED blanca con irradiancia similar.

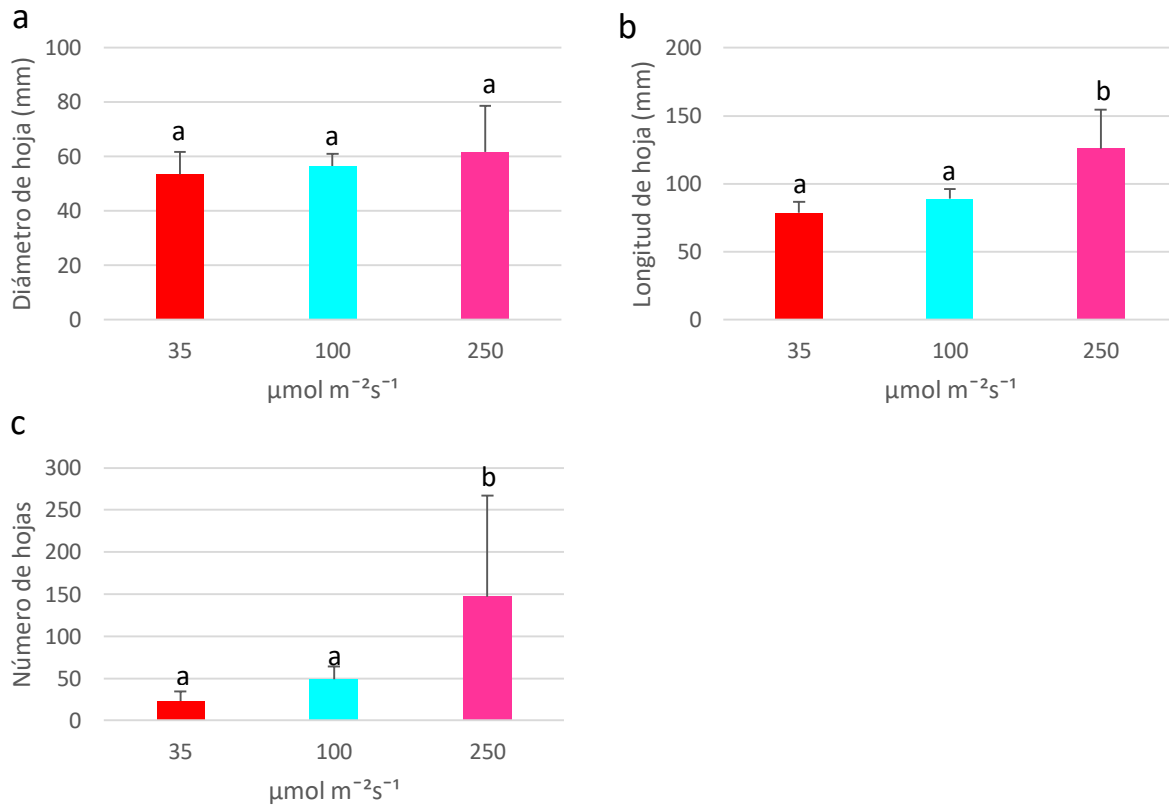


Figura 3.6 Efecto de las diferentes irradiancias de luz LED blanca (35, 100 y 250 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) en el diámetro de hoja (a), longitud de hoja (b) y número de hojas (c) durante un periodo de ocho semanas. Letras diferentes significan tratamientos con diferencia significativa de acuerdo al método de comparación de medias tuckey ANOVA ($p < 0.05$).

En las imágenes de la figura 3.7, se ve el comportamiento de la luz de manera visual en las plantas con los distintos tratamientos, con un aumento en el área foliar conforme aumenta la intensidad de la luz irradiada.



Figura 3.7 Comparación de plantas en el desarrollo de hojas y área foliar y tallo bajo los tratamientos de irradiación de luz LED blanca (35, 100 y 250 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)

3.6.3 Variables fenológicas generativas de la planta (flor)

En cuanto a las variables de la flor, el comportamiento fue estadísticamente diferente para todas las variables excepto para diámetro del peciolo (Figura 3.8), donde no hubo diferencia significativa. Conforme aumentaba la intensidad de la luz mayor era el tamaño de la flor, cabe mencionar que en el proceso o en el desarrollo de la flor con la intensidad de 35 y 100 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ no mostraba presencia de polen. Jianfeng (2021), especialista en soluciones de luz LED evaluó un proyecto con cultivo de rosas donde incorporo luz LED complementaria y observó un crecimiento en el tamaño de la flor al aplicar luz LED de color rosa, a diferencia de un LED de luz blanca y un control sin LED donde no encontró diferencias en el crecimiento de la flor.

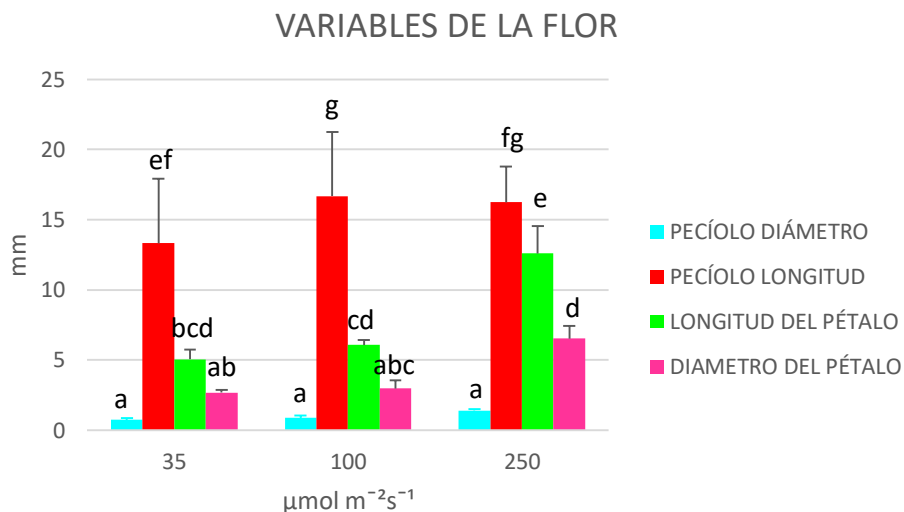


Figura 3.8 Efecto de las diferentes irradiancias de luz LED blanca (35, 100 y 250 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) en las variables diámetro de peciolo, longitud de peciolo, longitud de pétalo y diámetro de pétalo en plantas de chile habanero durante un periodo de ocho semanas. Letras diferentes significan tratamientos con diferencia significativa de acuerdo al método de comparación de medias Tuckey ANOVA ($p < 0.05$).

3.6.4 Fechas de floración

Las etapas de floración fueron distintas en los tres tratamientos (Cuadro 3.6), conforme incrementaba la irradiación de la luz blanca más temprana era la etapa de floración, datos

reportados por Darko *et al.*, (2022) mencionan que la luz acelera la floración en Chile, al combinar espectros que se apliquen a la planta, un aumento en la luz azul y roja lejana prolonga la floración, y si este se sustituye por luz roja retrasa esta etapa.

Esto podría dar una posible explicación a los datos resultantes de nuestro experimento en la etapa de floración, debido al espectro utilizado en nuestras plantas, en el cual la señal de la luz azul era mayor y menor en la luz roja (datos no mostrados).

Cuadro 3.6 Efecto de las diferentes irradiancias de luz LED blanca ($35, 100$ y $250 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) en las fechas de floración.

Fecha de floración	Semana
$35 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$	24 semanas
$100 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$	8 semanas
$250 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$	4 semanas

3.6.5 Abcisión de flores

La abscisión de la flor se refiere al desprendimiento del pedúnculo de la flor a la planta, por diferentes razones, entre ellas se debe al fotoperiodo, y por ende a estímulos químicos, de los cuales son responsables las hormonas y procesos metabólicos (Celis 2014). La hormona de mayor interés y que depende de la concentración que se acumule en la planta podría tener un efecto en el aborto de flores es el grupo de las auxinas, específicamente en la inhibición de las yemas laterales; en la abscisión de las hojas, flores y frutos (Addicott 1955). En los resultados (cuadro 3.7) reflejan que la luz irradiada no fue suficiente para que inhibiera la abscisión, el aumento de la intensidad a $250 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ lo redujo en un 16%, un valor aún muy bajo, Aloni (1996) reportó resultados similares al exponer diferentes variedades de pimiento en distintas irradiancias ($200, 500, 920 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$), la irradiancia más baja ($200 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$), en tres variedades el porcentaje de desprendimiento de la flor fue del 80 al

100%, solo en dos variedades no afecto de forma significativa (20%), explicando la susceptibilidad de algunos genotipos. Nuestros resultados podría deberse a la variedad, y al espectro de luz LED que se utilizó como fuente de energía lumínica, debido a que el pico de señalización de la luz roja era muy baja. Los fitocromos absorben los fotones de la longitud de onda de luz roja, y las hormonas del grupo auxinas responden a las señales de este fotorreceptor, derivando una posible explicación de la abscisión de la flor.

Cuadro 3.7 Efecto de las diferentes irradiancias de luz LED blanca ($35, 100$ y $250 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) en el porcentaje de abscisión de flores.

Abscisión de flores	Porcentaje
$35 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$	100%
$100 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$	100%
$250 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$	84%

3.6.6 Variables del fruto

La fructificación de las plantas de chile solo se obtuvo con la irradiancia de $250 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, con una cosecha mínima de frutos (cuadro 3.8), y un tamaño relativamente pequeño a lo reportado en campo e investigaciones. De Loera (2017) reporta diámetros de 2.53 a 2.63 cm en frutos prospectos para híbridos comerciales, tamaño similar a nuestros frutos (2.62 cm), así mismo se evaluó el jaguar una variedad comercial desarrollada en el INIFAP con un diámetro de 3.11, en cambio la longitud del fruto tamaños de 3.14 a 3.69cm, mayores a los frutos de nuestra investigación (2.75cm) y la variedad jaguar con una longitud de 4.33 cm. Kays (1999), menciona que un estrés por radiación solar baja ocasiona frutos más pequeños por causa de una fotosíntesis deficiente en las hojas cercanas a estos.

Cuadro 3.8 Características de frutos obtenidos en con luz LED blanca con una irradiancia de $250 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ en sistema aeropónico

Características del fruto	
Número de flores	50
Abscisión de flores	84%
Número de frutos	8 ± 0
Peso	3.019 ± 0.93
Diámetro	2.62 ± 0.47
Longitud	2.75 ± 0.86

En los tres tratamientos evaluados, la irradiancia de $250 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ propició la etapa de fructificación, no obstante la cantidad de frutos fue mínima con solo 8 frutos cosechados. Lo anterior pudo generar una baja concentración de fotosintatos en la planta para llevar a cabo un adecuado amarre de frutos. Mendoza paredes (2021) obtuvo mayor cantidad de frutos (24) en plantas que recibieron solo luz roja con una irradiancia de $241 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Darko et al., (2022) realizó un estudio con diferentes proporciones de longitudes de onda obteniendo el mayor número de frutos (9), en el tratamiento con un amplio espectro complementado con la aplicación de luz rojo lejano y azul en una proporción promedio de 64:20:16:0.6 de rojo:verde:azul:rojo lejano a alta ($500 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) intensidad de luz. Esto pudo deberse a un posible efecto de la luz roja sobre el fotorreceptor fitocromo en el amarre de frutos, ya que están relacionados en la regulación de la floración (Berkovich et al., 2017), no obstante, investigaciones hacen referencia que no solo la luz influye en el desarrollo y obtención de frutos, la variedad de los chiles que se utilicen puede verse afectado o beneficiado por el espectro que reciba y la intensidad, como lo describe Jeeatid et al., (2017) reduciendo la intensidad de la radiación solar a través de mallas en un invernadero, evaluando cuatro variedades de chile habanero, y tres rangos de irradiancia, con una mejor

productividad para la variedad Akanee pirote (222 frutos), y la menor la variedad Bhut Jolokia (63), con una intensidad de 700-950 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$.



Figura 3.9 Frutos de chile habanero en etapa madura obtenidos bajo el tratamiento con la irradiancia de 250 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ de luz LED blanca.

3.6.7 Contenido de clorofilas

Como se ha visto en resultados anteriores el incremento de la intensidad de la luz LED blanca, ha mostrado un efecto de aumento en diferentes variables, en cuanto a los datos obtenidos de la cantidad de clorofila no fueron la excepción, puesto que hubo diferencias entre los tratamientos (Figura 3.10), 100 y 250 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ fueron estadísticamente iguales, y distintos a 35 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, estos datos difieren a lo obtenido por Shirke., (2003) y Encalada-Córdova (2016) quienes observaron que al disminuir la intensidad de la luz repercutió en un aumento en el contenido de clorofilas en *Lithocarpus litseifolius* y cafeto.

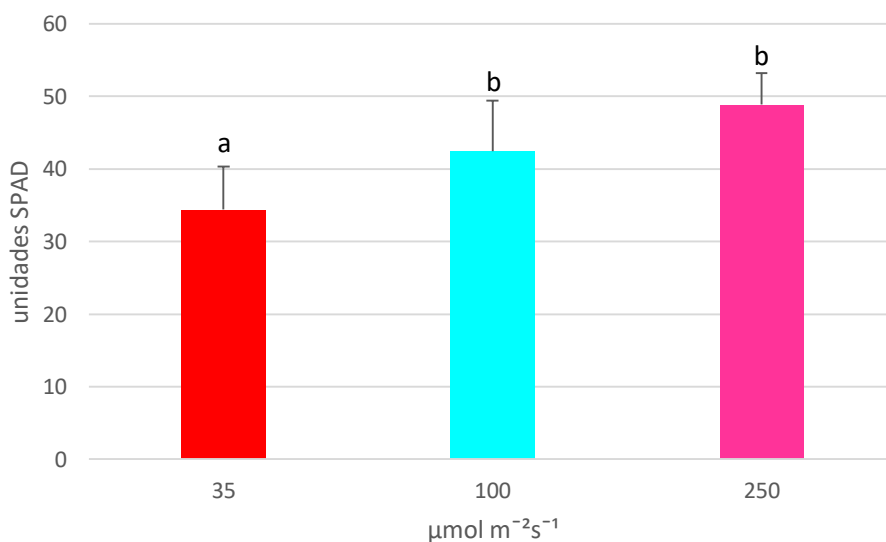


Figura 3.10 Efecto de las diferentes irradiancias de luz LED blanca ($35, 100$ y $250 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) en la concentración de clorofilas durante un periodo de ocho semanas capturadas por el equipo SPAD-502. Letras diferentes significan tratamientos con diferencia significativa de acuerdo al método de comparación de medias tuckey ANOVA ($p < 0.05$).

3.6.8 Determinación de Capsaicina, dihidrocapsaicina y carotenos totales

La determinación de capsaicinoides presentaron valores bajos a lo establecido por la DOF (2010) reportando una cantidad de $6.5\text{-}12.5$ mg de Capsaicina/g peso seco (Cuadro 3.9), la capsaicina de los frutos de chile que se produjeron en sistema aeropónico con luz LED blanca fue una concentración de 4.08 mg/g de peso seco y la dihidrocapsaicina 1.35 mg/g de peso seco. Estos resultados podrían verse afectados debido a la cantidad de luz irradiada, puesto que el autor Jeeatid (2017) con una intensidad de luz de $700\text{-}950 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ mantenía concentraciones de 21.71 mg/g de peso seco de capsaicinoides totales por fruto. De la cruz (2020) reporta cantidades de capsaicina 21.51 mg/g de peso seco y dihidrocapsaicina 12.18 mg/g de peso seco, estos chiles se cultivaron de manera convencional a campo abierto.

Cuadro 3.9 Efecto de la irradiancia de $250 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ de luz LED blanca, en el contenido de capsaicinoides y carotenos totales en tres frutos de chile habanero.

Metabolitos secundarios	Capsaicina	Dihidrocapsaicina	Total Capsaicinoides	Carotenos totales
Chiles en aeroponía con luz LED blanca $250 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$	4.0828 ± 1.66 mg/g	1.35 ± 0.66 mg/g	5.4328614 mg/g	160.6844 mg g ⁻¹

Las variables reportadas que afectan la acumulación de capsaicinoides en los frutos de chile habanero son ambientales y genéticas, como lo es la temperatura, luz, humedad relativa, y la variedad a utilizar. Las plantas se someten con frecuencia a diferentes tipos de estrés, el más utilizado es el estrés por sequía aumentando la biosíntesis de capsaicinoides en frutos de chile (Phimchan, 2014). Experimentalmente se vio un efecto negativo en la acumulación

de capsaicinoides, mismos que se tendrán que mejorar, y a la par probar algún tipo de estrés.

Los resultados pusieron de manifiesto que existe un efecto positivo en el contenido de carotenos totales en frutos que se produjeron en sistema aeropónico con luz LED blanca a una irradiancia de $250 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (cuadro 3.9) el efecto fue de un aumento obteniendo 160.6844 mg/g de peso seco de carotenos totales a lo reportado por Cruz-Ricardez (2020) 52.23 mg/g.

3.6.9 Consumo de agua

Se cuantifico los litros que se consumen de agua durante un periodo de 4 meses (Figura 3.10), que consto a partir del día del trasplante hasta la cosecha de frutos. El total de litros fue de 260 litros en el ciclo del cultivo para 7 plantas, esto se dividió entre las plantas y resulto en un total de 37.14 litros por planta. García Casas (2018) realizo un experimento donde evaluó el consumo de agua en plantas de chile habanero en tres sistemas de

Cuadro 3.10 Consumo de agua de 7 plantas colocadas en reactor aeropónico, durante 4 meses.

Semanas	Consumo de agua en litros	Número de plantas
15 días	20 litros de agua	7
15 días	20 litros de agua	
15 días	20 litros de agua	
Semana 7	20 litros de agua	
Semana 8	20 litros de agua	
Semana 9-16	160 litros de agua	
Total: 16 semanas	260 litros de agua	7

Producción diferente (hidroponía, invernadero y cielo abierto) durante todo el ciclo de la planta, obteniendo un consumo total por planta en cielo abierto de 200.46 L, en cambio en el invernadero disminuyo la cantidad a 180.46 L, y por último la hidroponía fue el sistema

de producción más eficaz en ahorro de agua, al ahorrar un 68%, con una cantidad de 62.5 L de agua.

El sistema aeropónico redujo aún más el consumo de agua en las plantas, al ahorrar 81.47% comparándolo al sistema de producción de cielo abierto.

Las diferentes producciones de cultivos en aeroponía, es una innovación que se basa en el principio hidropónico con grandes modificaciones, ya que muestra diversos avances para la mayoría de los agricultores, permite el uso y manejo adecuado del agua con un ahorro de 40% o más (Christie and Nichols, 2004). Por otro lado, cabe mencionar la importancia de la escasez del agua a nivel mundial, ya que el uso y consumo de este elemento vital es dos veces mayor al de la tasa de crecimiento de la población; esto provoca, la escasez del agua en regiones, áridas y semiáridas (ONU, 2012).

CONCLUSIÓN

3.7 CONCLUSIONES

La luz LED blanca propició, por primera vez de acuerdo a nuestro conocimiento el desarrollo vegetativo y generativo de chile habanero en cultivo aeropónico en las diferentes irradiancias evaluadas ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$): 35, 100 y 250, en un ambiente controlado, sin aplicar pesticidas, y con una disminución en el consumo de agua.

En particular, con $250 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, la flor es de un tamaño similar al que se observa en campo, y solo con ese nivel se generó fructificación.

La síntesis de capsaicina de los frutos crecidos bajo estas condiciones fue menor a lo reportado por lo que será necesario mejorar las condiciones lumínicas en las que crece la planta en aeroponía.

El contenido total de carotenos totales del fruto fue mayor a lo evaluado para otros sistemas de producción.

Con esta primera observación será posible seguir estudiando los efectos de la luz LED, para reducir el porcentaje de abscisión de flores, aumentar la generación de frutos, obtener un mayor tamaño de este, y aumentar la producción en un sistema controlado como es la aeroponía.

BIBLIOGRAFÍA

3.8 BIBLIOGRAFÍA

- Addicott, F.T.; Lynch, R.S.; Carns, H.R. (1955). Auxin gradient theory of abscission regulation. *Science*. 121, 644–645
- Alam MA., Juraimi AS., Rafii MY., Hami AA., Aslani F., Alam MZ. (2015). Effects of salinity and salinity-induced augmented bioactive compounds in purslane (*Portulaca oleracea* L.) for possible economical use. *Food Chemistry* 169: 439-447 pp.
- Álvarez-Parrilla E., De La Rosa LA., Amarowicz R., Shahidi F. (2011). Antioxidant activity of fresh and processed Jalapeño and Serrano peppers. *J Agric Food Chem.*;59(1):163–73
- B. Aloni, L. Karni, Z. Zaidman, A.A. Schaffer, (1996). Changes of Carbohydrates in Pepper (*Capsicum annum* L.) Flowers in Relation to Their Abscission Under Different Shading Regimes, *Annals of Botany*, Volume 78, Issue 2; 163-168 pp.
- Berkovich, Yu., Konovalova, I.O., Smolyanina, S.O., Erokhin, A.N., Avercheva, O., Bassarskaya, E., Kochetova, G., Zhigalova, T., Yakovleva, O.S., Tarakanov, I.G. (2017). LED crop illumination inside space greenhouses. *Reach - Reviews in Human Space Exploration*. 6. 11-24 pp.
- Canto-Flick, A., Balam-Uc, E., Bello-Bello, J., Lecona, C., Solís-Marroquín, D., Avilés-Viñas, S., Gómez-Uc, E., Lopez Puc, G., Santana-Buzzy, N., Iglesias Andreu, L.. (2008). Capsaicinoids Content in Habanero Pepper (*Capsicum chinense* Jacq.): Hottest Known Cultivars. *HortScience: a publication of the American Society for Horticultural Science*. 43.
- Celis, C., Ávila R., Marín, M., Casanova Ángel. (2014). Control de la abscisión floral en el frijol (*Vigna unguiculata* L. Walp.), mediante la aplicación de hormonas vegetales. *Revista De La Facultad De Agronomía De La Universidad Del Zulia*, 7(3).
- Christie, C. B., Nichols, M.A. 2004. AEROPONICS - A production system and research tool. *Acta Hort. (ISHS)* 648: 185-190.
- Darko E., Hamow KA., Marcek T., Dernovics M., Ahres M., Galiba G. (2022). Modulated Light Dependence of Growth, Flowering, and the Accumulation of Secondary Metabolites in Chilli. *Front. Plant Sci*. 13:801656.
- De la Cruz Ricardez, D., Ortiz, C., Lagunes-Espinoza, Lc., Torres-de la Cruz, M., Hernández-Nataren, E.. (2020). COMPUESTOS FENÓLICOS, CAROTENOIDES Y CAPSAICINOIDES EN FRUTOS DE *Capsicum* spp. DE TABASCO, MÉXICO. *Agrociencia*. 54. 505-519 pp.
- De Loera Hernández, M. (2017) descripción varietal y comportamiento agronómico de seis genotipos de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) naranja bajo condiciones de

- invernadero. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Mexico.
- Encalada-Córdova, M., Soto-Carreño, F., Morales-Guevara, D., Álvarez-Bello, I. (2016). Influencia de la luz en algunas características fisiológicas del cafeto (*Coffea arabica* L. cv. Caturra) en condiciones de vivero. *Cultivos Tropicales*, 37(4), 8997
- Fan XX, ZG Xu, XY Liu, CM Tang, LW Wang, XL Han (2013). Effects of light intensity on the growth and leaf development of young tomato plants grown under a combination of red and blue light. *Sci. Hort.*, 153: 50-55 pp.
- García Casas, K. D. (2018) DETERMINACIÓN DE CAPSAICINA Y CONSUMO DE AGUA DEL CHILE HABANERO *CAPSICUM CHINENSE* EN TRES SISTEMAS DE PRODUCCIÓN. [tesis de Maestría en Ciencias en, Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Durango] Repositorio Institucional-CIIDIR.
- Gross, J. (1991). Carotenoids. In: *Pigments in Vegetables*. Springer, Boston, MA. 75-278 pp.
- Jeeatid, N., Techawongstien, S., Suriharn, K., Bosland, P., Techawongstien, S. (2017). Light intensity affects capsaicinoid accumulation in hot pepper (*Capsicum chinense* Jacq.) cultivars. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*. 58.
- Jianfeng, D., (16 de diciembre 2021) *LED light improves the yield and quality of cut roses*. Floral dayli. 5 de Julio 2022. "LED light improves the yield and quality of cut roses" (floraldaily.com)
- Kays, Stanley. (1999). Preharvest factors affecting appearance. *Postharvest Biology and Technology*. 15. 233-247pp.
- Maiza, R., Kurnia, D. (2019). The Influence of Light Wavelengths Toward the Growth of *Brassica rapa* L. *Journal of Physics: Conference Series*.
- Mendoza-Paredes, J., Castillo-González, A., Avitia-García, E., García-Mateos, M., Valdez-Aguilar, L. (2021). Efecto de diferentes proporciones de luz LED azul:roja en plantas de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.). *Biotecnia*. 23..
- Murashige, T; Skoog, F (1962). "A Revised Medium for Rapid Growth and Bio Assays with Tobacco Tissue Cultures". *Physiologia Plantarum*. 15 (3): 473–497 pp.
- ONU (Organización de las Naciones Unidas). 2012. Programa mundial de evaluación de los recursos hídricos de las naciones unidas. Informe de las Naciones Unidas para el Desarrollo Mundial del Agua. 4:1 .lp.
- Phimchan, P., Chanthai, S., Bosland, P., Techawongstien, S. (2014). Enzymatic Changes in Phenylalanine Ammonia-lyase, Cinnamic-4-hydroxylase, Capsaicin Synthase, and Peroxidase Activities in *Capsicum* under Drought Stress. *Journal of agricultural and food chemistry*. 62.

- Román López, A., Cabrera Rodarte, D., Catalán Valencia, E., Macías Rodríguez, H., Villa Castorena, M. y Inzunza Ibarra, M. (2014). Producción hidropónica de chile habanero en invernadero. Coyoacán, Mexico: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias
- Ruiz-Lau, N. (2008). Efecto del estrés hídrico sobre el desarrollo de capsaicinoides en frutos y órganos vegetativos en plantas de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.). Tesis de maestría. Centro de investigación científica de Yucatán.
- Ruiz-Lau, N., Medina-Lara, F., & Martínez-Estévez, M. (2011). El chile habanero: su origen y usos. *Ciencia*, 70-77 pp.
- Shirke, P. A., & Pathre, U. V. (2003). Diurnal and Seasonal Changes in Photosynthesis and Photosystem 2 Photochemical Efficiency in *Prosopis juliflora* Leaves Subjected to Natural Environmental Stress. *Photosynthetica*, 41, 83-89 pp.
- Talcott, S. T., and L. R. Howard. (1999). Phenolic autoxidation is responsible for color degradation in processed carrot puree. *J. Agric. Food Chem.* 47: 2109-2115 pp.
- Uzun, S., Celik, H. (1999). Leaf Area Prediction Models (UÇelik-I) For Different Horticultural Plants. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*. 23. 645-650 pp.

CAPÍTULO III

EFFECTO DE NANOPARTÍCULAS $MgFe_2O_4$ EN LA GERMINACIÓN *IN VITRO*.

RESUMEN

4.1 RESUMEN

El chile habanero tiene una gran importancia económica que deriva de su fruto, para la elaboración de salsas, condimentos, y para la extracción de capsaicinas que son utilizadas en el área farmacéutica. La nanotecnología viene a revolucionar los sistemas de producción con el uso de NPs. En este trabajo estudiamos el efecto de la NPs MgFe_2O_4 en la germinación de semillas de chile habanero, así como el desarrollo de las plántulas. El diseño experimental fue completamente al azar con cinco tratamientos, y 40 repeticiones. Las NPs MgFe_2O_4 fueron aplicadas en el medio de cultivo (medio MS). Posteriormente las semillas fueron sembradas *in vitro* y se monitoreo diario la germinación. Los tratamientos con 10 y 20 mg/L aceleraron la germinación con dos días de diferencia con respecto al control. Todas las semillas germinaron con el tratamiento 10mg/L a los 9 días después de la siembra, por el contrario el control logró el 100% de germinación hasta el día 26. Para las variables longitud de raíz y tallo, el tratamiento 20 mg/L promovió el crecimiento y vigor de la plántula.

Palabras clave: nanomateriales, nanopartículas, chile habanero, *In vitro*

INTRODUCCIÓN

4.2 INTRODUCCIÓN

La incorporación de fertilizantes en el suelo, y el manejo preciso de nutrientes es indispensable para una producción agrícola sostenible (Davarpanah et al., 2016), la forma en que estos se apliquen se reflejara en un porcentaje de pérdida, debido a varios factores como son el lixiviado, y degradación de los suelos, etc, (Shankramma at al, 2015) lo que ha generado en buscar nuevos productos en el área agrícola para disminuir el exorbitante uso de fertilizantes y los estragos en los suelos agrícolas. Es así como la nanotecnología viene a revolucionar los sistemas agroalimentarios. La mayoría de los estudios reportados han mostrado efectos positivos de gran diversidad de NPs en el desarrollo y cosecha de los cultivos. Sin embargo se siguen estudiando los efectos y las concentraciones ideales, para evitar la fitotoxicidad en plantas. (Ruiz-Torres, 2016). Con la finalidad de entender la utilidad de la nanotecnología se pretende la aplicación de NPs principalmente en semillas y plantas, en donde los autores Chinnamuthu y Boopathi (2009) mencionaron una mejora acelerando la germinación de las semillas con el uso de NPs, optimizando la capacidad de absorción del agua y degradación de reservas. Krishna y Natarajan (2014) indicaron que las NPs de Zinc (ZnO), plata (Ag) y dióxido de titanio (TiO₂) aumentaron la velocidad de germinación en semillas de cacahuete. Por otro lado Shankramma at al. (2015) utilizo NPs de Fe₂O₃, afectando positivamente el proceso de la vida de la semilla y el desarrollo de la planta. Así mismo, de acuerdo a la literatura, se ha reportado que las nanopartículas metálicas como lo son de zinc, magnesio y hierro tienen efectos positivos en el crecimiento de las plantas, ello debido a que son parte de los nutrientes esenciales para la planta (Duran, 2017).

4.3 OBJETIVO 3

Determinar la concentración de nanopartículas MgFe_2O_4 que estimula la germinación *in vitro*.

4.3.1 Objetivos específicos

- Determinar las condiciones mínimas para la solubilización de las nanopartículas en medio MS, y la obtención del medio semisólido con gel rite.
- Evaluar el comportamiento de la germinación con las diferentes concentraciones de nanopartículas y el desarrollo vegetativo de la plántula.

4.4 HIPÓTESIS

Las diferentes concentraciones de nanopartículas MgFe_2O_4 estimularan la germinación *in vitro* en semillas de chile habanero y el desarrollo vegetativo de vitroplantas.

MATERIALES Y MÉTODOS

4.5 MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo se realizó en el laboratorio de Biotecnología vegetal dentro del área de posgrado del Instituto Tecnológico de Tlajomulco, ubicado en el municipio de Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco, México.

La NPs FeMg_2O_4 fue biosintetizada mediante el método Sol-Gel (Tiwari, 2022, comunicación personal). Para este experimento primero se determinaron las concentraciones del nanomaterial FeMg_2O_4 como se muestra en la Cuadro 4.1.

Cuadro 4.1 Contenido de los diferentes tratamientos de nanopartículas FeMg_2O_4 aplicados en el medio MS en la siembra *in vitro*.

Control	Medio MS
Tratamiento	(mg/L)
FeMg_2O_4	2
	5
	10
	20

Se utilizó como medio de cultivo el medio el MS (Murashige y Skoog, 1962). A este medio se le añadió nano partículas de MgFe_2O_4 pesando 0.1g de este, se agregó en un vaso de precipitado con 1000 ml de agua destilada, después se colocó en el aparato ultrasonic durante 15 minutos por dos periodos para la disolución de las nano partículas. Al terminar de sonicar se agregó en 5 vasos de precipitado con medio MS en distintas concentraciones las cuales se muestran en la figura 4.1. Posteriormente se añadieron las 5 concentraciones de nano partícula de MgFe_2O_4 mostradas en la figura 4.1. Como control se utilizó medio MS sin nano partícula.

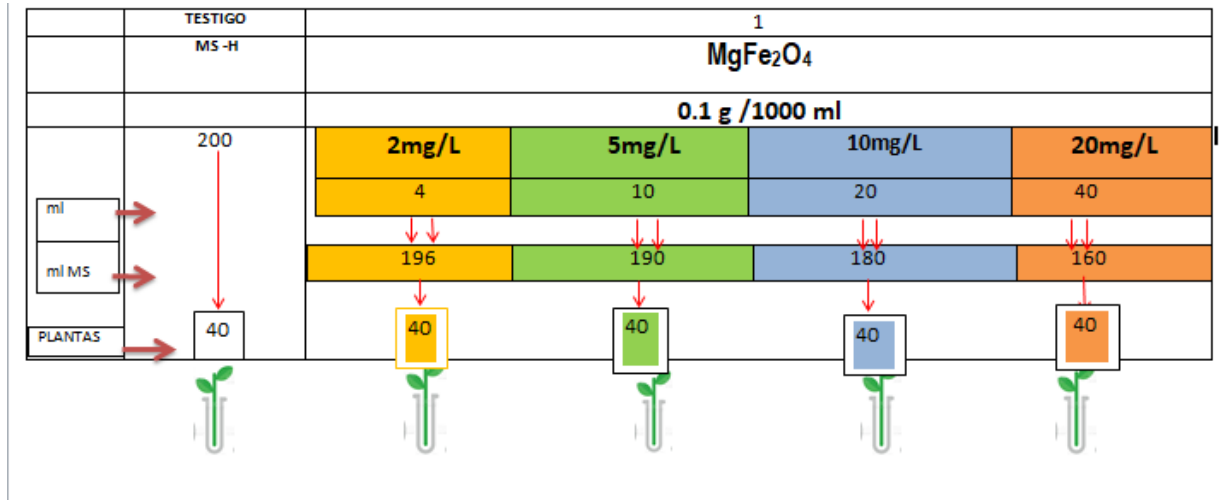


Figura 4.1 Diseño experimental con medio MS y diferentes concentraciones de MgFe₂O₄

Cada medio constó de 200 ml, se midió el pH manteniendo un rango de 5.7, para la gelificación del medio se agregó 0.4g de gel rite, cada disolución se colocó en 20 frascos de vidrio en una cantidad de 20 ml. Posteriormente los frascos fueron esterilizados y almacenados hasta su uso.

El material vegetal a utilizar fueron semillas de chile habanero de la marca Happy flower, para evitar contaminación de algún patógeno, fueron lavadas y desinfectadas en la campana de flujo laminar con cloro comercial al 1% en agitación por 30 minutos, para después ser sembradas 2 semillas por frasco en las diferentes concentraciones, obteniendo 40 semillas por tratamiento.

Los frascos fueron colocados en el cuarto de incubación a 25°C con luz LED, las semillas fueron monitoreadas diariamente para ver la evolución de la germinación y se creó un registro para comparar los periodos de germinación en cada tratamiento. A los 26 y 69 días de la germinación se tomó dos frascos por tratamientos para medir variables como longitud de tallo, raíz y hoja, diámetro de tallo y hoja, y peso fresco de plántula y de las hojas, las mediciones se hicieron en unidades milimétricas con un Calibrador Vernier Digital Lcd pie de Rey Steren Her-411, se utilizó una balanza analítica para determinar los pesos frescos de las muestras.

El experimento se estableció en un diseño completamente al azar. Los datos se sometieron a un análisis de varianza (ANOVA), a la prueba de comparación de medias de Duncan ($P < 0.05$) en un software estadístico InfoStat

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Según los resultados el día 5 después de la siembra las concentraciones con 10 y 20 mg/L fueron los primeros en promover la germinación, y hasta el día 7 las concentraciones con 2 y 5 mg/L, y por último el tratamiento control en el día 8 después de la siembra. En el día 10 el tratamiento con 10 mg/L tenía una cantidad de 40 semillas germinadas, con una diferencia de dos días con respecto al tratamiento 20 mg/L, mientras que en los tratamientos de 5 y 2 mg/L germinaron las 40 semillas hasta el día 18 y 19. En el tratamiento control tardó 27 días para la germinación de las 40 semillas. Enfatizando de este modo una estimulación en la germinación con el uso de nanopartícula $MgFe_2O_4$ en el medio de cultivo, conforme aumentaba la concentración de la nanopartícula más acelerada era la germinación. Así mismo Rawat et al., (2018) demostró que las nanopartículas ZnO aumentaban las tasas de germinación de semillas, y el crecimiento de plúmulas y radículas.

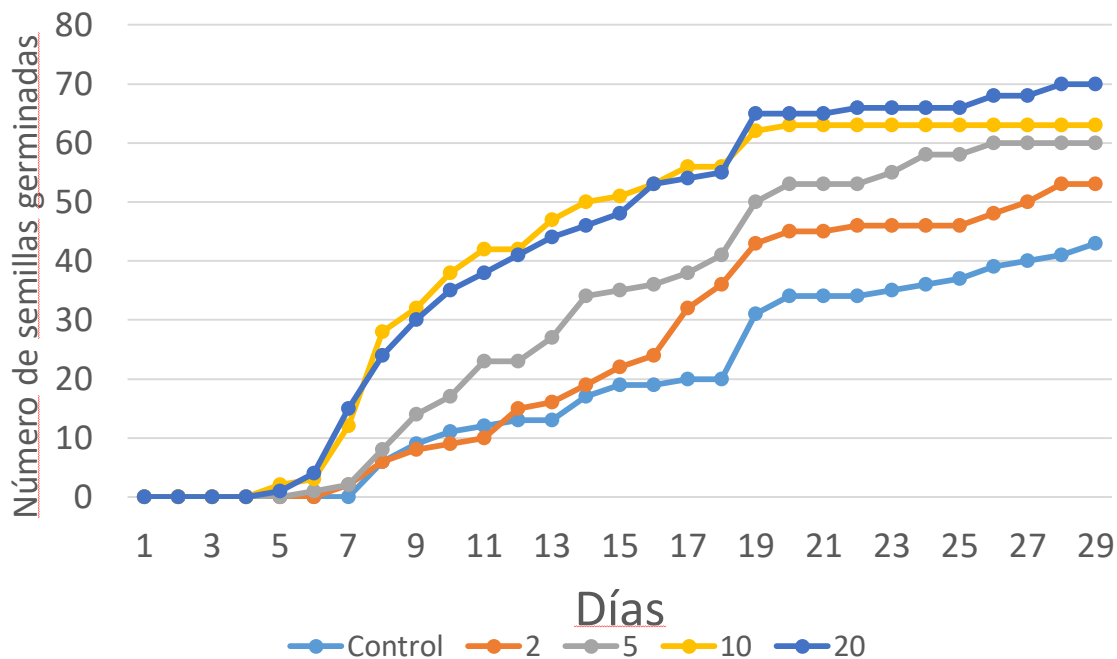


Figura 4.2 Efecto de la concentración de nanopartículas de $MgFe_2O_4$ en la germinación *in vitro* de semillas de *C. chinense* durante 29 días. Control medio MS sin nanopartículas, tratamientos: 2mg/L, 5mg/L, 10mg/L y 20mg/L.

En la figura 4.3, se observan los resultados de las variables fisiológicas de las plántulas, a los 26 días de después de la siembra las variables diámetro de tallo, diámetro de hoja y longitud de hoja no mostraron diferencias significativas entre los tratamientos. Por otra parte el tratamiento con 20 mg/L incremento la longitud de la raíz y la longitud del tallo, estas variables son indicadores de vigor de las plántulas lo que demuestra que ha concentraciones de 20mg/L las Nps $MgFe_2O_4$ tienden a promover el crecimiento. Thuesombat *et al.*, (2014), observaron los efectos de las NPs de plata en distintos tamaños (20, 30-60, 70, 120 y 150 nm de diámetro) en el arroz con diferentes concentraciones (0, 1, 10, 100 y 1000 mg/L), en la estimulación de la germinación de semillas y crecimiento de las plántulas. Los resultados obtenidos indicaron una disminución con el aumento en tamaños y concentraciones de NPs.

En cambio para la segunda fecha evaluada, a los 69 días, no se obtuvieron diferencias entre los tratamientos para la longitud del tallo, pero si para el resto de las variables, el tratamiento control mostró mayor longitud de raíz y longitud de hoja, con respecto a las plántulas crecidas con NPs. En cuanto al diámetro del tallo las concentraciones con 5, 10 y 20 mg/L fueron significativamente iguales entre ellas y diferentes al resto de los tratamientos y para la variable diámetro de hoja, el control y la concentración de 20 mg/L fueron estadísticamente iguales, pero diferentes a los de 2, 5 y 10 mg/L

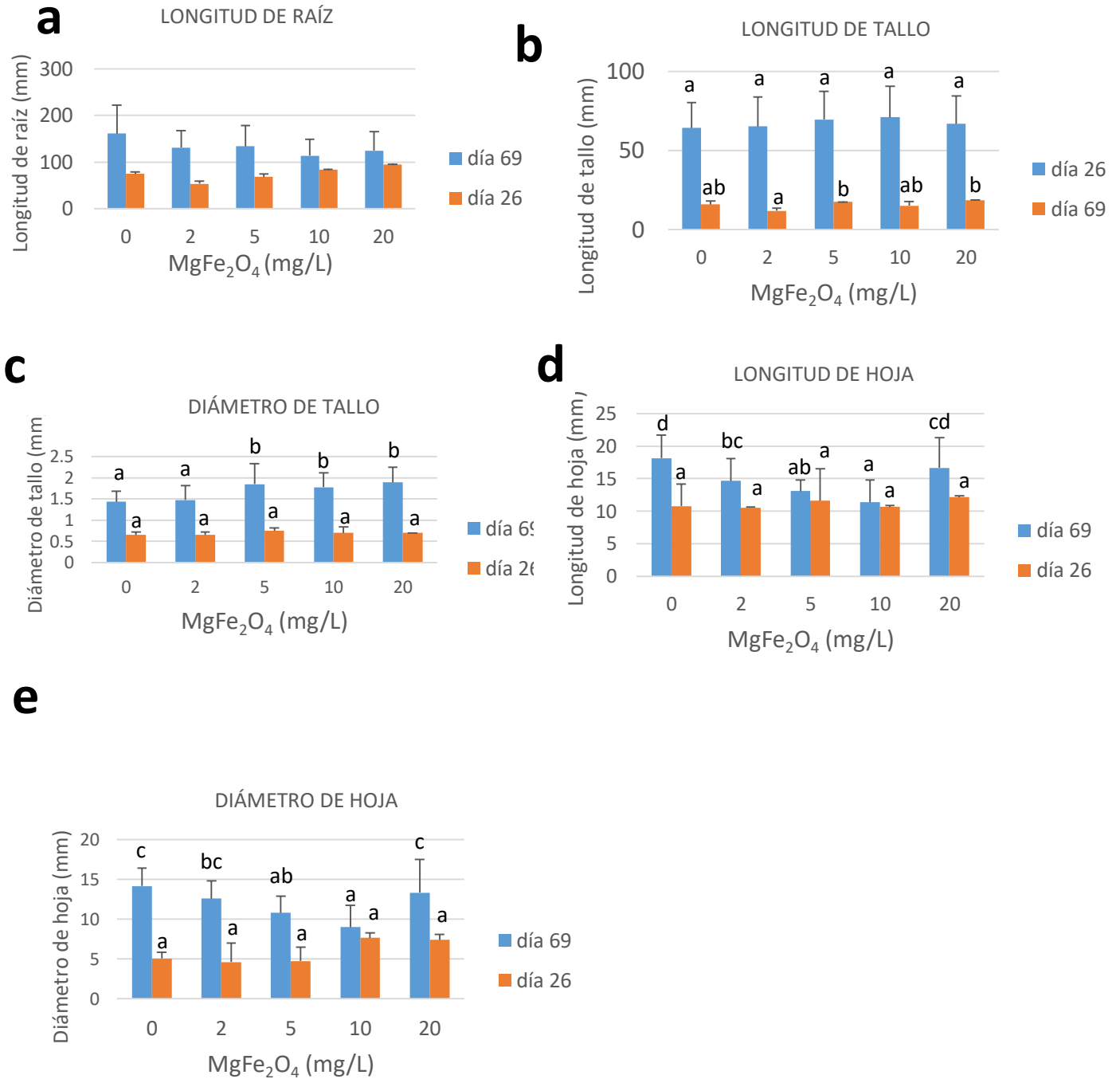


Figura 4.3 Efecto de la concentración de nanopartículas de MgFe₂O₄ en las características fenológicas de plantas cultivadas *in vitro* de *C. chinense*, evaluadas a los 26 y 69 después de la siembra en medio MS. Letras iguales no representan diferencias significativas, según la prueba de Duncan ($p \leq 0.05$).

En la figura 4.4, se observan fotografías que muestran las características fenológicas representativas de las plantas de *C. chinense*, cultivadas *in vitro*.

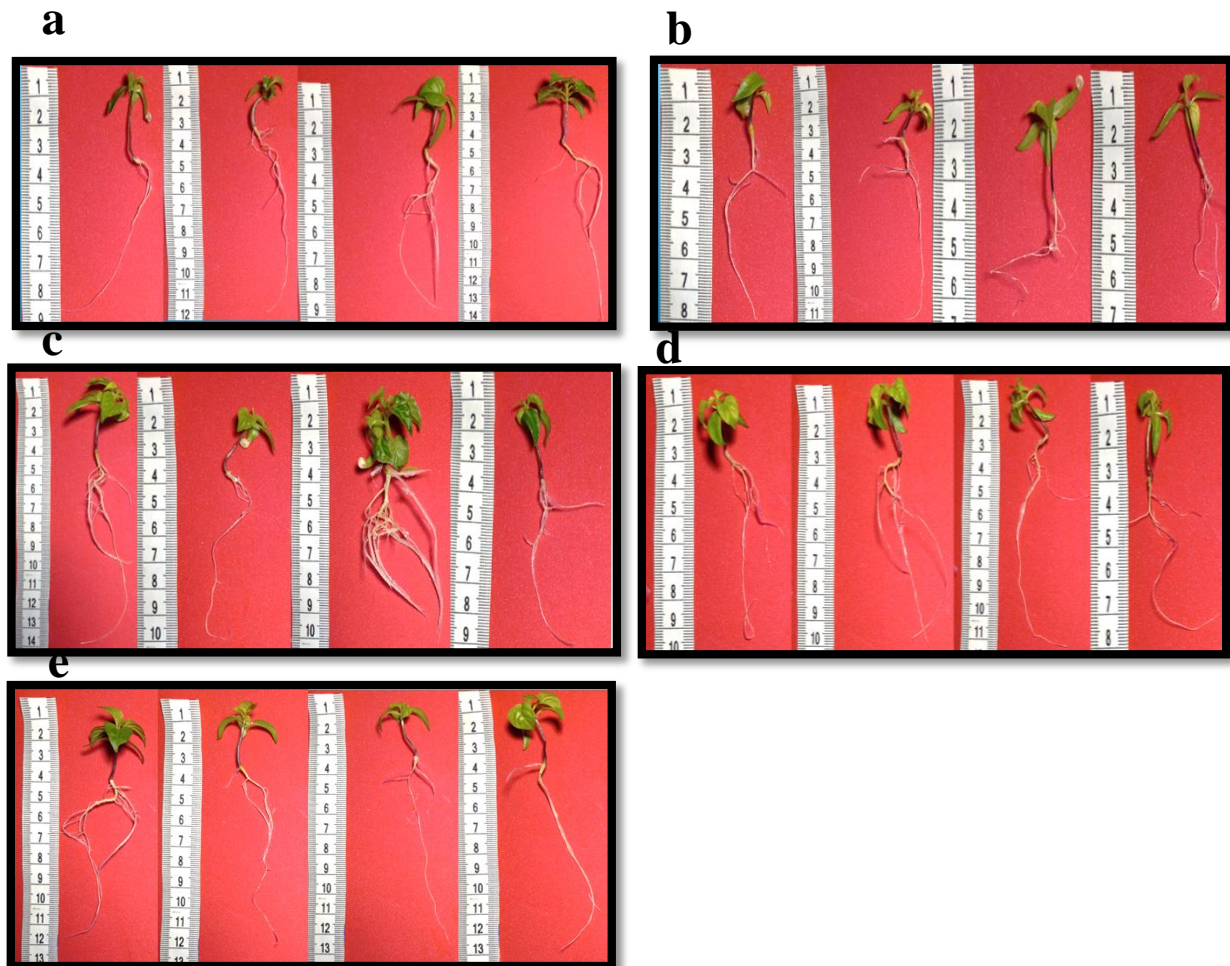


Figura 4.4 Fotografías representativas del efecto de la concentración de nanopartículas de MgFe_2O_4 en el desarrollo de plantas cultivadas *in vitro* de *C. Chinense*, evaluadas a los 26 después de la siembra. a) Control medio MS sin nanopartículas. MgFe_2O_4 (mg/L): b) 2, c) 5, d) 10 y e) 20.

CONCLUSIONES

4.7 CONCLUSIONES

El uso de Nps a base de $MgFe_2O_4$ estimulan el proceso de germinación en semillas de chile habanero en condiciones *in vitro*. Mostrando además un resultado positivo en el desarrollo de raíz y tallo de plántulas.

BIBLIOGRAFÍA

4.8 BIBLIOGRAFÍA

- Davarpanah, S., Tehranifar, A., Davarynejad, G., Abadía, J., & Khorasani, R. 2016. Effects of foliar applications of zinc and boron nano-fertilizers on pomegranate (*Punica granatum* cv. Ardestani) fruit yield and quality. *Scientia horticultrae*, 210, 57-64 pp.
- J.S. Duhan, R. Kumar, N. Kumar, P. Kaur, K. Nehra, S. Duhan, Nanotechnology: The new perspective in precision agriculture, *Biotechnol. Reports*. 15 (2017) 11–23 pp.
- Janmohammadi, M., & Sabaghnia, N. 2015. Effect of pre-sowing seed treatments with silicon nanoparticles on germinability of sunflower (*Helianthus annuus*). *Botanica Lithuanica*, 21(1), 13-21 pp.
- Mukherjee, M. and A. Mahapatra. (2009). Effect of coinage metal nanoparticles and zwitterionic surfactant on reduction of $[\text{Co}(\text{NH}_3)_5\text{Cl}](\text{NO}_3)_2$ by iron (III). *Colloid Surface*. 350: 1-7 pp.
- Rawat, P. S., Kumar, R., Ram, P., & Pandey, P. 2018. Effect of nanoparticles on wheat seed germination and seedling growth. *International Journal of Agricultural and Biosystems Engineering*, 12(1), 13-6. Pp.
- Ruiz-Lau, N., Medina-Lara, F., & Martínez-Estévez, M. (2011). El chile habanero: su origen y usos. *Ciencia*, 70-77 pp.
- Ruiz-Torres, Norma & García López, Josué. (2016). Efecto de nanopartículas metálicas y derivadas del carbón en la fisiología de semillas. *Prog sim-taller agronano 2016 sep 17^a*
- Shankramma, K., S. Yallappa, M.B. Shivanna, and, J. Manjanna. (2015). Fe_2O_3 magnetic nanoparticles to enhance *S. lycopersicum* (tomato) plant growth and their biomineralization. *Appl. Nanosci.* p. 1-8 pp.
- Thuesombat, P., S. Hannongbua, S. Akasi, and S. Chadchawan. (2014). Effect of silver nanoparticles on rice (*Oryza sativa* L. cv. KDML 105) seed germination and seedling growth *Ecotoxicology and Environmental Safety* 104