

EFFECTO DE LA LUZ LED DE ALTA INTENSIDAD SOBRE LA GERMINACIÓN Y EL CRECIMIENTO DE PLÁNTULAS DE BRÓCOLI (*BRASSICA OLERACEA* L.)**EFFECT OF HIGH INTENSITY LED LIGHT ON THE GERMINATION AND GROWTH OF BROCCOLI SEEDLINGS (*BRASSICA OLERACEA* L.)**

Guillermo Paniagua-Pardo, Claudia Hernández-Aguilar, Fernando Rico-Martínez, Flavio Arturo Domínguez-Pacheco, Efraín Martínez-Ortiz, y Claudia Lizbeth Martínez-González

Instituto Politécnico Nacional, SEPI-ESIME "Zacatenco", Unidad Profesional Adolfo López Mateos, col. Lindavista, México, DF, CP 07738.

Correo electrónico: guip70@hotmail.com

RESUMEN

Dado su alto valor nutricional y los beneficios a la salud por los compuestos anticancerígenos que posee, el brócoli (*Brassica oleracea* L.) se ha convertido en un cultivo de importancia dentro de las hortalizas, por lo que es necesario incrementar su consumo y producción por la sociedad mexicana. Esta investigación planteó como objetivo evaluar el efecto de la luz LED de alta intensidad de distinta longitud de onda (rojo, azul y verde), en germinación y crecimiento de plántulas de brócoli, evaluando las variables velocidad de germinación (VG), porcentaje de germinación (PGF), longitud media de hipocótilo (LMH), peso fresco (PF) y seco (PS) de las plántulas, en busca de alternativas de iluminación para la producción en ambiente controlado. Los tiempos de exposición con luz roja, azul y verde, proveniente de LEDs de alta intensidad fueron de 12, seis y tres horas, con un complemento de tiempo para los últimos dos tratamientos con luz LED blanca. Se utilizó un diseño experimental completamente al azar, con cuatro repeticiones de 30 semillas por unidad experimen-

tal. Se obtuvieron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos de las variables evaluadas. Los tratamientos con luz roja presentaron los mayores valores de VG, donde el rojo por 12 horas fue el mejor con incrementos del 25% contra el control. La variable LMH en el tratamiento verde por 12 horas tuvo incremento del 39% respecto al control, convirtiéndose en el mejor. Por otro lado, en la variable PF, el mayor peso se presentó en el tratamiento verde por 12 horas con un incremento contra el control del 16%. Finalmente en la variable PS, el mayor peso se presentó en el tratamiento rojo por 12 horas con un incremento contra el control del 6%. Estos resultados mostraron que las respuestas fisiológicas producidas por la exposición a distintas longitudes de onda de luz LED de alta intensidad en semilla de brócoli variaron de acuerdo con el tiempo de exposición y tipo de longitud de onda usado, además de que este tipo de iluminación mostró ser una opción viable para mejorar la calidad fisiológica del brócoli.

Palabras clave: brócoli, LED, crecimiento, germinación, fisiología.

ABSTRACT

Given its nutritional value and health benefits by having anticancer compounds, broccoli (*Brassica oleracea* L.) has become an important crop in vegetables, therefore it is necessary to increase their consumption and production by Mexican society. This research evaluated the effect of high-intensity LED light of different wavelengths (red, blue and green), on germination and growth of broccoli seedling for 10 days, evaluating the variables germination rate (VG), germination percentage (PGF), average length of hypocotyl (LMH), fresh (PF) and dry weight (PS) of seedling, in search of alternative lighting for production in controlled environment. Exposure times of red, blue and green light of high-intensity LEDs were 12, six and three hours, with a complementary time for the last two treatments with white LED light. A completely randomized experimental design was used with four replications of 30 seeds per experimental unit. Statistically significant differences between treatments for evaluated variables were obtained: red light treatments showed the highest values of VG, where the red for 12 hours was the best with increases of 25% versus control. The LMH variable for the green treatment of 12 hours had an increase of 39% compared to control, becoming the best. On the other hand in PF variable, the greatest weight was presented in green treatment for 12 hours with an increase against the control of 16%. Finally in PS variable, the greatest weight was presented in red treatment for 12 hours with an increase against the control of 6%. These results showed that the physiological responses produced by exposure to different wavelengths of high intensity LED light in broccoli seed, varied according to the exposure time and type of wavelength used, in

addition this type of lighting proved to be a viable option to improve the physiological quality of broccoli.

Key words: broccoli, LED, growth, germination, physiology.

INTRODUCCIÓN

La luz, además de ser una fuente indispensable de energía para la fotosíntesis de las plantas, es también un factor importante para su crecimiento y desarrollo (Ding *et al.*, 2010). Las plantas son capaces de responder a la intensidad y al color de la luz (Zhang y Folta, 2012) por medio de sus fotorreceptores: fitocromos, criptocromos y fototropinas, los cuales se activan bajo longitudes de onda específicas (Liu, 2012) haciendo ajustes precisos en su desarrollo y crecimiento con respecto a las distintas condiciones ambientales (Chen *et al.*, 2004). Debido a ello, los sistemas de iluminación para la producción en ambiente controlado son de suma importancia (Kozai, 2007) así como los avances tecnológicos que puedan surgir en el área (Bourget, 2008). Recientemente la luz LED (*light emitting diode*) se ha convertido en una alternativa para el cultivo de plantas (Massa *et al.*, 2008) por las ventajas que este sistema de iluminación ofrece como son el control de la composición espectral, su tamaño pequeño, producción de altos niveles de luz con un índice de radiación calorífica bajo y una larga vida útil que les permite mantenerse trabajando por años sin necesidad de reemplazo (Bourget, 2008; Xu *et al.*, 2012; Gupta y Jatothu, 2013).

Es bien conocido que la luz roja y azul son factores importantes para el crecimiento de las plantas (Yorio *et al.*, 2001); los fitocro-

mos tienen sus picos de sensibilidad en la región roja (660 nm) e infrarroja (730 nm) y entre las respuestas fisiológicas donde se involucran están la expansión de la hoja, percepción de vecinos, evitar la sombra, elongación del tallo, germinación de la semilla y la inducción de la floración (Pinho *et al.*, 2012). Los fotorreceptores que absorben la luz azul son los criptocromos que controlan la morfología de la planta, la transición a la floración, contribuyen a la expansión de la hoja e inhiben fuertemente la elongación del tallo (Folta y Childers, 2008); las fototropinas también absorben la luz azul y regulan el contenido del pigmento y el movimiento de los órganos fotosintéticos para la captura de la luz (Spalding y Folta, 2005). También en la última década se ha tenido evidencia del rol que la luz verde tiene como regulador del crecimiento (Folta, 2004; Kim *et al.*, 2004). Son diversos los estudios realizados aplicando luz tipo LED de distintas longitudes de onda, como lo reportado por Shoji *et al.* (2010) donde LEDs azules promovieron el crecimiento de plántulas de lechuga después de ser transplantadas. Otros estudios mencionan la combinación de distintas longitudes de onda con estos dispositivos, como lo expuesto por Xiaoying *et al.* (2012) donde la combinación de LEDs rojos-azules y rojos-azules-verdes mostraron ser factores benéficos en el crecimiento y fotosíntesis de las plántulas de tomate cherry (*Solanum esculentum* var. *cerasiforme*). Cabe mencionar que cada especie vegetal reacciona en forma diferente a los componentes espectrales del flujo luminoso (Avercheva *et al.*, 2009).

Por otro lado, el consumo de frutas y hortalizas es esencial para la salud humana ya que su escasa ingesta representa uno de los 20 factores de riesgo a los que se atribuye la

mortandad humana (FAO, 2006). Dentro de este contexto, el brócoli (*Brassica oleracea* L.) se ha convertido en uno de los cultivos populares debido a su alto valor nutricional (Büchert *et al.*, 2011), además de ser un alimento benéfico a la salud por sus compuestos anticancerígenos y antioxidantes (Jeffery *et al.*, 2003). La FAO (FAOSTAT, 2011) colocó a México como el cuarto productor de col y brócoli a nivel mundial con 427 884 toneladas y tercer exportador con 147 720 toneladas; esto evidencia la importancia de este cultivo además de que es necesario promover el consumo de frutas y hortalizas debido al alto índice de obesidad que prevalece en la sociedad mexicana, ocupando el segundo lugar mundial entre la población adulta (Barrera *et al.*, 2013).

El objetivo de este estudio es evaluar el efecto de la luz tipo LED de alta intensidad con distinta longitud de onda (rojo, azul y verde) en la germinación y crecimiento de plántulas de brócoli (*Brassica oleracea* L.), con distintos tiempos de exposición (tres, seis y 12 horas), bajo la hipótesis de que este tipo de luz en tiempos diferentes de exposición y longitud de onda en etapas iniciales de las plántulas de esta especie mejora su germinación y crecimiento, dado que existen pocos estudios con este tipo de luz en combinación con la especie vegetal.

MATERIAL Y MÉTODOS

Material biológico. Se utilizaron semillas de brócoli (*Brassica oleracea* L.) de la variedad Waltham 29 marca ITSCO, obtenidas en la ciudad de México. Las semillas fueron clasificadas de acuerdo con su tamaño con ayuda de cribas ($1.2 \text{ mm} \pm 0.25 \text{ mm}$) dimensionadas con un vernier marca

Stariett, modelo 125MEB, con el objetivo de homogeneizarlas. El peso promedio de cuatro lotes de 150 semillas fue de 4.49 miligramos. El experimento fue realizado en las instalaciones del Instituto Politécnico Nacional (IPN), en la ESIME Zacatenco, México DF (19°29'56"N y 99°08'06"O).

Instrumentación de diodos LED. Para la germinación de las semillas se construyó un contenedor de 29.5 cm de alto, con una longitud a lo ancho de 145 cm y 41cm de profundidad, el cual se dividió en 10 secciones de 14 cm de 29.5 cm de alto y 41cm de profundidad. Se fabricó de madera y los soportes perimetrales fueron de aluminio. Las paredes interiores de cada sección se forraron de papel aluminio con el fin de aumentar la reflexión de la luz al interior. En la parte superior del contenedor se instaló un panel de iluminación con LEDs de alta intensidad. Nueve secciones contaron con cuatro LEDs (dos de color y dos blancos) más la sección de control que contó con dos LEDs (blancos), ubicados a una altura de 24 cm. Se colocaron tres secciones con LEDs rojos (600-650 nm), tres con azules (450-500 nm) y tres con verdes (490-540 nm). Los LEDs utilizados son de alta intensidad (SI-LED®) con una potencia de 5 W, ajustados a una intensidad de 550 ± 5 luxes medidos con un luxómetro (*Steren®*, modelo HER-410). Los tiempos de exposición con luz de color fueron de tres, seis y 12 horas, donde el complemento de tiempo para los tratamientos de tres y seis horas se hizo con luz LED blanca. Para lograr esto fue necesario construir una tarjeta temporizadora para el switcheo de los LEDs de color y blancos, basados en el microcontrolador PIC16F877 Microchip junto a un sistema de relevadores (Paniagua *et al.*, 2013).

Diseño experimental. El experimento estuvo conformado por nueve tratamientos de luz producto de tres longitudes de onda (rojo, azul y verde) y tres tiempos de exposición (tres, seis y 12 horas), así como un control con 12 horas de luz blanca. El diseño experimental fue completamente al azar, con cuatro repeticiones de 30 semillas por unidad experimental. Las semillas seleccionadas fueron sembradas y 10 horas después se aplicaron los tratamientos con luz.

Prueba de germinación

La siembra de las semillas se llevó a cabo conforme a las recomendaciones de ISTA (2010). Las semillas fueron colocadas en cajas Petri plásticas esterilizadas de 5.5 cm de diámetro, usando como sustrato una capa de papel filtro humedecido con 3 ml de agua purificada. La germinación dentro del contenedor, se realizó con ciclos alternados de luz (12 horas) y oscuridad (12 horas), con una temperatura y humedad promedio en el día de 20.48°C y 31.71%. Se realizó el conteo de las semillas germinadas cada 24 horas hasta el décimo día. Se agregaron 2 ml de agua diariamente a cada caja Petri. Las variables evaluadas durante el experimento fueron las siguientes:

- **Velocidad de germinación (VG).** En cada conteo el criterio de germinación fue la ruptura de la semilla y la aparición de la radícula, con longitud igual o mayor a 2 mm. Se calculó la velocidad de germinación para cada conteo con la fórmula (1) adaptada de Hall y Wiesner (1990).

$$VG = (SG(1)/1 + (SG(2) - SG(1))/2 + \dots + (SG(n) - SG(n-1))/n)$$

Donde SG(n) = número de semillas germinadas al conteo n

- Porcentaje de germinación final (PGF).

En el conteo final las plántulas de brócoli se consideraron como normales cuando tenían longitud de hipocótilo igual o mayor a 1 cm y contaban con todas sus partes (raíz, plúmula y cotiledones). Se calculó el porcentaje de germinación de los tratamientos, considerando el número total de plántulas normales entre el total de semillas (Moreno, 1996).

- Longitud media del hipocótilo (LMH).

Se midió la longitud del hipocótilo de todas las plántulas normales para el cálculo de la longitud media promedio por tratamiento, sumando la longitud de cada una de las plántulas entre el total de plántulas por tratamiento, como un indicador del vigor de la misma (AOSA, 1983).

- Peso fresco (PF). Se midió el peso fresco en gramos sólo de las plántulas normales en una báscula marca *Velab*® modelo VE-1000.

- Peso seco (PS). El secado de las plántulas se llevó a cabo en un horno eléctrico marca Riossa modelo E-51 a una temperatura de 65°C por 72 horas, para finalmente tomar el peso seco en gramos de las plántulas en una báscula marca *Ohaus*® modelo Adventurer.

Análisis estadístico. Los datos se sometieron a un análisis de varianza utilizando el procedimiento GLM del SAS (SAS, versión de 2010), en un diseño completamente al azar con cuatro repeticiones. La comparación de medias se realizó utilizando el procedimiento de diferencias mínimas significativas (LSD), con un nivel de significancia de 0.05.

RESULTADOS

El análisis de datos mostró diferencias estadísticas significativas en las variables evaluadas de brócoli entre tratamientos de luz. Para la variable velocidad de germinación se obtuvieron diferencias significativas ($p < 0.05$) en todos los conteos (V24, V48, V72, V96, V120, V144, V168, V192, V216 y V240) como se observa en la tabla 1.

La velocidad de germinación a las 24 horas (V24) fue superior en el tratamiento dos (rojo seis horas y blanco seis horas), seguido por el tratamiento uno (rojo 12 horas), mientras que el control no presentó germinación en ese instante. Al final de la prueba los mejores tratamientos para la velocidad de germinación (V240) fueron aquellos que contaban con luz roja; el tratamiento uno (rojo 12 horas) presentó la velocidad de germinación más alta seguido por el tratamiento dos (rojo seis horas y blanco seis horas), ambos tuvieron incrementos del 25% y 20% de germinaciones contra el control respectivamente, en la figura 1 se observa el comportamiento de la velocidad de germinación para los tratamientos con luz roja respecto al control. Por otro lado la menor velocidad de germinación se presentó en el tratamiento nueve (verde tres horas y blanco nueve horas) aunque estadísticamente se encuentra en el mismo grupo del control.

Por otro lado, se encontraron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los tratamientos de luz en la variable longitud media del hipocótilo (LMH), peso seco (PS) y en el peso fresco (PF). La variable porcentaje de germinación final (PGF) no presentó diferencias estadísticas significativas. En la tabla 2 se indica la comparación de los valores medios para las variables con diferencias significativas.

Tabla 1. Velocidad de germinación diaria para semilla de brócoli expuesta a tratamientos de luz LED.

| Núm. de Tratamiento | Tiempo (h) | Luz | V24 | V48 | V72 | V96 | V120 | V144 | V168 | V192 | V216 | V240 |
|---------------------|------------|--------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|---------|---------|
| 1 | 12 | Rojo | 4.75a | 13a | 14.33a | 14.64a | 14.74a | 14.82a | 14.86a | 14.86a | 14.94a | 14.94a |
| 2 | 6 | Rojo | 5a | 11.25bcd | 13.66ab | 13.91ab | 14.21ab | 14.3ab | 14.3ab | 14.3ab | 14.32ab | 14.32ab |
| 3 | 3 | Rojo | 3b | 11cd | 13bc | 13.25bc | 13.45bc | 13.61bc | 13.61bc | 13.61bc | 13.61bc | 13.61bc |
| 4 | 12 | Azul | 2.5bc | 12.62ab | 13.2abc | 13.27bc | 13.37bc | 13.45bc | 13.48bc | 13.52bc | 13.52bc | 13.52bc |
| 5 | 6 | Azul | 2bcd | 11.37bc | 12.54bc | 12.85bc | 12.95c | 13.2bc | 13.23bc | 13.23bc | 13.23c | 13.23c |
| 6 | 3 | Azul | 1.25cde | 10.87cd | 12.54bc | 12.72bcd | 12.82cd | 12.87cd | 12.9cd | 13.03c | 13.03c | 13.03c |
| 7 | 12 | Verde | 1.5cd | 12abc | 13.16abc | 13.47abc | 13.67abc | 13.72abc | 13.72bc | 13.72bc | 13.72bc | 13.72bc |
| 8 | 6 | Verde | 0e | 10.87cd | 12.2cd | 12.45cd | 12.55cde | 12.68cde | 12.71cde | 12.78cd | 12.78cd | 12.78cd |
| 9 | 3 | Verde | 0.75de | 9.75de | 10.83e | 11.08e | 11.43e | 11.68e | 11.75e | 11.75d | 11.78d | 11.78d |
| Control | 0 | Blanca | 0e | 9e | 11.16de | 11.6de | 11.70de | 11.82de | 11.82de | 11.92d | 11.92d | 11.92d |

Medias con la misma letra en una columna son estadísticamente iguales (LSD, 0.05).

V_{xx} = velocidad de germinación a las xx horas.

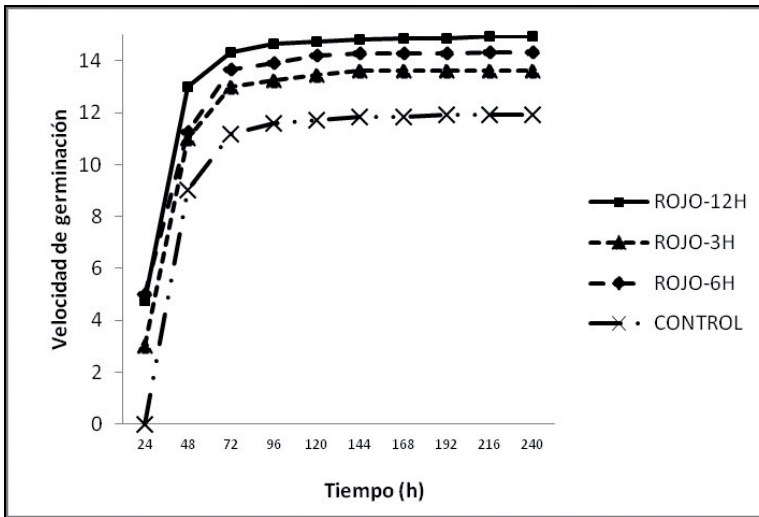


Fig. 1. Velocidad de germinación en tratamientos con luz LED de alta intensidad roja.

En la variable LMH la mayor longitud se presentó en el tratamiento siete (verde 12 h), seguido por el tratamiento uno (rojo 12 horas) con incrementos del 39% y 21% contra el control respectivamente, la menor longitud se registro en el tratamiento cuatro (azul 12 horas) donde las plántulas desarrollaron un hipocótilo 17% más corto que en el control (fig. 2).

En la variable PF se observa una tendencia de aumento en los tratamientos siete (verde 12 h) y ocho (verde seis horas y blanco seis horas) seguido por el uno (rojo 12 horas) con incrementos del 17%, 15% y 11% por arriba del control, respectivamente. Además el menor peso se obtuvo en el tratamiento cuatro (azul 12 horas) donde las plántulas presentaron un PF 4% menor al control (fig. 3).

Tabla 2. Valores promedio de las variables para semilla de brócoli expuesta a tratamientos de luz LED.

| Núm. tratamiento | Tiempo (h) | Luz | PGF (%) | LMH (cm) | PF (g) | PS (g) |
|------------------|------------|--------|---------|----------|----------|---------|
| 1 | 12 | rojo | 90a | 5.72b | 1.28ab | 0.097a |
| 2 | 6 | rojo | 89.16a | 4.37cd | 1.23abcd | 0.090ab |
| 3 | 3 | rojo | 91.66a | 4.6c | 1.26abc | 0.089ab |
| 4 | 12 | azul | 85a | 3.9e | 1.10d | 0.080c |
| 5 | 6 | azul | 88.33a | 3.95de | 1.25abcd | 0.083bc |
| 6 | 3 | azul | 90.83a | 4.37cd | 1.27ab | 0.092ab |
| 7 | 12 | verde | 95a | 6.57a | 1.35a | 0.090ab |
| 8 | 6 | verde | 93.33a | 5.37b | 1.33a | 0.095a |
| 9 | 3 | verde | 82.5a | 4.8c | 1.11cd | 0.076c |
| Control | 0 | blanca | 89.16a | 4.7c | 1.15bcd | 0.091ab |

Medias con la misma letra en una columna son estadísticamente iguales (LSD, 0.05).

PGF = porcentaje de germinación final, LMH = longitud media del hipocótilo, PF = peso fresco, PS = peso seco.

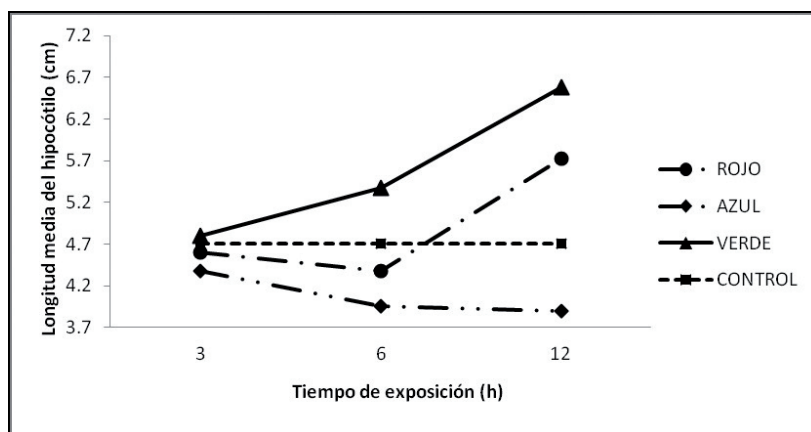


Fig. 2. Longitud media del hipocótilo para plántulas de brócoli provenientes de semillas tratadas con luz LED de alta intensidad.

Por otro lado, en la variable PS, el mayor peso se presentó en el tratamiento uno (rojo 12 horas) con incrementos respecto al control del 6%; por el contrario el menor peso lo obtuvo el tratamiento nueve (verde tres horas y blanco nueve horas) (fig. 4).

DISCUSIÓN

El crecimiento de plantas y hortalizas en ambiente controlado requiere de nutrimentos, agua, CO₂, temperatura y luz para un óptimo desarrollo. Diversas investigaciones han mostrado la influencia de la luz, como factor

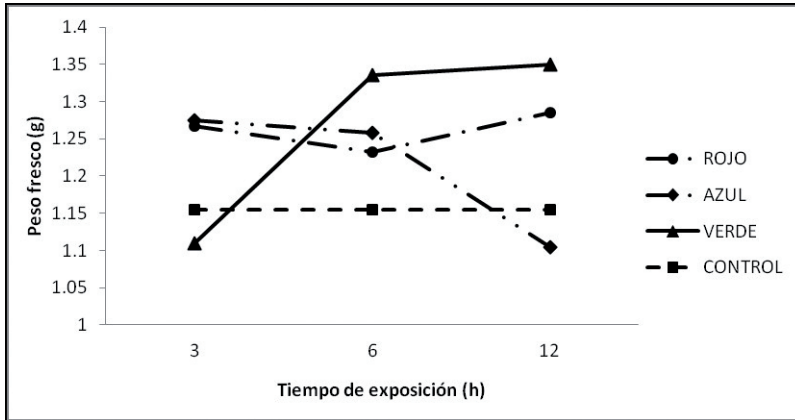


Fig. 3. Peso fresco promedio para plántulas de brócoli provenientes de semillas tratadas con luz LED de alta intensidad.

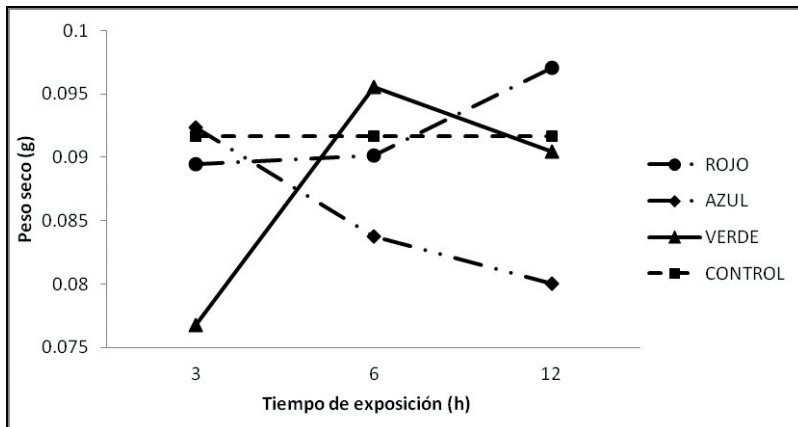


Fig. 4. Peso seco promedio para plántulas de brócoli provenientes de semillas tratadas con luz LED de alta intensidad.

para controlar morfogénesis y crecimiento en plantas (Folta, 2004; Ding *et al.*, 2010; Johkan *et al.*, 2012; Gupta y Jatothu, 2013). Características de la luz, como longitud de onda, dirección, intensidad y duración, proporcionan a las plantas señales que monitorean a través de fotorreceptores altamente sensibles y lo traducen a señales celulares,

que afectan los mecanismos endógenos de control de crecimiento y diferenciación. Como consecuencia, la luz modula una variedad de procesos en la vida de la planta, tales como germinación, etiolación de la plántula, evitación de sombra e inducción de floración, características definidas colectivamente como fotomorfogénesis (Galstyan y

Martínez, 2010). Generalmente, se ha hecho uso de lámparas fluorescentes en cámaras de crecimiento e invernaderos para promover el desarrollo de las plantas. Sin embargo, estas fuentes de luz contienen longitudes de onda innecesarias y de baja calidad para promover el crecimiento (Astolfi *et al.*, 2012). El uso de la tecnología LED ha emergido como una opción atractiva para el crecimiento de plantas en ambiente controlado (Yeh y Chung, 2009). Un menor consumo de energía (ahorro en costos del 40%), mayor vida útil del dispositivo en comparación a otros sistemas de iluminación, mayor velocidad de conmutación, mejor control del color y mayor intensidad luminosa son algunos de los beneficios de esta tecnología (Fillipo *et al.*, 2010). El objetivo del presente estudio fue evaluar el uso de luz LED de alta intensidad de tres longitudes de onda (rojo, azul y verde) con distintos tiempos de exposición (tres, seis y 12 horas), como una alternativa para la germinación y crecimiento inicial de plántulas de brócoli (*Brassica oleracea* L.).

Uno de los objetivos principales para la mejora de la producción agrícola, es obtener rápida germinación y uniforme emergencia de plántulas (Rajjou *et al.*, 2012), parámetros evaluados en el porcentaje (PGF) y velocidad de germinación (VG) en la presente investigación. La variable PGF no presentó diferencias significativas, sin embargo en la variable VG pudo apreciarse el efecto de la calidad de la luz ya que mostró diferencias significativas entre tratamientos, cuyos mejores resultados se presentaron en los tratamientos con luz LED de alta intensidad roja, los cuales están de acuerdo con lo reportado por otros autores que indican que la luz roja promueve la germinación de las semillas (Jha *et al.*, 2010); en esta investigación se pudo observar que a mayor tiempo

de exposición a la luz roja (seis y 12 horas), la velocidad de germinación de las semillas fue mayor, con incrementos del 20% y 25% contra el control respectivamente. Cabe resaltar que las condiciones de luz tienen un efecto sobre la velocidad de germinación (Wang y Folta, 2013). En general, semilla germinada en ambientes con una relación alta de luz rojo/rojo lejano, llegan a tener tasas de germinación elevadas (Dechaine *et al.*, 2009). Esto se reflejó en el experimento con luz LED de alta intensidad roja lo que la ubica como una opción viable para elevar la emergencia de plántulas de brócoli.

En la naturaleza las semillas germinan en la obscuridad al ser enterradas en el suelo, por lo que las plántulas desarrollan rápidamente hipocótilos que se alargan sin abrir los cotiledones por encima de la superficie. Al llegar a la luz, se inhibe el alargamiento del hipocótilo y los cotiledones empiezan a expandirse y comienza el desarrollo del aparato fotosintético. Estos cambios del desarrollo se denominan colectivamente de-etiolación (Fankhauser y Chory, 1997; Von Arnim y Deng, 1996). En general se puede mencionar que la luz provoca un rápido cese de la elongación en el desarrollo de la plántula para adoptar una estrategia de crecimiento vegetativo aéreo apropiado para el ambiente de luz (Wang y Folta, 2013). La luz roja y roja lejana disminuyen el alargamiento del hipocótilo actuando principalmente a través de los fitocromos phyB y phyA, respectivamente (Parks *et al.*, 2001). La luz azul inhibe fuertemente la elongación del tallo bajo tasas de iluminación alta (Folta y Spalding, 2001; Ahmad *et al.*, 2002). Este efecto es principalmente mediado por los criptocromos cry y se mantiene mientras la luz azul esté presente (Wang y Folta, 2013).

En el experimento se evaluó el crecimiento de las plántulas con la variable longitud media del hipocótilo (LMH), donde fue claro observar que los tratamientos con luz verde (12 horas) y luz roja (12 horas) lograron los mayores incrementos con 39% y 21% comparados al control respectivamente. El efecto de la luz verde es explicado por Wang *et al.* (2013) donde indica que este tipo de luz inactiva la acción de los criptocromos cry, por lo que el crecimiento del hipocótilo se mantiene. Estos resultados con luz verde están de acuerdo con lo expuesto por McCoshum y Kiss (2011) y Johkan *et al.* (2012), quienes indican que el crecimiento de plantas adultas y plántulas se mejora con el uso de luz verde. En otros cultivos como la col roja, incrementos similares se han obtenido con el uso de LEDs superbrillantes de color verde con una intensidad de 1200 lx (Matioc y Cachitã, 2012). Por el contrario todos los tratamientos con luz azul de esta investigación provocaron que el hipocótilo creciera mucho menos, donde a mayor tiempo de exposición menor fue el crecimiento lo que concuerda a lo descrito en párrafos anteriores para la luz azul. Resultados similares obtuvieron Shoji *et al.* (2010) y Kobayashi *et al.* (2013), donde el incremento de luz azul disminuyó la longitud del hipocótilo en plántulas de lechuga.

La variable PS mostró diferencias estadísticas significativas con incrementos contra el control de 6% y 4% para los tratamientos uno (rojo 12 horas) y ocho (verde seis horas y blanco seis horas), respectivamente. Por lo que respecta al PF se obtuvo incremento contra el control en los tratamientos siete (verde 12 horas), ocho (verde seis horas y blanco seis horas) y uno (rojo 12 horas) con incrementos de 17%, 15% y 11%, respectivamente. Algunos autores han indicado que

la iluminación con luz roja incrementa la tasa de fotosíntesis de la planta, originando incremento en el peso seco (Nishimura *et al.*, 2009), lo que podría explicar dicha situación. Con relación a la luz verde, investigaciones recientes consideran el uso de la misma para mejorar el crecimiento en combinación con otras longitudes de onda (Kim *et al.*, 2004; Massa *et al.*, 2008), como sucedió en esta investigación. Sommer y Franke (2006) indican que el uso de luz verde intensa es bioestimulador de semillas en presiembra, debido a que encontraron un considerable incremento de biomasa en plantas.

Es necesario considerar que existen tres grandes problemáticas globales de las cuales es prioritario encontrar soluciones, la necesidad de reducir la emisión de gases de efecto invernadero, ligados al cambio climático y los desastres naturales, así como el incremento continuo en la demanda por energía y alimento (Pinho *et al.*, 2012). Se estima que para el año 2050 será necesario elevar la producción alimentaria en un 50%, para evitar un desastre alimentario en el futuro (Murchie *et al.*, 2008). Por ello es necesario el uso de los avances tecnológicos para enfrentar estas problemáticas, como la alimentación de generaciones futuras. Debido a ello, la producción de vegetales en ambientes controlados es una posibilidad a considerar (Pinho *et al.*, 2012) y ésta ha empezado a crecer rápidamente en todo el mundo (Liu, 2012).

La utilización de sistemas de iluminación artificial para la producción en ambiente controlado es una oportunidad para incrementar los rendimientos en cultivos. La luz LED de alta intensidad podría ser una alternativa viable para usarse con estos propósitos. Sin embargo, es necesario lo-

grar mejor entendimiento de los procesos y mecanismos bajo los cuales las plantas responden a la luz (Pinho *et al.*, 2012). Esto sugiere que sea ineludible continuar realizando investigaciones relacionadas con los efectos del tratamiento con luz LED de alta intensidad, para la producción de brócoli y otras hortalizas en ambientes controlados.

CONCLUSIONES

El brócoli (*Brassica oleracea* L.) se ha convertido en una hortaliza de alta importancia debido a su alto valor nutricional además de sus compuestos anticancerígenos y antioxidantes. En el presente estudio se investigó el efecto de la luz LED de alta intensidad de tres longitudes de onda (rojo, azul, verde) en la germinación y crecimiento de plántulas de brócoli. Los resultados mostraron una mayor velocidad de germinación con respecto al control en semilla de brócoli en los tratamientos con luz LED roja de alta intensidad, donde a mayor tiempo de exposición hubo mayor velocidad. Los mayores incrementos en la longitud media del hipocótilo en plántulas de brócoli estuvieron en los tratamientos con luz verde (12 horas) y luz roja (12 horas). El mayor peso seco en plántulas de brócoli se presentó en los tratamientos con luz roja (12 horas) y verde (seis horas) y blanco (seis horas). Con base en los resultados encontrados en este estudio, las mejores respuestas para las variables evaluadas se obtuvieron para el tratamiento de luz LED roja de alta intensidad por 12 horas. Es necesario entender y separar los cambios fisiológicos inducidos por las distintas longitudes de onda de luz, con el fin de lograr ampliar el conocimiento acerca de la fotomorfogénesis en el cultivo del brócoli. El fin último de esta información es que pudiera servir a la producción agrícola

la en ambientes controlados, para producir cultivos de mayor calidad.

LITERATURA CITADA

- Ahmad, M.; N. Grancher, M. Heil, R.C. Black, B. Giovani, P. Galland, y D. Lardemer, 2002. "Action spectrum for cryptochrome-dependent hypocotyl growth inhibition in *Arabidopsis*". *Plant Physiology*, **129**: 774-785.
- AOSA, 1983. Association of Official Seed Analysis. Seed vigor hand testing book. Springfield, IL.
- Astolfi, S.; C. Marianello, S. Grego, y R. Bellarosa, 2012. "Preliminary Investigation of LED Lighting as Growth Light for Seedlings from Different Tree Species in Growth Chambers". *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, **40**(2): 31-38.
- Avercheva, O.V.; Yu.A. Berkovich, A.N. Erokhin, T.V. Zhigalova, S.I. Pogosyan, y S.O. Smolyanina, 2009. "Growth and photosynthesis of Chinese cabbage plants grown under Light-Emitting Diode-based light source". *Russian Journal of Plant Physiology*, **56**(1): 14-21.
- Barrera, C.A.; G.A. Rodríguez, y A.M.A. Molina, 2013. "Escenario actual de la obesidad en México". *Revista Médica del Instituto Mexicano del Seguro Social*, **51**(3): 292-299.
- Bourget, C.M., 2008. "An Introduction to Light-emitting Diodes". *Hortscience*, **43**(7): 1944-1946.

- Büchert, M.A.; L.M. Gómez, M.N. Villarreal, M.P. Civello, A.G. Martínez, 2011. "Effect of visible light treatments on postharvest senescence of broccoli (*Brassica oleracea* L.)". *Journal of the Science of Food and Agriculture*, **91**: 355-361.
- Chen M.; J. Chory, y C. Fankhauser, 2004. "Light signal transduction in higher plants". *Annual Review of Genetics*, **38**: 87-117.
- Dechaine, J.M.; G. Gardner, y C. Weinig, 2009. "Phytochromes differentially regulate seed germination responses to light quality and temperature cues during seed maturation". *Plant, Cell and Environment*, **32**: 1297-1309.
- Ding Y.; S. He, J.A. Teixeira da Silva, G. Li, y M. Tanaka, 2010. "Effects of a new light source (cold cathode fluorescent lamps) on the growth of tree peony plantlets *in vitro*". *Scientia Horticulturae*, **125**: 167-169.
- Fankhauser, C., y J. Chory, 1997. "Light control of plant development". *Annual Review of Cell and Development Biology*, **13**: 203-229.
- FAO, 2006. "Más frutas y hortalizas". <http://www.fao.org/ag/esp/revista/0606sp2.htm>. Consultado en marzo 2012.
- FAOSTAT, 2011. "Agricultural Production. Crops Primary" (<http://faostat.fao.org/site/336/default.aspx>) consulta: diciembre 2012.
- Fillipo, R.V.H.; G.H.B. Cano, y O.J.A. Chaves, 2010. "Aplicaciones de iluminación con leds". *Scientia et Technica*, **16**(45): 13-18.
- Folta, K.M., y E.P. Spalding, 2001. "Unexpected roles for cryptochrome 2 and phototropin revealed by high-resolution analysis of blue light-mediated hypocotyl growth inhibition". *Plant Journal*, **26**: 471-478.
- Folta, K.M., 2004. "Green light stimulates early stem elongation, antagonizing light-mediated growth inhibition". *Plant Physiology*, **135**: 1407-1416.
- Folta, K.M., y K.S. Childers, 2008. "Light as a growth regulator: Controlling plant biology with narrow-bandwidth solid-state lighting systems". *Hortscience*, **43**: 1957-1964.
- Galstyan, A., y G.J.F. Martínez, 2010. *Plant Developmental Biology-Biotechnological Perspectives*. volume 2. Pua and Davey (editors), Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Capítulo 14.
- Gupta, S.D., y B. Jatothu, 2013. "Fundamentals and applications of light-emitting diodes (LEDs) in *in vitro* plant growth and morphogenesis". *Plant Biotechnology Reports*, **7**(3): 211-220.
- Hall, R.D., y L.E. Wiesner, 1990. "Relationship between seed vigor test and field performance of "Regar" Meadow Bromegrass". *Crop Science*, **30**: 967-970
- ISTA, 2010. *Tablas de prueba de semillas*, 2010. Published by the International Seed Testing Association.

- Jeffery, E.H.; A.F. Brown, A.C. Kurilich, A.S. Keck, N. Matusheski, B.P. Klein, y J.A. Juvik, 2003. "Variation in content of bioactive components in broccoli". *Journal of Food Composition and Analysis*, **16**: 323-330.
- Jha, P.; J.K. Norsworthy, M.B. Riley, y W. Jr. Bridges, 2010. "Annual Changes in Temperature and Light Requirements for Germination of Palmer Amaranth (*Amaranthus palmeri*) Seeds Retrieved from Soil". *Weed Science*, **58**: 426-432.
- Johkan, M.; K. Shoji, F. Goto, S. Hahida, y T. Yoshihara, 2012. "Effect of green light wavelength and intensity on photomorphogenesis and photosynthesis in *Lactuca sativa*". *Environmental and Experimental Botany*, **75**: 128-133.
- Kim, H.H.; G.D. Goins, R.M. Wheeler, y J.C. Sager, 2004. "Green light supplementation for enhanced lettuce growth under red- and blue-light-emitting diodes". *Hortscience*, **39**(7): 1617-1622.
- Kobayashi, K.; T. Amore, y M. Lazaro, 2013. "Light-Emitting diodes (LEDs) for Miniature Hydroponic Lettuce". *Optics and Photonics Journal*, **3**: 74-77.
- Kozai, T., 2007. "Propagation, grafting and transplant production in closed systems with artificial lighting for commercialisation in Japan". *Propagation of Ornamental Plants*, **7**: 145-149.
- Liu, W., 2012. "Light Environmental Management for Artificial Protected Horticulture". *Agrotechnology*, **1**: 1-4.
- Massa, G.D.; H.H. Kim, R.M. Wheeler, y C.A. Mitchell, 2008. "Plant productivity in response to LED lighting". *Hortscience*, **43**(7): 1951-1956.
- Matioc, P.M., y C.D. Cachiță, 2012. "The germination and growth of *Brassica oleracea* L. var. *capitata* f. *rubra* plantlets under the influence of colored light of different provenance". *Studia Universitatis Vasile Goldiș*, **22**: 193-202.
- McCoshum, S., y J.Z. Kiss, 2011. "Green light affects blue-light-based phototropism in hypocotyls of *Arabidopsis thaliana*". *Journal of the Torrey Botanical Society*, **138**(4): 409-417.
- Moreno, M.E., 1996. *Análisis físico y biológico de semillas agrícolas*. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Murchie, H.E., M. Pinto, y P. Horton, 2008. "Agriculture and the new challenges for photosynthesis research". *New Phytologist*, **181**: 532-552.
- Nishimura, T.; K. Ohyama, E. Goto, y N. Inagaki, 2009. "Concentrations of perillaldehyde, limonene, and anthocyanin of *Perilla* plants as affected by light quality under controlled environments". *Scientia Horticulturae*, **122**: 134-137.
- Paniagua, P.G.; A.C. Hernández, M.F. Rico, P.A. Domínguez, C.L. Martínez, y O.E. Martínez, 2013. "High intensity led light in lettuce seed physiology (*Lactuca sativa* L.)". *Acta Agrophysica*, **20**(4): 665-677.

- Parks, B.M.; K.M. Folta, y E.P. Spalding, 2001. "Photocontrol of stem growth". *Current Opinion in Plant Biology*, **4**: 436-440.
- Pinho, P.; K. Jokinen, y L. Halonen, 2012. "Horticultural lighting – present and future challenges". *Lighting Research & Technology*, **44**: 427-437.
- Rajjou, L.; M. Duval, K. Gallardo, J. Catusse, J. Bally, C. Job, y D. Job, 2012. "Seed Germination and Vigor". *Annual Review of Plant Biology*, **63**: 507-533.
- SAS, 2010. *Statistical Analysis System for Windows*. Release 9.0. SAS Institute Inc., Cary, N. C. USA.
- Shoji, K.; M. Johkan, F. Goto, S. Hashida, y T. Yoshihara, 2010. "Blue Light-emitting Diode Light Irradiation of Seedlings Improves Seedling Quality and Growth after Transplanting in Red Leaf Lettuce". *Hortscience*, **45**(12): 1809-1814.
- Sommer, P.A., y P.R. Franke, 2006. "Plants grow better if seeds see green". *Naturwissenschaften*, **93**(7): 334-337.
- Spalding, E.P., y K.M. Folta, 2005. "Illuminating topics in plant photobiology". *Plant, Cell and Environment*, **28**: 39-53.
- Von Arnim, A., y X.W. Deng, 1996. "Light control of seedling development". *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, **47**: 215-243.
- Wang, Y., y K.M. Folta, 2013. "Contributions of green light to plant growth and development". *American Journal of Botany*, **100**(1): 70-78.
- Xiaoying, L.; G. Shirong, C. Taotao, X. Zhigang, y T. Tezuka, 2012. "Regulation of the growth and photosynthesis of cherry tomato seedlings by different light irradiations of light emitting diodes (LED)". *African Journal of Biotechnology*, **11**: 6169-6177.
- Xu, H.I.; Q. Xu, F. Li, Y. Feng, F. Qin, y W. Fang, 2012. "Applications of xerophytophysiology in plant production-LED blue light as a stimulus improved the tomato crop". *Scientia Horticulturae*, **148**: 190-196.
- Yeh, N., y J.P. Chung, 2009. "High-brightness LEDs-Energy efficient lighting sources and their potential in indoor plant cultivation". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **13**: 2175-2180.
- Yorio, N.C.; G.D. Goins, H.R. Kagie, M.R. Wheeler, y J.C. Sager, 2001. "Improving Spinach, Radish, and Lettuce Growth under Red Lightemitting Diodes (LEDs) with Blue Light Supplementation". *Hortscience*, **36**(2): 380-383.
- Zhang T., y K.M. Folta, 2012. "Green light signaling and adaptive response". *Plant Signaling & Behavior*, **7**(1): 1-4.

Recibido: 14 de febrero de 2014. Aceptado: 29 de mayo de 2015.