

**REPÚBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR**



**UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS “CARLOS RAFAEL RODRÍGUEZ”
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS**

**TRABAJO DE DIPLOMA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÓNOMO**

TÍTULO

**EFECTO DE LAS DIFERENTES LONGITUDES DE ONDA DE LA LUZ EN EL
DESARROLLO VEGETATIVO DE EXPLANTES DE PLÁTANO (*MUSA
BALBISIANA*) EN FASE AHIJAMIENTO Y ENRAIZAMIENTO**

Autora:

Yezenia Despaigne Sosa

Tutor:

MSc. Enrique Rafael Parets Selva

2023

Año 65 de la Revolución

PENSAMIENTO

"Abusamos de la tierra porque la tratamos como si fuese nuestra. Cuando la veamos como una oportunidad a la que pertenecemos, puede que la tratemos con amor y respeto."

Aldo Leopold

Silvicultor

DEDICATORIA

Dedico toda mi tesis a mis padres, a mi esposo y a todos mis familiares que me han apoyado en todo el transcurso de mi carrera de una forma u otra gracias muchas gracias por tanto amor y apoyo

AGRADECIMIENTOS

- Les doy mis más sinceros agradecimientos a mi familia de manera general.
- A la universidad de Cienfuegos "Carlos Rafael Rodríguez".
- A mi tutor por su apoyo durante la realización de este trabajo de diploma.
- A la Biofábrica de la Provincia de Cienfuegos, donde me fue posible la realización de la investigación y a todo ese gran colectivo de trabajadores
- A mis compañeros de trabajo por su apoyo

A TODOS MUCHAS GRACIAS ¡!!!!!!

RESUMEN

La presente investigación se desarrolló en la Biofábrica de Cienfuegos. La misma tuvo como objetivo evaluar el efecto de las diferentes longitudes de onda de la luz (LED) sobre variables morfológicas y desarrollo vegetativo en Explantes de plátano (*Musa balbisiana*) variedad Curare Enano, en la fase de multiplicación y enraizamiento utilizando como fuentes emisoras luces LED. Para ello se utilizó un diseño completamente aleatorizado con 5 tratamientos y tres replicas. Los tratamientos estudiados fueron: Tratamiento a la luz azul (440nm), Tratamiento a la luz blanca (380nm), Tratamiento a la luz roja (627nm), y Tratamiento a la luz verde (547nm), Tratamiento naranja (588nm). Se evaluaron variables morfológicas como número de hijos, numero de hojas, numero de raíces, diámetro basal del tallo, masa seca, longitud del tallo, longitud de hojas. En la fase de multiplicación, la luz roja emitida por LED favoreció la formación de hijos y el porcentaje de masa seca en los explantes evaluados. En la fase de enraizamiento la luz roja favoreció el número de hojas y el incremento del diámetro basal del tallo, mientras que la longitud de las hojas se vio beneficiada por la luz azul. En los tratamientos con longitudes de onda correspondientes a la luz naranja y luz blanca se detectaron contaminaciones con hongos filamentosos con 24,4 % y 17,7 % de incidencia respectivamente. Concluyendo que las diferentes longitudes de onda tienen efectos significativos en el desarrollo vegetativo de Explantes de plátano (*Musa balbisiana*) por lo que su implementación puede ser positiva.

PALABRAS CLAVES:

Variables morfológicas, Desarrollo vegetativo, Fuentes emisoras, LED y Explantes

ABSTRACT

This research was carried out at the Cienfuegos Biofactory. The objective of this study was to evaluate the effect of different wavelengths of light (LED) on morphological variables and vegetative development in banana (*Musa balbisiana*) Dwarf Curare variety explants, in the multiplication and rooting phase using as emission sources light. LED. For this, a completely randomized design was used with 5 treatments and three replications. The treatments studied were: Blue light treatment (440nm), White light treatment (380nm), Red light treatment (627nm), and Green light treatment (547nm), Orange treatment (588nm). Morphological variables such as number of tillers, number of leaves, number of roots, basal stem diameter, dry mass, stem length, and leaf length were evaluated. In the multiplication phase, the red light emitted by LED favors the formation of offspring and the percentage of dry mass in the explants evaluated. In the rooting phase, red light favored the number of leaves and an increase in the basal diameter of the stem, while the length of the leaves benefited from blue light. In treatments with wavelengths corresponding to orange light and white light, contamination with filamentous fungi was detected with 24.4% and 17.7% incidence respectively. Concluding that different wavelengths have significant effects on the vegetative development of banana explants (*Musa balbisiana*) so their implementation can be positive.

KEY WORDS:

Morphological variables, Vegetative development, Emitting sources, LED and Explants

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
Problema Científico	3
Hipótesis.....	3
Objetivo general:.....	3
Objetivos específicos:.....	3
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	4
Plátano Vianda (Clon Curare Enano).....	4
Fundamentos teóricos acerca de las ondas de la luz en el desarrollo vegetativo in vitro.	5
MATERIALES Y MÉTODOS.....	20
Ubicación.....	20
Material vegetal	21
Descripción y montaje del ensayo	22
Análisis estadísticos de los resultados	23
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	24
Resultados de la fase de multiplicación	24
CONCLUSIONES	32
RECOMENDACIONES	33
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	34
ANEXOS	1

INTRODUCCIÓN

El banano y el plátano (*Musa* spp. L.) son hierbas perennes monocotiledóneas gigantes que se encuentran en los trópicos húmedos y subhúmedos en altitudes de bajas a medias. Se originaron principalmente en el sureste de Asia, con centros secundarios de diversidad en África Occidental y Central (subgrupo Plantain) y en las tierras altas de África Oriental (subgrupo Lujugira). Pertenecen al género *Musa*, el cual comprende más de 1000 variedades en cuatro secciones: *Australimusa*, *Callimusa*, *Rhodochlamys* y *Eumusa* (Simmonds y Shepherd 1955). La mayoría de las especies de *Musa* cultivadas pertenecen a la sección *Eumusa* y producen frutos que son uno de los principales productos alimenticios básicos en el comercio internacional y que son aún más importantes como fuente de carbohidratos en las economías alimenticias locales de muchos países en desarrollo (Alcivar, 2015). El sistema debe considerarse como una nueva alternativa tecnológica de producción cuya base es la alta densidad de siembra (AD), la cual sin embargo depende de varias actividades que se apoyan y complementan entre sí. Se podría decir que es un sistema aditivo, en el cual cada vez que se elimina uno de sus componentes, se reduce el total productivo esperado. Como ejemplo mencionamos que con su adecuada aplicación en Cuba ha sido posible obtener hasta 78 ton/ha de plátano para consumo local y en Costa Rica hasta más de 1000 cajas/ha de 23 kg de fruta fresca para exportación. Por lo anterior, se recomienda seguir fielmente las indicaciones aquí descritas con el propósito de obtener la máxima expresión productiva del cultivo del plátano (Ferosales, 2016).

El cultivo de plantas *in vitro* es una técnica que requiere un control ambiental tanto físico y químico sumamente exigentes, por lo que se debe controlar y optimizar estos factores. Dentro de los principales factores abióticos que se pueden considerar, están: composición del medio de cultivo, pH, temperatura, humedad, luz y fotoperiodo (Cabezas, 2020).

Debido a ello, los sistemas de iluminación para la producción en ambiente controlado son de suma importancia, así como los avances tecnológicos que puedan surgir en el área. Recientemente la luz LED (light emitting diode) se ha convertido en una alternativa para el cultivo de plantas 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 (Jatothu, 2013).

El plátano (*Musa acuminata*/*Musa balbisiana*) como alimento es considerado uno de los cultivos más importantes en el mundo, ocupa el cuarto lugar en importancia después del arroz, trigo y leche. Se cultiva extensivamente en los trópicos y en las zonas templadas. Es apreciado por su sabor, valor nutritivo y su disponibilidad como alimento durante todo el año. Representa una importante fuente de alimentos en áreas rurales de casi todos los países tropicales y subtropicales.

El efecto de la luz y su calidad e intensidad ha sido el propósito de diversas investigaciones, con el fin determinar las diferentes longitudes de ondas maximizando el efecto morfogénico. Las longitudes de onda entre 300 y 900 nm son capaces de influenciar el crecimiento y desarrollo de las plantas, además de su intensidad y duración junto con los factores climáticos (Posada, 2015).

La aparición de los LED ha permitido brindar a los cultivos una especificidad de longitudes de onda acorde a sus necesidades y condiciones de cultivo. Esto favorece la aplicabilidad de esta tecnología de iluminación en la propagación in vitro de plantas y cultivos con luz artificial. El uso de los LED en la agricultura se ha ido incrementando en los últimos años, como resultado del desarrollo creciente de programas de investigaciones y el perfeccionamiento de la tecnología que disminuyen paulatinamente los costos de explotación. Sin embargo, en Cuba son escasas las referencias de estudios sobre la respuesta del cultivo de plátano in vitro a la exposición a diferentes longitudes de onda emitidas por LED.

EL análisis de la producción de plátanos y bananos en Cuba con enfoque de cadena, promueve una mejora en la calidad de la producción, modifica su destino y sienta pautas para la obtención de resultados productivos eficientes en el sistema agroproductivas cubano. Como resultado, se hace una propuesta de estrategia para la actualización de la cadena y una mejora en la gestión de la misma. Las estrategias de mejora que se proponen a las principales brechas

detectadas, permiten orientar el trabajo hacia la mejora de la cadena tradicional de plátanos y bananos y su completamiento.

En todo el país la posibilidad de emplear bioestimulantes cubanos, como sustitutos de los reguladores del crecimiento tradicionales en la propagación masiva de los plátanos y bananos, producidos en el país a un menor costo y sin necesidad de recurrir a las importaciones, abriría una nueva perspectiva para las Biofábrica que actualmente se dedican a la multiplicación del género *Musa* en Cuba, así como incrementaría las potencialidades exportables de los productos biotecnológicos cubanos.

Problema Científico

¿Cuál será el efecto de las diferentes longitudes de onda de la luz LED en el desarrollo vegetativo de explantes de clon de plátano Curare enano, en la fase ahijamiento y enraizamiento en la Biofábrica de Cienfuegos?

Hipótesis

Conociendo el efecto de las diferentes longitudes de onda de la luz LED, sobre el desarrollo vegetativo de explantes de plátano (*Musa balbisiana*) en las fases multiplicación y enraizamiento; se podrá mejorar el desarrollo vegetativo en los explantes de plátano para las condiciones actuales en la Biofábrica de Cienfuegos.

Objetivo general:

Evaluar el efecto de las diferentes longitudes de onda de la luz LED en el desarrollo vegetativo de explantes de *Musa balbisiana* (clon “Curare enano”) en las fases multiplicación y enraizamiento.

Objetivos específicos:

- Evaluar el comportamiento de las variables morfológicas de los explantes de plátano (*Musa balbisiana*), clon “Curare enano”, expuestos a diferentes longitudes de ondas de la luz LED.
- Evaluar la presencia de contaminaciones con agentes patógenos.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Plátano Vianda (Clon Curare Enano)

El plátano Enano Falso cuerno o Curare Enano (*Musa balbisiana*) AAB es una planta que tiene una altura promedio de 2.50m lo que la hace más resistente al acame causado por el viento. Posee un pseudo tallo grueso con un diámetro mayor de 25 cm con abundantes hojas anchas, racimos cortos con un promedio de 40-42 frutos.

Según plantea Castellón-Muller (2017) que la distancia recomendada depende de: tipo de mantenimiento que se le dará a la plantación, si es para mercado nacional o exportación, si se asociará con otros cultivos; la fertilidad del suelo y Variedad. Las distancias varían de 3 x 3 metros en cuadro o en triángulo, lo cual implica 1.111 y 1.280 plantas por hectáreas. Los arreglos cuadrados y triangulares son fáciles de implementar. Los arreglos de doble surco tienen dos hileras pegadas (1 a 1.5 m de separación) y un espacio grande (3 a 4 m entre hileras dobles); esto facilita las labores culturales y los controles fitosanitarios. Las primeras fases de crecimiento de las plantas son decisivas para el desarrollo futuro, por tanto es recomendable en el momento de la siembra utilizar un fertilizante rico en fósforo. Cuando no haya sido posible la fertilización inicial, la primera fertilización se hará cuando la planta tenga entre 3-5 semanas. Se recomienda abonar al pie que distribuir el abono por todo el terreno, ya que esta planta extiende poco las raíces. A los dos meses aplicar urea o nitrato amónico y repetir a los 3 y 4 meses. Al quinto mes se debe hacer una aplicación de un fertilizante rico en potasio, por ser uno de los elementos más importantes para fructificación del cultivo. En plantaciones adultas, se seguirá empleando una fórmula rica en potasio, distribuida en el mayor número de aplicaciones anuales, sobre todo en suelos ácidos. En los últimos años el plátano ha sido el cultivo más sembrado en el país en comparación con cultivos ya establecidos predominantes en el país, siendo uno de los más importantes con una alta producción para la seguridad alimentaria y educación nutricional (SAN).

Fundamentos teóricos acerca de las ondas de la luz en el desarrollo vegetativo in vitro.

1.1.1. Las propiedades ondulatorias de la luz: su importancia

La luz es un factor ambiental importante para el crecimiento y desarrollo de las plantas, ya que provee la energía necesaria para la fotosíntesis, con la cual se produce la materia orgánica para su crecimiento y desarrollo. La luz tiene propiedades ondulatorias, lo que significa que se propaga en forma de ondas. Estas ondas tienen diferentes longitudes y frecuencias, lo que determina su color y su capacidad para ser absorbidas por las plantas (Chen, 2023).

La luz también puede ser reflejada y refractada, lo que permite que las plantas puedan recibir luz desde diferentes ángulos y direcciones.

De acuerdo con Chen (2023), la importancia de las propiedades ondulatorias de la luz para las plantas radica en que las diferentes longitudes de onda de la luz son absorbidas por los pigmentos fotosintéticos de las plantas, como la clorofila y los carotenoides, para llevar a cabo la fotosíntesis. Además, la cantidad, calidad y duración de la luz que recibe una planta puede influir en su crecimiento y desarrollo, ya que afecta la actividad fotosintética y la producción de carbohidratos.

Por lo tanto, es importante comprender las propiedades ondulatorias de la luz para poder proporcionar a las plantas la cantidad y calidad de luz adecuadas para su crecimiento y desarrollo óptimos.

La luz tiene varias propiedades, entre las que se destacan:

- Propagación en línea recta: La luz se propaga en línea recta y por eso se pueden observar sombras cuando ilumina un objeto.
- Reflexión: Cuando un rayo de luz llega a una superficie opaca, cambia de dirección y de sentido. Este hecho físico se conoce como reflexión.
- Refracción: La refracción es el cambio brusco de dirección que sufre la luz al cambiar de medio. Este fenómeno se debe al hecho de que la luz se propaga a diferentes velocidades según el medio por el que viaja.

Además de estas propiedades, la luz también tiene otras propiedades como la longitud y la intensidad, y puede torcerse sobre sí misma sin necesidad de injerencias externas, lo que se conoce como momento angular orbital (OAM).

La torsión es una propiedad que está presente en otros sistemas, pero siempre cuando es provocada por fuerzas externas. En la luz, el giro sobre su propio eje ocurre por sí mismo.

1.2. Naturaleza de la luz y su interacción con las plantas

Múltiples son los factores climáticos que intervienen en el desarrollo de las plantas, entre ellos el CO₂, temperatura, humedad, entre otros; sin embargo, la luz es uno de los más importantes Acosta (2003). Es un factor imprescindible para que la planta pueda llevar a cabo la fotosíntesis y de la que depende directamente para sintetizar la materia orgánica a partir de sustancias minerales. La luz provee la energía necesaria para que la planta realice la fotosíntesis, con la cual se produce la materia orgánica para su crecimiento y desarrollo.

De acuerdo con Cordero (2020), la fotosíntesis es el proceso en el cual la energía de la luz se convierte en energía química en forma de azúcares. En un proceso impulsado por la energía de la luz, se crean moléculas de glucosa (y otros azúcares) a partir de agua y dióxido de carbono, mientras que se libera oxígeno como subproducto. Las moléculas de glucosa proporcionan a los organismos dos recursos cruciales: energía y carbono fijo (orgánico).

- **Energía.** Las moléculas de glucosa sirven como combustible para las células: su energía química puede obtenerse a través de procesos como la respiración celular y fermentación, que genera trifosfato de adenosina (una molécula pequeña portadora de energía) para las necesidades de energía inmediatas de la célula.
- **Carbono fijo.** Cuando el carbono del dióxido de carbono —carbono inorgánico— se incorpora a moléculas orgánicas, este proceso se llama fijación de carbono, mientras que el carbono de moléculas orgánicas se conoce como carbono fijo. El carbono que está fijo y se ha incorporado a los azúcares durante la fotosíntesis puede utilizarse para crear otros tipos de moléculas orgánicas que necesitan las células (figura 1).

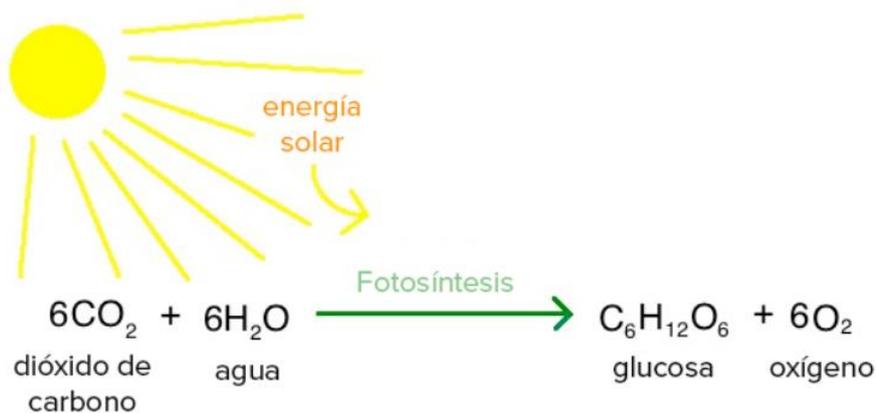


Figura 1. Representación del proceso de fotosíntesis.

El proceso de fotosíntesis es de vital importancia ecológica. Los organismos fotosintéticos, como plantas, algas y algunas bacterias, cumplen una función ecológica clave: introducen la energía química y el carbono fijo en los ecosistemas mediante el uso de la luz para sintetizar azúcares. Dado que producen su propio alimento (es decir, fijan su propio carbono) con la energía de la luz, estos organismos se llaman fotoautótrofos, literalmente, “organismos que se alimentan a sí mismos al utilizar luz”(Cordero, 2020).

Además de introducir carbono fijo y energía en los ecosistemas, la fotosíntesis también afecta la composición de la atmósfera de la Tierra. La mayoría de los organismos fotosintéticos producen gas oxígeno como subproducto. Se cree que la aparición de la fotosíntesis —hace unos mil millones de años en las bacterias que se asemejan a las cianobacterias modernas— cambió para siempre la vida en el planeta Tierra.

Los organismos fotosintéticos también retiran grandes cantidades de dióxido de carbono de la atmósfera y utilizan los átomos de carbono para crear moléculas orgánicas. Si las plantas y algas no abundaran en la Tierra ni aspiraran continuamente el dióxido de carbono, el gas se acumularía en la atmósfera. Aunque los organismos fotosintéticos eliminan parte del dióxido de carbono producido por las actividades humanas, los niveles atmosféricos en aumento están reteniendo el calor y provocando que el clima cambie. Muchos científicos creen que la conservación de bosques y otros espacios de vegetación es cada vez más importante para combatir este aumento en los niveles de dióxido de carbono.

Por tanto, en la fotosíntesis, se captura energía solar y se convierte en energía química en forma de glucosa, mediante el uso de agua y dióxido de carbono. El oxígeno se libera como subproducto.

1.2.1. Fotomorfogénesis

El control de la morfogénesis por la luz se denomina fotomorfogénesis, es decir los efectos provocados por los cambios en la cantidad y composición espectral de la luz en la inducción, crecimiento y desarrollo de órganos. Este proceso es completamente separado de la fotosíntesis, donde distintos patrones de crecimiento responden al espectro de luz (Beltrano&Giménez,2020). La luz puede afectar el desarrollo de las plantas ya sea como fuente de energía, calor o información. La composición espectral, intensidad, dirección y fotoperiodo son aspectos que cambian y afectan su crecimiento. Uno de los entes que se encargan de que el proceso de absorción de luz sea ejecutado son los fotorreceptores, estas moléculas proteicas son capaces de absorber luz ya que poseen cromóforos. Dentro de las plantas se han encontrado varios tipos de estos, como: los fitocromos que son capaces de absorber luz roja comprendida entre 600 y 700 nm y roja lejana entre 700-800 nm, estos poseen dos formas interfotocromos conocidas como fitocromo rojo (Fr) y fitocromo rojo lejano (Frl), cambiando de una forma a otra dependiendo de la luz (Taiz & Zeiger , 2016).

Luego, tenemos a los criptocromos y las fototropinas que son receptores de luz azul de 400-500 nm y ultravioleta A de 320-400 nm. Actualmente se han encontrado fotorreceptores de ultravioleta B entre 280-320 nm, pero no se han definido (Carrasco Ríos, 2019). Entre estos pigmentos que propician la fotomorfogénesis, los más importantes son los que absorben luz roja y azul. La adecuada presencia de luz roja y el correcto funcionamiento de los fitocromos conllevan a varios efectos como fomentar la germinación, caída de hojas, correcta formación de primordios foliares, desarrollo de hojas primarias, inhibición de elongación intermodal; y en los pigmentos que absorben luz azul como efectos positivos tenemos la elongación del hipocotíleo, estimulación de síntesis de pigmentos fotosintéticos, activación de la expresión génica, aumento de la respiración celular y movimiento de los estomas y fototropismo (Pancorbo et al., 2017) y Olmos et al., 2010).

La actividad fotosintética en las plantas y su eficacia aumenta con la luz, la temperatura y el CO₂, por lo que, si se quiere conseguir un buen desarrollo del cultivo y un incremento de la productividad, hay que garantizar una buena y correcta iluminación. Cuanto mayor es la iluminación, más eficaz es la fotosíntesis y más rápido se puede llegar a desarrollar la planta. Sin embargo, a medida que la intensidad de la luz aumenta, la velocidad de la fotosíntesis alcanza un límite. Según varios autores, a este punto máximo se le denomina “punto de saturación de la luz”, a partir del cual la velocidad del proceso físico-químico de la fotosíntesis se vuelve plana.

La cantidad de luz recibida por la planta dependerá de dos factores principalmente; de la intensidad y del número de horas diarias de exposición. A los cambios de iluminación que reciben las plantas se denomina fotoperiodo, y el tiempo de exposición o las horas de luz necesarios para que el cultivo pueda desarrollarse y llegar a la floración, varía según la especie.

Todas las plantas necesitan luz y por debajo de un determinado umbral, muy pocas consiguen subsistir. Pero tanto el exceso como la falta de luz ocasionan en las plantas consecuencias nocivas. Las plantas que reciben insuficientes niveles de luz tienen menor crecimiento vegetativo, menor floración, se debilitan y producen hojas más pequeñas. Por otro lado, las plantas que reciben demasiada luz pueden producir lo que se denomina clorosis (La clorosis es el amarillamiento del tejido foliar causado por la falta de clorofila).

Por tanto, este parámetro se considera de vital importancia, de ahí la necesaria supervisión del mismo.

1.3. La actividad fotosintética en las plantas

La luz es la fuente de energía de las plantas, esta es un conjunto de ondas electromagnéticas de distintas frecuencias. Para su proceso de fotosíntesis las plantas aprovechan únicamente una pequeña parte del espectro electromagnético, específicamente dentro de los 400 a 700 nanómetros. Este rango se le conoce como radiación fotosintéticamente activa (RFA) y se encuentra ubicada entre las radiaciones UV e infrarrojas. Las plantas absorben esta fuente de energía por medio de biomoléculas fotosensibles y es utilizada en la fotosíntesis al ser convertida en una forma de energía bioquímicamente

estable. Este es un proceso biológico que consta de dos partes, la primera es la absorción de la luz por complejos de pigmento-proteína llamadas antenas cosechadoras de luz, esta energía llega hasta los centros de reacción de los fotosistemas, donde obtiene ATP y NADPH, necesarios para la siguiente fase. La segunda fase comprende la captura y asimilación biológica de los elementos presentes en la materia orgánica, necesarios para la construcción biomolecular. Estas fases son denominadas convencionalmente fase luminosa y oscura (De Las Rivas & Zeiger, 2015).

La luz es absorbida principalmente por dos pigmentos fotosintéticos, estas moléculas son sensibles a la radiación luminosa y se encuentran enlazados con los complejos pigmento proteína. La clorofila es el pigmento más importante, ya que está relacionado directamente en el proceso de absorción y conversión de energía específicamente de la zona del color azul y rojo. Los carotenoides son otro pigmento que tienen como función principal proteger, por medio de mecanismos de disipación y extinción de energía, el aparato fotosensible y como función secundaria ser antenas, sobre el espectro de luz entre los 400 y 500 nm, lo que corresponde al color azul y verde, en el cual las clorofilas absorben muy poco (De Las Rivas & Zeiger, 2015). Por ende, la calidad de luz que reciba una planta afecta no solo a la fotosíntesis proporcionando la energía necesaria para que esta ocurra, sino también en distintos procesos morfofisiológicos conocidos como fotomorfogénesis. Además de este factor, la intensidad de la luz que incide sobre las superficies fotosintéticas determina en gran medida la capacidad fotosintética de estas. La intensidad de la luz influye directamente la morfología de las plantas, estos requerimientos diferencian de cada tipo de planta y del estado que se encuentre en la micropropagación. El espectro y la densidad de flujo de fotones son dos de los principales factores que ayudan al desarrollo de las plantas. La densidad de flujo de energía irradiante y la densidad de flujo de fotones (DFF) son comúnmente usadas para medir la intensidad (Sager & McFarlane, 1997).

Para la agricultura se ha venido utilizando la densidad de flujo de fotones fotosintéticos (DFFF), esta es expresada en mol de fotones/m²/s, la cual es el total de cantidad de RFA (400-700 nm) que llega a un área determinada por cada segundo. Aunque la intensidad es importante para el desarrollo de las

plantas, la cantidad de luz acumulada que esta recibe durante el transcurso de un día determina su desarrollo. La integral de luz diaria (ILD) es la medición de esta y se encuentra compuesta por la DFFF sumado a la cantidad de tiempo que se ha expuesto la planta a la luz en un día, en función de la intensidad y duración de la luz fotosintética (Gosselin & Demers, 2017).

Finalmente, otro factor para tener en cuenta es el número diario de horas luz que recibe el cultivo, conocido como fotoperiodo, el cual tiene la capacidad de activar algunos fenómenos propios del desarrollo de las plantas como la germinación y floración (Wampash GB et al., 2016).

1.4. La luz en la micropropagación

La micropropagación es una de las aplicaciones del cultivo de tejidos vegetales y una de las biotecnologías agrícolas más usadas para la producción masiva de plántulas, esta se centra en el cultivo de explantes en ambientes controlados. En este ambiente artificial se busca conseguir excelentes condiciones de luz (calidad, intensidad y duración), humedad y temperatura. La asepsia o ausencia de microorganismos o agentes patógenos también es clave (Suarez, 2020)

Estos explantes se encuentran bajo una nutrición heterotrófica, empleando un medio de cultivo que actúa como sustrato y fuente energética dentro de envases plásticos o de vidrio. El medio de cultivo este compuesto, de una mezcla de sales minerales, vitaminas reguladoras de crecimiento, azúcar, agua y agar. Este crecimiento se da gracias a una característica que poseen las células vegetales conocido como totipotencia, o la capacidad de regenerar una planta cuando está sujeta a estímulos adecuados, gracias a la información que contienen estas. Cada célula viva de la planta debe contener todos los genes y por lo tanto tiene la capacidad de generar una planta completa (Tobar, 2011).

Este tipo de propagación tiene como finalidad la obtención de mayor cantidad plantas en menor tiempo, uniformidad genética y fenotípica, regeneración a partir de células, órganos o tejidos, entre otros (Olmos, et al., 2010).

Factores como la humedad relativa, temperatura y luz son los factores que presentan mayor influencia en el crecimiento y desarrollo de las plantas. La luz es uno de los factores primordiales en el desarrollo de estos organismos, por

ello la importancia de controlar este factor y optimizar su uso en cultivos in vitro. Entre los factores que la calidad del espectro de luz tiene influencia tenemos: elongación de tallo, ramificación lateral, extensión y pigmentación de la hoja (Heo, et al., 2016).

Dentro de la producción de plántulas por micropropagación y en la producción en invernaderos se han venido utilizando distintos tipos de luces artificiales, como: lámparas fluorescentes, incandescentes, lámparas de vapor de sodio de alta presión (HPSL) y de haluro metálico, estas dos últimas conocidas como de descarga de alta intensidad (HID). Todo esto con la finalidad de aumentar la fotosíntesis y controlar el fotoperiodo.

Las lámparas incandescentes están compuestas de una bombilla hermética de vidrio con un filamento de tungsteno, así al calentarse empieza a emanar radiaciones electromagnéticas visibles. Este tipo de luz debe calentarse hasta los 2500 °C para emitir radiaciones visibles. Estos tienen una gran emisión de los rangos infrarrojos y rojos, decayendo a medida se acerca al azul (Figura 1). Además, estos sistemas consumen bastante electricidad, dado que generan calor, de tal manera que estos cultivos no pueden ser colocados muy cerca de la luz, porque podrían presentar problemas de foto estrés y por lo tanto sufrir daños (Gupta, 2017).

Las fluorescentes (FL) son lámparas de descarga de vapor de mercurio a baja presión, emite luz visible gracias a la fluorescencia de un recubrimiento de fósforo. Estas son las más populares y usadas debido a su producción de luz blanca. Como luz blanca nos referimos a la combinación de rayos luminosos de diferentes frecuencias, es decir el color blanco percibido por el ojo humano contiene una gran cantidad de componentes espectrales. Sin embargo, los fluorescentes no son energéticamente eficientes para soportar grandes producciones. Existen dos tipos de FL, los tubulares y compactos, los cuales contienen vapores de mercurio y argón. El 90% de sus emisiones se encuentran dentro de los 400 y 700 nm (Figura 1). Estos tienen picos de emisión cercanos a 400- 450 nm (violeta-azul), 540-560 nm (verde-amarillo) y 620-630 nm (naranja-rojo), por lo que se aprecia como blanco, pero carecen de luz roja lejana, la cual es importante para un buen desarrollo de la planta,

influyendo el alargamiento del tallo y la actividad del fitocromo (Bello et al., 2017).

Las lámparas de descarga de alta presión o más conocidas como HID, funcionan a presión y temperaturas altas al igual que los FL, no obstante, estos tienen una mejor salida espectral y mayor eficiencia luminosa que las ya mencionadas, por lo tanto, son consideradas de las opciones más eficientes (Bula et al., 1991). Existen tres tipos de HID según su vapor: mercurio, sodio y haluro metálico. A excepción de las lámparas de mercurio de alta presión, las compuestas de mercurio y sodio, específicamente de alta presión han sido ampliamente utilizados en la agricultura. Las HPSL han venido en declive, ya que contienen una alta emisión en el rango entre con 560 a 610 nm la cual es desequilibrada con relación a los rangos de absorción de los pigmentos ya mencionados. Sin embargo, las lámparas de halogenuros metálicos con el uso de vapor de mercurio y gases inerte mejoraron la calidad espectral, con varios picos de emisión distribuidos uniformemente en todo el espectro con un alto porcentaje de luz azul (Gupta, 2017).

Sin embargo, todos estos tipos de luces tienen un amplio rango de longitud de onda que va desde los 350 nm hasta los 750 nm, tan amplia que es innecesaria y de baja calidad para promover un buen crecimiento de las plantas (Bula, et al., 1991). En los últimos años se han buscado diversos mecanismos de iluminación para mejorar el desarrollo del proceso de fotosíntesis en las plantas, existiendo fuentes artificiales como bombillas metal, bombillas incandescentes, bombillas de vapor de mercurio, bombillas fluorescentes, sin embargo, su uso provoca gran consumo de energía eléctrica, baja vida útil, gases nocivos para la salud de las personas. Pero de estos tipos de bombillas, sobresale la iluminación artificial LED que ha tomado más fuerza sobre los demás tipos de iluminación artificial utilizada para la estimulación del crecimiento de las plantas (Ramos, 2016). Los diodos emisores de luz (LED) son la fuente de luz más nueva, y pueden ser empleados para producir longitudes de onda deseadas, tales como el azul y rojo en mayores proporciones (Tamayo, 2014). Estas fuentes de luz de estado sólido emiten luz sobre el flujo de electricidad desde un chip de diodo semiconductor. LED pueden emitir longitudes de onda entre los 250 nm (UV-C) hasta los 1000 nm

correspondiente al infrarrojo. Estos fueron inventados en 1962, pero no fue hasta 1980 que fueron usados en la agricultura, debido a su baja potencia

La NASA mediante sus programas de ciencias biológicas patrocinaron la primera investigación con este tipo de luz, con la finalidad de desarrollar un sistema de iluminación energéticamente eficiente compacta y con la capacidad de modificar su espectro (Bourget, 2018).

Posteriormente la NASA desarrolló varias matrices de iluminación LED que fueron probadas y utilizadas en un transbordador espacial para probar el crecimiento en un futuro en el espacio. Las investigaciones se realizaron en el “Kennedy Space Center”, enfocándose en las combinaciones espectrales de LED, incluyendo los colores rojo lejano y azul (Wheeler & Sarger, 2020). Los diodos LED tienen un gran potencial para ser usados en la micropropagación (Loberant & Altman, 2010). Las ventajas de estos diodos están en la conversión eficiente de energía, volumen pequeño, larga vida, emiten una radiación con longitudes específicas que son eficientes para la fotosíntesis (Araujo & Pasqual, 2019). A esto se suma que la emisión térmica y costos de mantenimiento son más reducidos que provocan que sean más amigables con el medio ambiente.

El cultivo del plátano se cultiva en condiciones de variada iluminación. Aunque, una cierta reducción de la iluminación, no interrumpe la salida de las hojas de la bananera; sin embargo, alarga considerablemente su ciclo vegetativo, por lo que esta planta prefiere zonas de sol y despejadas de nubes (Tigasi, 2017).

Para tener buenos rendimientos el banano necesita una luminosidad que fluctúa entre 30 a 80 %, como una planta perteneciente al grupo C3 no necesita de mayor luminosidad, sin embargo, en casos de monocultivos se recomienda asociar con otros cultivos que brinden sombra, lo que puede presentar un efecto positivo en el número de hojas funcionales sanas (Tenesaca, 2019). Se debe contar con buena cantidad de luz día, para que las plantas se desarrollen adecuadamente (Hojas, racimos, yemas, brotes), en caso que exista baja disponibilidad de luz retrasa la producción y afecta la calidad del fruto.

Por estas razones, en Cuba se realizan investigaciones dirigidas a mejorar las tecnologías de los cultivos de importancia económica en las que los plátanos y bananos (*Musa spp.*) ocupan un lugar preponderante, introduciéndose nuevas técnicas de cultivos. El éxito de la producción de esta especie está condicionado en gran medida por la calidad de la semilla. La propagación in Vitro se ha utilizado ampliamente como una alternativa y eficiente método para la propagación rápida de varias especies de plantas. En el banano, la aplicación de esta tecnología ha permitido la rápida difusión y validación de nuevos genotipos que es la base de la recuperación del material propagado con una alta calidad fitosanitaria (Tenesaca, 2019).

El establecimiento de estas tecnologías, lleva implícito un sistema aclimatización eficiente que responda económicamente a los intereses de las Biofábricas. Esta fase tiene como propósito lograr la aclimatización de las plantas in vitro al medio externo con altos índices de supervivencia en un corto período de tiempo y a bajos costos. Es necesario para esto, acelerar el crecimiento y desarrollo de las plantas in vitro mediante el manejo de varios factores en esta etapa tales como: correcta selección y tratamiento del material de propagación, régimen de riego, control de enfermedades especialmente las fungosas y empleo del sustrato e intensidad luminosa acorde con las exigencias de las especies (Cubillos, 2018).

Estas pérdidas están dadas por dos causas fundamentales; que las plantas in vitro obtenidas no reúnan las características morfológicas y anatómicas apropiadas para pasar a la fase de aclimatización y que no se realiza un manejo adecuado en esta fase trayendo un aumento en los costos de producción por pérdida de las plántulas in vitro (Agramonte et al., 2017). La luz es uno de los factores más importantes que influye en esta fase y es el más difícil de medir y regular. Su gran importancia está dada por el papel que desempeña en la fotosíntesis, fundamentalmente por los procesos de síntesis y producción de energía necesarias para el crecimiento y desarrollo.

El control de intensidad de la luz es importante ya que las plantas provienen de un ambiente con intensidad baja y son expuestas a uno con alta, por lo tanto, esta se debe regular para evitar la fotoinhibición del aparato fotosintético. Aunque las plantas in vitro tengan apariencia normal, sus características

estructurales y fisiológicos no son las adecuadas, por lo que requieren una aclimatización previa, antes de su cultivo en el campo (Agramonte et al., 2017).

1.5. Características de las longitudes de onda. Espectro

En el caso de iluminación LED, la mayor parte de la investigación sobre distintos aspectos de la micropropagación y el cultivo de tejidos se ha desarrollado en especies ornamentales, siendo muy limitados los estudios publicados para el caso de bananos y plátanos, pero puede decirse, como norma general en horticultura, que un incremento en la proporción de luz azul tiene un efecto sobre el acortamiento del tamaño de las plantas y consecuentemente provoca un crecimiento más compacto (Meisel & Urbina, 2011).

La energía proveniente del Sol se propaga en el espacio en forma de onda electromagnética o radiación electromagnética (unidad Joule), la distancia entre dos crestas sucesivas es llamada de longitud de onda (λ) y el número de veces que crestas contiguas pasan por un dado punto es la frecuencia (ν). La distribución de la radiación electromagnética en función de las respectivas longitudes de onda (nanómetros) o frecuencias, se denomina espectro electromagnético, el cual se divide en regiones que van desde radiaciones gama ($\lambda \sim 10^{-3}\text{nm}$), hasta ondas de radio ($\lambda > 10^9\text{nm}$) pasando por el espectro visible. (Ramos & Gracia, 2016).

De todo el espectro visible, las plantas utilizan para la fotosíntesis solo una región comprendida entre 400 hasta 700 nm, la cual es denominada radiación fotosintéticamente activa o de crecimiento (RFA). Esto ocurre debido a que los seres vivos evolucionaron en relación a sistemas fotoquímicos capaces de utilizar estas longitudes de onda. El efecto que estas ejercen sobre la planta varía dependiendo de la hora del día y fase de crecimiento, afectando propiedades como el aspecto, momento de floración o valores farmacéuticos y nutricionales (Ramos & Gracia, 2016).

1.5.1. Lámparas de diodo (LED)

Las lámparas de diodo (LED) son la más reciente tecnología en ingresar al campo de la investigación y agricultura en ambientes controlados con bastante aceptación por parte de los investigadores. Este éxito se debe a la elevada

eficiencia en comparación con las lámparas incandescentes, consumen mucha menos energía eléctrica y poseen una vida media de uso más larga, disminuyendo costos de producción. Por otro lado, no generan exceso de calor y por lo tanto es posible utilizarlos con plantas térmicamente sensibles sin daños, e incluso, en el caso de las LED rojas debido a su propiedad repelente de insectos ayuda a disminuir el uso de agrotóxicos (Bourget, 2018).

Otras ventajas de estos dispositivos son en relación a la posibilidad de emisión de longitudes de onda mono cromáticas, cada color de luz LED se limita a una longitud de onda de alcance muy estrecho (dominante) dado por el material semiconductor que lo compone y la luz blanca por la mezcla aditiva de todos los colores. En luces comerciales diversos colores se obtienen por una mezcla de los colores rojo (630-890 nm), verde (525-555 nm) y azul (450- 480 nm) que emiten en una longitud de onda específica (OSRAM, 2016).

Esto permite brindar a diversas plantas una fuente de luz ajustada a las necesidades de las mismas, aumentando aún más la eficiencia de todo el proceso productivo. Además, debido a su pequeño tamaño y reducido peso, brindan una enorme flexibilidad al momento de diseñar sistemas lumínicos, generando un aumento de la eficiencia en la utilización del espacio en comparación con otras fuentes luz como los tubos fluorescentes y las lámparas incandescentes (Bourget , 2018).

En este sentido, las LED proporcionan un mejor rendimiento en invernaderos tanto industriales como de pequeño tamaño. Según investigaciones de diversos grupos como el de invernaderos industriales, el uso de LED rojas y azules ahorran un total de 80% de consumo eléctrico en relación a la luz incandescente, compensando rápidamente el costo de la instalación que es tres veces mayor. En 2007, la empresa fabricante de LED, Nippon Keiki Kagoshima Works Ltd., publicó un informe en que se demostraba en pequeños invernaderos, la disminución del costo de consumo eléctrico en 25 veces por el uso de LED rojos en vez de lámparas incandescentes (Ramos & Gracia, 2016).

La intensidad luminosa puede tener un efecto pronunciado sobre el desarrollo foliar modificando características tales como el espesor de las hojas, la diferenciación del mesofilo, la división celular o el desarrollo de las estomas. Las condiciones de incubación en relación con la iluminación juegan un papel

fundamental en el reajuste u optimización de la propagación de plantas in vitro. La utilización de lámparas fluorescentes blancas se cita como fuente de luz utilizada en el 90% de los trabajos de investigación en cultivo de tejidos de plantas (Jao & Fang , 2015).

Por ello, la aplicación de una etapa fotoautotrófica debe estar condicionada al seguimiento diario de las condiciones solares, permitiendo cuando sea preciso maniobras rápidas de sombreado y control de temperatura para la preservación de la integridad de todos los explantes. Por otra parte, la condición fotoautotrófica presupone la absorción de CO₂ externo para la promoción de la actividad fotosintética y la consiguiente generación de cadenas carbónicas en los tejidos de las plantas, lo que hace necesario el uso de frascos de cultivo con tapas que promuevan intercambios gaseosos, sin incurrir en la contaminación de los medios de cultivo.

Para el estudio del efecto de la luz en la germinación y crecimiento de las plantas es necesario conocer algunos conceptos que explican cómo es esta interacción por lo que a continuación se describen algunos de ellos (Jao & Fang , 2015).

La irradiancia total es de 1360 W m² (constante solar) en límite superior de la atmósfera, y al considerar la distancia media entre la Tierra y el Sol, incluye las longitudes de onda del infrarrojo y ultravioleta. En un día despejado de verano el flujo fotónico fotosintético (FFF) equivale a un valor comprendido entre 2000 y 2300 μmol de fotones s⁻¹ m⁻², que puede calcularse a partir de los valores de la radiación fotosintéticamente activa RFA (bajo cielo despejado este valor fluctúa entre 400 y 500 W m⁻²), suponiendo que la luz del sol, en el intervalo de la RFA, tiene una longitud de onda promedio de 550 nm y sabiendo que un mol de fotones a esta longitud de onda tiene 217 kJ de energía.

La falta de luz no interrumpe la emisión y desarrollo de las hojas, pero los limbos quedan blanquecinos debido a la ausencia de síntesis de clorofila, y las vainas foliares y seudotallos se alargan demasiado. Las plantas expuestas a radiación solar insuficiente crecieron 70 cm más, que aquellas expuestas a radiación más intensa y tuvieron un período vegetativo más prolongado, retrasándose la floración tres meses, pero sin afectar los rendimientos. La radiación también influye directamente sobre el proceso de maduración y

composición química de los frutos de plátano, en particular en la concentración de azúcares no reductores. Un ejemplo de aplicación típica para el uso de 730 nm: la reacción de huida de la sombra. Una de las influencias más evidentes de la luz roja lejana en una planta es la reacción de huida de la sombra (Navarro Paz, 2013).

1.5.2. Longitud de onda en el cultivo del plátano

Esto hace que el uso de la luz azul resulte beneficioso desde el punto de vista de la propagación in vitro, especialmente en la multiplicación de bananos y plátanos en sistemas de cultivo en medio líquido, incluyendo el uso de birreactores de inmersión temporal, en los que un excesivo crecimiento de los brotes puede suponer una limitación (Mitchell & Dzakovich, 2015).

Por otro lado, también parece probable que pueda existir un máximo en la proporción de luz azul para cada especie, a partir del cual pueda inhibir tanto el crecimiento in vitro, como el posterior desarrollo de las plantas. Por todo ello, a la hora de optar por el uso de iluminación LED como fuente de luz en micropropagación de bananos y plátanos resulta de gran importancia definir, para cada fase de cultivo, la combinación óptima de calidad (rangos de longitudes de onda) y cantidad (niveles de radiación luminosa relativa dentro de cada uno de estos rangos) de luz a emplear. (Mitchell & Dzakovich, 2015).

Existen en la literatura científica pocos trabajos sobre los efectos de la iluminación sobre la micropropagación de plátanos y bananos. Pero la mayor parte de la producción in vitro de *Musa* se lleva actualmente a cabo de forma convencional bajo condiciones prácticamente universales de iluminación artificial en cámaras de cultivo que distan mucho del entorno natural para estas especies. Como norma generalizada, se han venido empleando tubos fluorescentes de luz blanca fría para proporcionar radiaciones lumínicas del orden de $50 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ con fotoperiodos que varían entre 12 y 16 horas de luz. Una excepción al modelo más o menos estándar de iluminación fluorescente es el adoptado en Cuba en los laboratorios comerciales para propagación de plantas (denominados Biofábrica), donde se aprovecha la luz natural mediante amplias superficies acristaladas y claraboyas en el techo. Su empleo en el caso del banano propició aumentar hasta un 10,8 % el coeficiente de multiplicación y permitió reducir los costos de producción en un 3,0 % y los

costes de iluminación, principalmente de las salas de crecimiento de un laboratorio de cultivo de tejidos suponen el 65% del gasto total de electricidad (Perez & Gonzalez , 2015).

Los efectos de las fluctuaciones de temperaturas, del fotoperiodo y de la intensidad luminosa en las tasas de multiplicación y en la calidad de las plantas obtenidas. En un ensayo con tres ambientes diferentes de cultivo in vitro, cámara de crecimiento con luz artificial y temperatura controlada, sala de crecimiento con luz natural sin control de temperatura y vivero de aclimatación con luz natural, también sin control de temperatura, se puso de manifiesto que se obtuvieron las mayores tasas de multiplicación bajo condiciones de luz natural en vivero de aclimatación, obteniéndose plantas verdes claras con mayor área foliar y sistemas radicales más vigorosos que bajo luz artificial, observándose bajo luz artificial fenómenos de quema de hojas y pérdida de turgor.

Como conclusión de su estudio, estos dos autores indicaron que la estructura ideal para un laboratorio de micropropagación vegetal estaría compuesta por salas de crecimiento con luz natural, posibilitando condiciones elevadas de higiene, similares a los de una cámara de crecimiento. Debe señalarse que, a pesar de la influencia positiva de la luz natural sobre las tasas de multiplicación, existe una gran dificultad para mantener una uniformidad de intensidad de la luz solar a lo largo del día y también durante las diferentes épocas del año. De hecho, las elevadas incidencias solares durante las horas más calurosas del día pueden fácilmente ocasionar temperaturas superiores a 50 °C provocando la muerte de todos los explantes en el interior de los frascos de cultivo (Cayón & Giraldo, 2018).

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación

La investigación se realizó en la Biofábrica perteneciente a la Unidad Empresarial de Base (UEB) Semillas Cienfuegos, que se encuentra en la Delegación Provincial de la Agricultura en Cienfuegos, en los meses de julio y

agosto del año 2023. Esta entidad se especializa en la producción de vitroplantas y semillas mejoradas, donde se destacan especies como el plátano, la yuca y la piña con sus distintas variedades

Diseño experimental

Se utilizó un diseño completamente aleatorizado. Para ello se utilizaron 3 magentas de plástico transparentes por tratamiento en las que se colocaron 15 explantes, completando un total de 45 explantes por tratamiento, para cada fase del cultivo.

Material vegetal

Se utilizaron explantes cultivados *in vitro* adquiridos el 10 de julio 2023 todos del clon Curare Enano, plátano vianda (*Musa balbisiana*), los cuales se encontraban en fase de multiplicación con fecha de siembra del 11 de julio 2023. Se seleccionaron los explantes lográndose un material homogéneo en cuanto a características fenotípicas, teniendo estos un óptimo estado de salud, cumpliendo con las normas de calidad establecidas para fase de multiplicación.

Características de las fuentes emisoras de luz utilizadas (LED)

Las diferentes longitudes de ondas de luz se obtuvieron a partir de LED con las siguientes características (Cabezas, 2022)

- LED Roja: Los resultados de las mediciones de la longitud de onda emitida por la fuente Roja, realizadas en el espectrómetro radiómetro de campo. Después de realizados los cálculos se determinó una longitud de onda de 627 nm;
- LED Azul: Los resultados de las mediciones de la longitud de onda emitida por la fuente Azul, realizadas en el espectrómetro radiómetro de campo. Después de realizados los cálculos se determinó una longitud de onda de 440 nm;
- LED Blanca: Los resultados de las mediciones de la longitud de onda emitida por la fuente Verdes, realizadas en el espectrómetro radiómetro de campo. Después de realizados los cálculos se determinó una longitud de onda de 380 nm;

- LED Verde: Los resultados de las mediciones de la longitud de onda emitida por la fuente Verdes, realizadas en el espectrómetro radiómetro de campo. Después de realizados los cálculos se determinó una longitud de onda de 547 nm;
- LED Naranja: Los resultados de las mediciones de la longitud de onda emitida por la fuente Naranja, realizada en el espectrómetro radiómetro de campo. Después de realizados los cálculos se determinó una longitud de onda de 588 nm.

Tratamientos para la fase de ahijamiento y enraizamiento

Exposición de los explantes a la luz roja

Exposición de los explantes a la luz blanca

Exposición de los explantes a la luz Verde

Exposición de los explantes a la luz Azul

Exposición de los explantes a la luz Naranja

Descripción y montaje del ensayo

El montaje del experimento se realizó en un estante de 5 divisiones, al cual se le adicionaron tabiques de separación con láminas de Polipropileno, aislando cada cubículo creado, evitando la mezcla de los distintos tipos de luz.

Los LED se colocaron a una altura de 0,3 metros y se conectaron en serie a una fuente de alimentación de 12 volt (V). Para lograr el fotoperiodo deseado se conectó a un timer, programado para 16 horas de luz y 8 horas de oscuridad.

Evaluaciones del comportamiento de las variables morfológicas de los explantes a partir de la exposición a diferentes longitudes de ondas de la luz LED.

Variables evaluadas en la fase multiplicación

Número de hijos (NH): Se realizó mediante un conteo al terminal el ciclo del cultivo

Masa seca (MS): Se tomaron muestras de 10 hijos por tratamiento los que se pesaron para determinar la masa fresca (MF), se mantuvieron en estufa a 60°C hasta que le logró un peso constante, tomándose el valor final como la masa seca

Variables evaluadas en la fase de Enraizamiento

Número de hojas (NHO): Se realizó mediante un conteo

Longitud de hoja (LH): Se realizó utilizando un pie de rey marca Mitutoyo, fabricado en Japón.

Numero de raíces (NR): Se realizó mediante un conteo

Diámetro basal del tallo (DBT): Se realizó utilizando un pie de rey marca Mitutoyo, fabricado en Japón.

Longitud del tallo (LT): Se realizó utilizando un pie de rey marca Mitutoyo, fabricado en Japón.

Materia Seca (MS): Se siguió aplicando el mismo procedimiento para la fase de multiplicación

Evaluación de la presencia de explantes contaminados

Los explantes contaminados se determinaron de forma visual, teniendo en cuenta el criterio de la especialista de calidad de la Biofábrica, se contaron los individuos que presentaron signos de contaminación definiéndose si la afectación fue provocada por hongos o bacterias.

Análisis estadísticos de los resultados

El procesamiento de los datos se realizó a través del software STATGRAPHICS Centurión, aplicándose ANOVA simple, prueba de múltiples rangos y LSD de Fisher, para un 95% de probabilidad.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resultados de la fase de multiplicación

Número de hijos

En la figura 2 se muestra el comportamiento de la formación de hijos en los explantes, como resultado de la exposición a los diferentes tratamientos. Al analizar esta variable se observó que el tratamiento (Luz Roja) presentó mayor número de hijos (2,4), con diferencia estadística significativa respecto a los demás tratamientos. Entre los tratamientos 2, 3,4 y 5 (Azul, blanco, verde y naranja), no se manifestaron diferencias significativas.

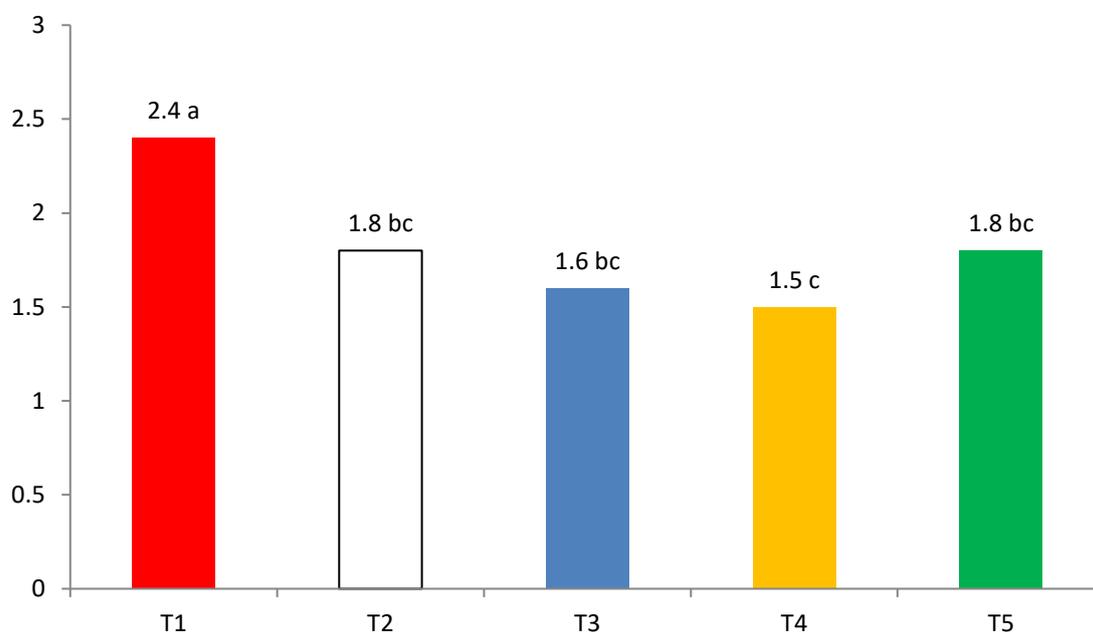


Figura 2 Comportamiento de la variable Número de hijos (NHI) ante la exposición a diferentes longitudes de ondas

Este resultado coincide con los obtenidos por Cabezas (2022), quien reporto un efecto significativamente mayor de la luz roja sobre la emisión de hijos sobre explantes de plátano vianda INIVIT 06-30, asimismo Castellanos(2006) demostró el efecto positivo de la luz roja en la formación de hijos en el proceso de regeneración de Ipeca del Brasil (*Psychotria ipecacuana*).efecto similar fue reportado por Guillén (2015) en especies arbóreas, enfatizando que las longitudes de onda selectivas pueden mejorar con una estimulación positiva a los explantes.

Los resultados obtenidos en el estudio de esta variable apuntan a que las longitudes de ondas correspondientes al color rojo favorecen el ahijamiento de diversas especies propagadas por cultivo in vitro.

Los valores de masa fresca y masa seca se muestran en la tabla 1. Como se puede observar el tratamiento que presentó el menor valor de la masa fresca fue el tratamiento T1 (4,63 g) y el mayor fue el tratamiento T4 (6,65 g). Se observó una tendencia a la disminución de la masa fresca de los hijos en la medida que el número de estos aumentó, siendo una respuesta fisiológicamente probable, a mayor cantidad de hijos menor la masa fresca de cada hijo.

Tabla 1. Comportamiento de la masa fresca y la masa seca de los explantes

Tratamiento	Masa Fresca(g)	Masa Seca(g)
T1 Rojo	4,63	0,53
T2 Blanco	5,8	0,29
T3 Azul	6,18	0,18
T4 Naranja	6,65	0,33
T5 Verde	6,53	0,56

Por otro lado, en la figura 3 se muestra el comportamiento del porcentaje de masa seca de hijos de los explantes, como resultado de la exposición a los diferentes tratamientos, Al analizar esta variable se observó que el tratamiento (Luz Roja) presento mayor porcentajes (11,4 %), seguido de los tratamientos T5 (8,5 %), T2, T4 y T3 con 5 %, 4,9 % y 2,9 % respectivamente.

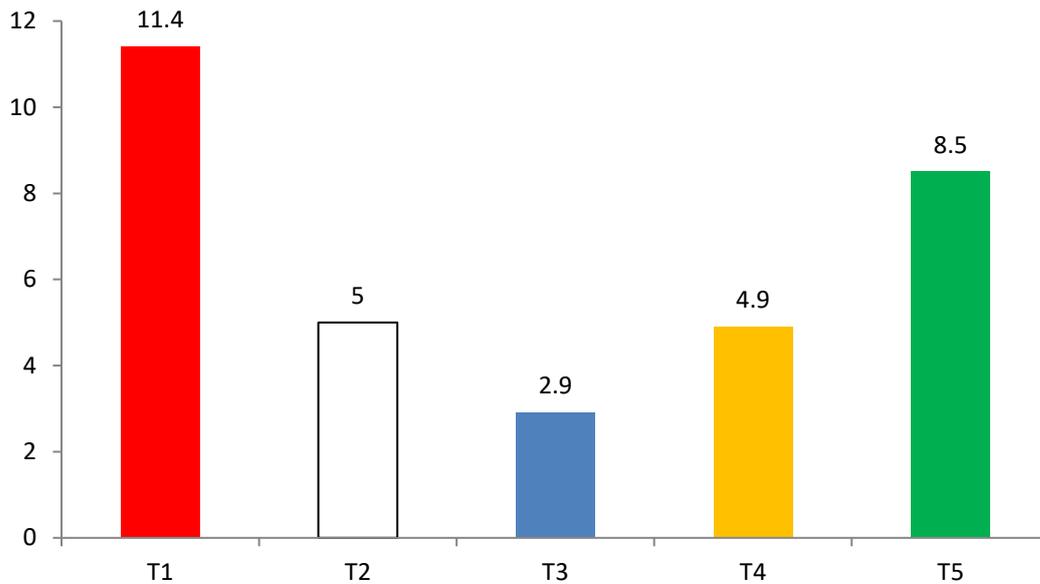


Figura 3 Comportamiento del porcentaje de masa seca (MS) ante la exposición a diferentes longitudes de ondas

La luz LED roja aumenta la biomasa seca en plántulas en comparación con la luz blanca LED y la azul, Esto indica que la respuesta de las plantas a la calidad de luz LED cambia entre especies y su etapa de desarrollo, y se necesita estudiar su efecto en cada especie para lograr determinados propósitos, Con base en estas investigaciones, se plantea que es posible sustituir la luz fluorescente por luz LED durante la micropropagación de las plantas, Estos resultados coinciden con el estudio realizados por (Pedraza, 2016)

Resultados de la fase de enraizamiento

La figura 4 muestra el comportamiento de la variable de longitud de hojas de explantes a partir de la exposición a los diferentes tipos de luz, La exposición a la luz blanca fue el tratamiento que indujo la respuesta más baja (1,9 cm), sin diferencias estadísticamente significativas con T1 y T4 estudiadas. El color azul muestra los mejores resultados de la investigación (4,2 cm), coincidiendo con los resultados obtenidos por Zaldumbide (2020).

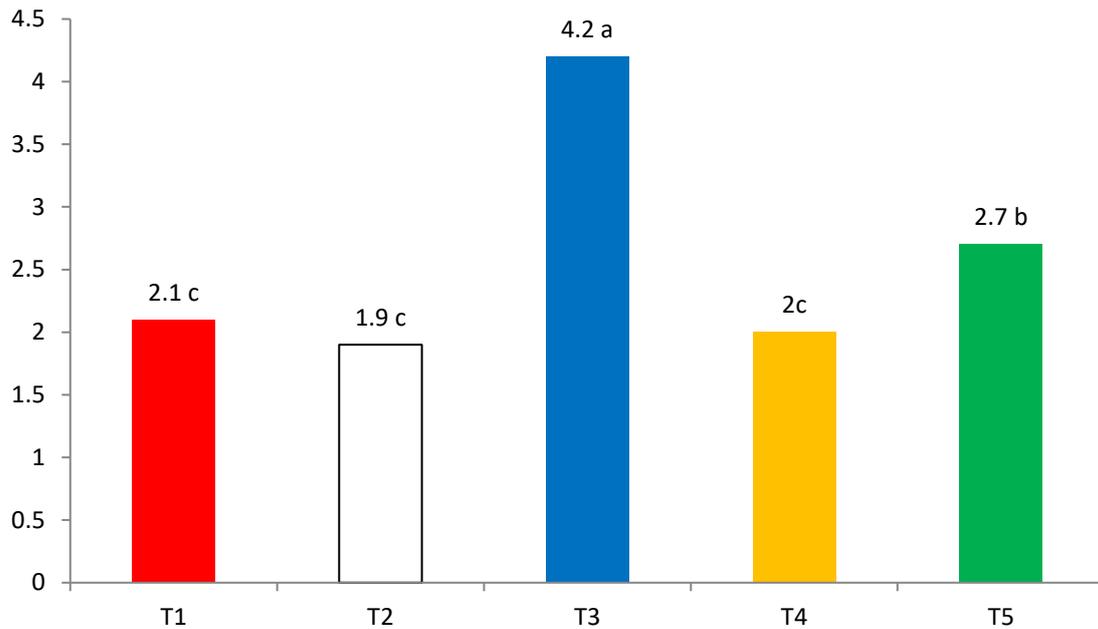
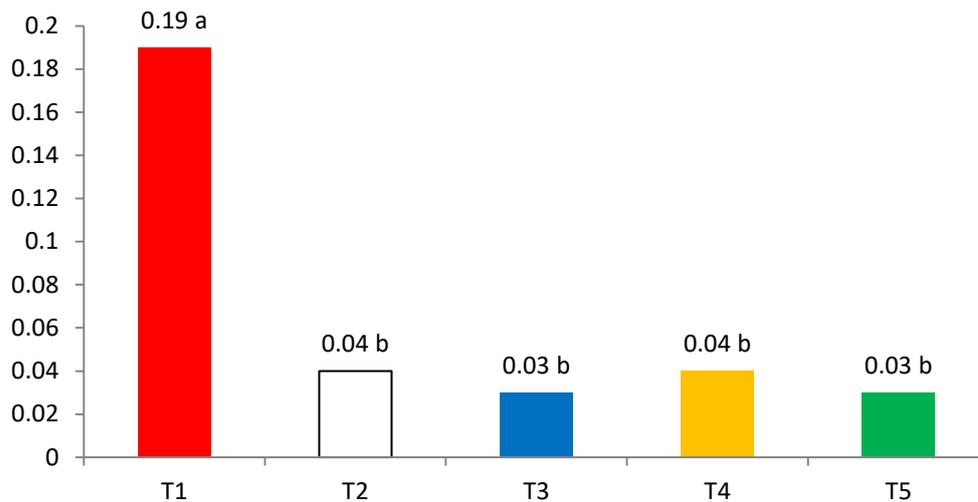


Figura 4 Comportamiento de la variable Longitud de hojas (LHO) ante la exposición a diferentes longitudes de ondas, expresada en cm.

Resultados similares obtuvo Espinal (2021), donde el tratamiento con luz led azul logró la mayor longitud de hoja en planta de lechuga. Además, Arnica (2019) en el cultivo de fresa, menciona que la luz artificial azul de 30 watts que irradió el invernadero produjo hojas más largas y anchas, Paralelamente Documet (2019), afirma en el experimento llevado en la germinación de alfalfa, donde los tratamiento con luz led rojo y luz led azul obtuvieron buenos resultados expresados en área foliar con 7,67 cm² y 7,39 cm² respectivamente, mediados por 72 horas de exposición en unas cámaras de germinación casera

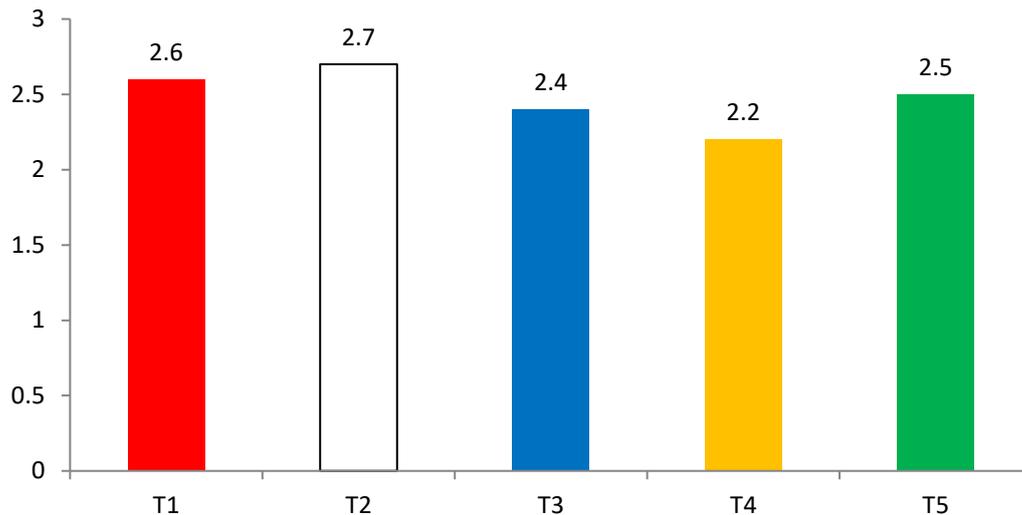
En la figura 5, se puede apreciar los resultados en el comportamiento de las variables del diámetro basal del tallo en los diferentes colores de luces LED aplicadas en el tratamiento, con el mayor porcentaje de diámetro del tallo el color rojo y con menor diámetro el color Azul.



Figura, 5 En la figura se muestra el comportamiento de la variable del Diámetro basal del tallo (cm)

Resultados semejantes han sido obtenidos en la evaluación de diferentes tratamientos demostrando que el tratamiento de color rojo produjo mejores resultados según (Giménez, 2013), a decir de esto Se obtuvieron plantas más compactas, con un diámetro de tallo más grande y un mayor contenido de clorofila que las plantas cultivadas con lámparas de alta presión de sodio, las luces LED de rojo lejano inhiben la floración de crisantemo mientras que con altas intensidades de luz azul se induce la floración esto permite a los cultivadores controlar la floración de acuerdo con la demanda del mercado (Gonzales, 2021).

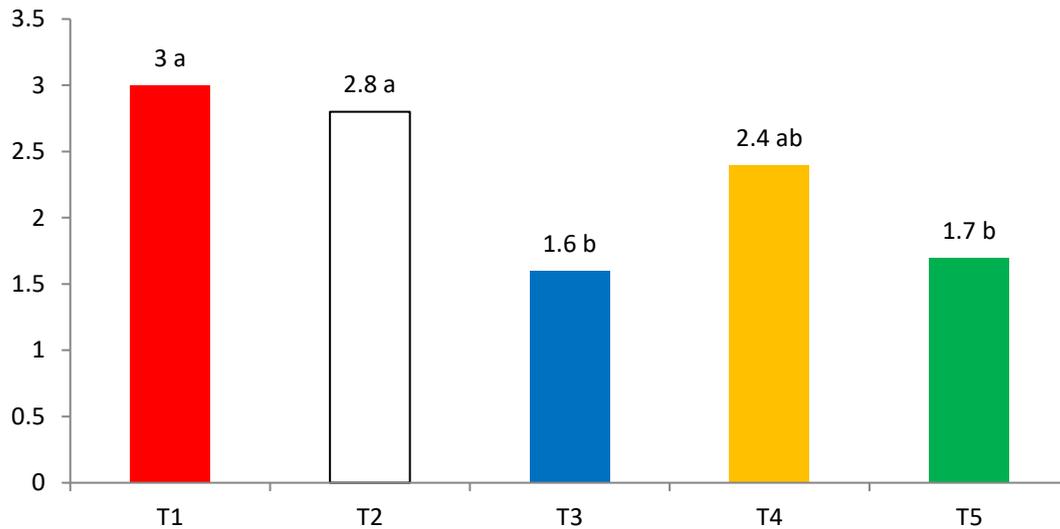
En la figura 6 Se puede apreciar los resultados en el comportamiento de las variables de la longitud de raíces en los diferentes longitudes de onda. Entre los tratamientos no se detectó diferencias estadísticas significativas, aunque en valores absolutos el tratamiento con luz blanca (T2) fue el que presentó mayor longitud de raíces, con 2,7 cm. El valor menor en esta variable se obtuvo en el tratamiento T4 (2,2 cm). Los resultados sugieren una baja influencia de la longitud de onda de la luz en la longitud de las raíces.



Figura, 6 En la figura se muestra el comportamiento de la variable de la longitud de raíces (cm)

Resultados obtenidos por Talavera (2016), en el cual se detectaron diferencias significativas en longitud de plántula, número y tamaño de raíces, así como en los porcentajes de materia seca. Las plántulas más largas (1.64 cm) se obtuvieron con combinación de luz roja y azul (1:3); pero fueron estadísticamente similares a los otros tratamientos a excepción del T2 blanco, con el cual las plántulas redujeron su tamaño en 28 %. El T2 también inhibió la producción y longitud de raíces. El T1 sólo redujo la longitud de raíz.

En la figura 7 Se puede apreciar los resultados en el comportamiento de las variables del número de hojas en los diferentes colores de luces LED aplicados. Los explantes sometidos a las longitudes de onda correspondientes al color rojo y la luz blanca provocaron una mayor respuesta en esta variable obteniéndose valores de 3 y 2,8 hojas por explantes como promedio, diferenciándose significativamente con los tratamientos T3 y T5.



Figura, 7 En la figura se muestra el comportamiento de la variable Número de Hojas

El crecimiento de las plantas requiere de luz visible, que aporta energía para la fotosíntesis de las plantas. Según López (2023), dentro del espectro de la luzes visibles, la luz azul (440-480) y luz roja (640-680) tienen el mayor impacto en el crecimiento de las plantas, y la luz de estas dos frecuencias es mejor absorbida por las plantas, la luz roja y la luz azul promueven la fotosíntesis, y las plantas con más luz verde Presentan menos fotosíntesis. Los LED rojos y azules que combinan la luz roja y la luz azul son luces de crecimiento LED ideales, y estos dos colores claros son solo las dos luces más efectivas para el crecimiento de las plantas

En este sentido los resultados obtenidos en el experimento difieren con los obtenidos por López (2023), al no encontrarse una respuesta notable a la luz azul.

Presencia de contaminaciones en los explantes

Tabla 2. Presencia de contaminación

Tratamientos	Total de Explantes	Explantes infestados	%
T1	45	0	0%
T2	45	8	17,7 %
T3	45	0	0%
T4	45	11	24,4 %
T5	45	0	0%

En la tabla 2 se muestra el comportamiento del porcentaje de contaminación de hijos de los explantes, como resultado de la exposición a los diferentes tratamientos, mostrándose así que las contaminaciones son debido al agente patógeno (hongos). Al analizar esta variable se observó que los T4 (Luz naranja) y T2 (Luz blanca) presentaron contaminación con hongos filamentosos con 24,4 % y 17,7 % respectivamente. En los restantes tratamientos no se presentaron agentes contaminantes. Este aspecto debe tenerse en cuenta para futuras investigaciones pues las contaminaciones constituyen un factor limitante en la tecnología de propagación in vitro.

CONCLUSIONES

En la fase de multiplicación, la luz roja emitida por LED favoreció la formación de hijos y el porcentaje de masa seca en los explantes evaluados.

En la fase de enraizamiento la luz roja favoreció el número de hojas y el incremento del diámetro basal del tallo, mientras que la longitud de las hojas se vio beneficiada por la luz azul.

En los tratamientos con longitudes de onda correspondientes a la luz naranja y luz blanca se detectaron contaminaciones con hongos filamentosos con 24,4 % y 17,7 % de incidencia respectivamente.

RECOMENDACIONES

Continuar los estudios relacionados con el empleo de las diferentes longitudes de onda de la luz emitidas por LED en otros cultivos y condiciones.

Profundizar en el estudio de los posibles efectos de las diferentes longitudes de onda de la luz en la incidencia de plagas y enfermedades en los cultivos.

Promover la implementación de los resultados obtenidos y evaluarlos a mayor escala.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta, L. (2003). Principios agroclimáticos básicos en la producción de plantas medicinales. *Revista Cubana de Plantas Medicinales*, 8(1),40-45
http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1028-47962003000100008&lng=es&nrm=iso
- Agramonte, (2017). Propagación y mejora genética de plantas por Biotecnología, *Instituto de Biotecnología de las plantas, Santa Clara, Cuba*, p.193-206.
- Alcívar, F. J. (2015). Origen y Evolución del banano. (Tesis Doctoral). Universidad Nacional de Colombia.
- Araujo, A. & Pasqual ,M. (2019), Light quality in the biometrics and leaf anatomy of *Cattleya loddigesii* L, seedlings (Orchidaceae) micropropagated. *Ciencia Rural*, p.2506-2511.
- Arnica, H. H. (2019).Influencia de la temperatura y luz artificial en la maduración de la fresa en Arequipa, 2018. (Tesis de Grado). Universidad Continental. <https://hdl.handle.net/20,500,12394/719>
- Bello , J. J. Perez . J. A. & Cruz. C. A. (2017). Light- Emitting Diodes: Progress in Plant Micropropagation. *InTech*, p.93-103.
- Beltrano, J. & Giménez O. D.(2020). *Universidad Nacional de La Plata Argentina*.https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/51978/mod_resource/content/1/Fotomorfog%C3%A9nesis.pdf
- Bourget , C. M. (2018). An Introduction to Light-emitting Diodes. *HortScience*, 43-47.
- Bourget , C. M. (2015), An Introduction to Light-emitting Diodes, *HortScience*, 1944-1946.
- Bula , R. J. & Morrow , R. C. (s. f.). Light- emitting diodes as a radiation source for plants. *HortScience*, p.203-205.

- Cabezas, M. R. (2022). *Efecto de los diferentes tipos de luz en el crecimiento de plantas in vitro*. (Trabajo de Diploma).Universidad de Cienfuegos.
- Carrasco, R. L. (2019).Efecto de la radiación Ultravioleta-B en plantas, Idesia (Arica),p. 59-76.
- Castellón, (2017). Comportamiento agronómico del cultivo del plátano, variedad curare enano en Sandy Bay Costa Caribe Norte de Nicaragua, *Ciencia E Interculturalidad*, 21(2), p.115-128.
- Cayón , D. & Giraldo , G. (2015). Postcosecha y agroindustria del plátano en el eje cafetero de Colombia. *Fisiología de la maduración*, 270.
- Cordero, R. K. (2020). *La fotosíntesis y sus etapas en el proceso de producción de glucosa en las plantas*. <http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/8501>
- Cubillos, D. (2018). Luminosidad en el cultivo del banano, *Scientia Horticulturae*, 105-120.
- Casierra, P.P. (2015). Modificaciones fotomorfogénicas inducidas por la cantidad de luz. *academia colombiana de ciencia exactas* 84-92.
- Chen, J. (2023). *La influencia de la luz en el crecimiento del cultivo*. <https://www.pthorticulture.com/es/centro-de-formacion/la-influencia-de-la-luz-en-el-crecimiento-del-cultivo/>
- De Las Rivas, J. & Zeiger, E. (2015).*Fundamentos de Fisiología Vegetal* , Mc Graw-Hill.
- Documet, J. A. (2019). *Efecto de tratamientos de ondas de luz led en la producción de germinados de alfalfa (Medicago sativa)*. (Tesis de Grado). Universidad Científica del Sur.
- Espinal, J. A. (2021). Efecto de la iluminación led en un sistema vertical de producción con lechuga (*lactuca sativa L.*) bajo ambiente controlado. (Tesis de Grado). Universidad Mayor de San Andrés.
- Fabré et al., (2021). Mini instructivo técnico comunitario para la producción de plátanos y bananos en patios y parcelas. *Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4,0 Internacional (CC BY-NC-SA 4,0)*, p. 8.

- Flores et al., (2021). Uso de diferentes proporciones de led rojos y azules para mejorar el crecimiento de (*lilium Spp*). *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12 (5), 835-47.
<https://doi.org/10.29312/remexcav12i52607>
- Giménez, M.C. (2013). Multiplicación in vitro (*musa spp*). Caracas Venezuela Facultad de Agronomía.
- Gosselin, A. & Demers, D. A. (2017). Effects of supplemental light duration on greenhouse tomato(*Lycopersicon esculentum* Mill) plants and fruit yields, Gosselin. *Scientia Horticulturae*, 74-84.
- Guillen, S. (2015). Organogénesis y Embriogénesis somática de beaucarnea *Botánica Science*, p.129.
- Gupta , S. D.(2017). Artificial lighting system for plant growth and development. Agarwal, *Chronological Advancement, Working Principles, and Comparative Assessment*. Light Emitting Diodes for Agriculture.
- Hernández, C. O. A. (2006). *Organogénesis indirecta y enraizamiento in vitro*.
- Heo et al., (2016). Influence of mixed LED radiation on the growth of annual plants. *J, Plant Biol*, p. 286-290.
- Infoagro Systems, S.L. (2020) *info Agro.com*: www.agri-nova.com
- Jao , R. & Fang , W. (2015). Effects on Frequency and Duty Ratio on the Growth of Potato Plantlets In Vitro Using Light-emitting Diodes. *HortScience* p.375-379.
- Jatothu, D.G. (2013). Fundamentals and applications of light emitting diodes. (*LED*) in vitro, 211-220.
- Loberant , B. & Altman, A. (2010). Micropropagation of Plants. *Wiley Online Library*, p.1-16.
- López,J. C. (2022). PROMIX. <https://www.pthorticulture.com>
- López .H, J. (2023). *La influencia de la luz en el crecimiento del cultivo*.

- Meisel , L. & Urbina , D. (2011). *Fotorreceptores y respuestas de plantas a señales lumínicas*. Fisiología vegetal.Chile.Universidad de La Serena.
- Mitchell, C. A. & Dzakovich, M.P. (2015).Light-emitting diodes in horticulture, *Horticultural Reviews*, Hoboken, 1-88.
- Navarro Paz, V. (2013). Análisis de la utilización de luz emitida por lámparas de diodo LEDs en la producción in vitro para la obtención de semillas prebásicas de *solanum tuberosum*.*Ciencias Biológicas - Ecología y Biodiversidad*, 1-10.
- Navarro, E. L. (2016). *Propagacion in vitro de Banano(Musa acuminata)-variedades Gros Michel y Williams a partir de meristema*. Escuela Agrícola Panamericana .
- Olmos , S. Luciani , G. & Galdeano, E. (2010). *Micropropagación, Biotecnología y Mejoramiento Vegetal II*, Argentina. Ediciones INTA.
- OSRAM. (20 de 06 de 2016). OSRAM, Recuperado el 13 de 04 de 2023 de <http://www.osraes/osrames/noticiasyciencia/conocimiento-profesional/basicos-led/colores-de-la-luz/index>
- Pancorbo , D. Quispe , R. & Damian , W. (2017). *Influencia de la iluminación LEDs en plántulas in-vitro de papa (Solanum tuberosum) variedad Inia Canchan en el Laboratorio de Biotecnología-Abancay*.Perú: Universidad Tecnológica de los Andes.
- Pedrasas, S. M. E. (2016). *Calidad de la luz led y desarrollo in vitro Agrociencia y Comportamiento Agronómico del cultivo del plátano variedad curare enano revista ciencia e interculturalidad*.
- Perez, C. & Gonzalez , A. (2015). *Guía para la producción ambiental del cultivo del plátano. Valencia, Armenia: 2ª Edición*. CORPOICA.
- Ramos, E, (2016). Desarrollo de un sistema de iluminación artificial LED para cultivos en interiores- Vertical Farming (VF).*Informador Técnico*, 82-111.
- Ramos, P. & Gracia, N. (2016). Diodos emisores de luz para irradiación de plantas, Scribd, *Scribd*, p.1-10.
- Rosales, F.E. (2016). *Guía Práctica para la producción del plátano con altas*

- densidades* . América Latina y del Caribe.
- Sager, J. C. & McFarlane, J. C. (1997). *Chamber Handbook, Iowa Agriculture and Home Economics Experiment Station Special*, Langhans: Plant Growth.
- Suarez I. E. (2020). *Cultivo de tejidos vegetales*. Fondo <https://repositorio.unicordoba.edu.co/bitstream/handle/ucordoba/2553/Libro%20Cultivo%20de%20Tejidos%20Vegetales%20Edici%c3%b3n%2003-03-2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Taiz, L. & Zeiger , E. (2016). *La Luz y su importancia en los cultivos de los bananos*. Fisiología vegetal. Argentina: 3ra ed. Castelló de la Plana.
- Talavera et al., (2016). *Calidad de la luz led y desarrollo in vitro de Oncidium tigrinum y Laelia autumnalis (orchidaceae)*. *Agrociencia*, 50(8) p.1065-1080.
- Tenesaca, S. (2019). Determinación de la dosis de biocarbón como enmienda edáfica en el cultivo de banano clon William. *Repositorio*, p.20-30.
- Tig, C. (2017). Cultivo de alta densidad en banano (Musa paradisiaca Var, Cavendish). *Repositorio*. 6-11.
- Wampash, G.B, Nieves , G. & Barriaga, F. (2016). *Implementación, adecuación y valoración de un sistema de climatizado, para el área de incubación del Laboratorio de Micropropagación del Campus Juan Lunardi Cantón Paute*. Universidad Politécnica Salesiana.
- Wheeler, R. M. & Sarger J. C. (8 de 7 de 2020). *Observations from the KennedySpaceCenterBreadboardProject*. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20030032422>
- Zaldumbide, S. V.(2020) .Efecto de diferentes tipos de luz en el crecimiento, *Escuela Agrícola Panamericana*.

ANEXOS

