

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL**

**PROGRAMA DE MAESTRÍA ACADÉMICA EN CIENCIAS
FORESTALES**

**PRODUCTIVIDAD DE MINIJARDINES CLONALES DE
Tectona grandis (LINN. F.) EN AMBIENTE PROTEGIDO**

**TRABAJO DE GRADUACIÓN PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE
MAGISTER SCIENTIAE EN CIENCIAS FORESTALES CON EL
GRADO ACADÉMICO DE MAESTRÍA**

JAIRAN ARANTXA RODRÍGUEZ SOLÍS

CARTAGO, COSTA RICA

SETIEMBRE, 2022

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL**

**PROGRAMA DE MAESTRÍA ACADÉMICA EN CIENCIAS
FORESTALES**

**PRODUCTIVIDAD DE MINIJARDINES CLONALES DE
Tectona grandis (LINN. F) EN AMBIENTE PROTEGIDO**

**TRABAJO DE GRADUACIÓN PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE
MAGISTER SCIENTIAE EN CIENCIAS FORESTALES CON EL
GRADO ACADÉMICO DE MAESTRÍA**

JAIRAN ARANTXA RODRÍGUEZ SOLÍS

CARTAGO, COSTA RICA

SETIEMBRE, 2022



RESUMEN GENERAL

El aumento sostenido en el área cultivada en Costa Rica, con la especie *Tectona grandis* (teca), se justifica por el alto precio de su madera en los mercados internacionales. Por lo que la demanda del material genético mejorado ha incrementado y la producción de plantas en ambientes protegidos ha sido una solución por las múltiples ventajas y los avances en material genético seleccionado.

El presente estudio busca contribuir con el aumento de la productividad en minijardines clonales de teca en ambiente protegido. Esta investigación se realizó en los invernaderos del proyecto GENFORES en el Campus Tecnológico San Carlos (TEC), en donde se establecieron tres ensayos, con el fin de evaluar el efecto de dos sustratos y cinco arreglos espaciales de siembra, así como, el efecto de diferentes frecuencias de cosechas en cinco arreglos de siembra y por último se evaluó el efecto de fitorreguladores de crecimiento en diferentes dosis de aplicación.

Para determinar el efecto del sustrato se utilizaron el polvo de piedra, carbón y la arena fina y gruesa que son cuatro sustratos inertes de fácil adquisición; se caracterizaron mediante un análisis de su granulometría y retención de humedad, de los cuáles se seleccionó el polvo de piedra como el mejor. Mediante un ensayo experimental con diseño factorial (2x5) se evaluó dos sustratos (polvo de piedra puro y mezclado con 25 % de carbón), cinco arreglos espaciales de siembra (10x10 cm, 10x5 cm, 7x5 cm, 10x10 cm con planta en el medio y 10x10 cm con dos plantas por hoyo) y cuatro clones como repeticiones. El ensayo se evaluó durante cinco ciclos continuos de producción para aumentar su robustez estadística y la representatividad de los resultados. El uso del polvo de piedra sin adición del carbón registró la mayor productividad a un menor costo. El arreglo espacial de siembra de 10x10 cm con una planta en el centro ($n=145$ plantas m^{-2}) obtuvo el punto mayor producción de brotes por planta madre (1,16) y el arreglo 7x5 cm presentó la mayor la productividad por área, con 206 brotes m^{-2} por mes. El cambio de densidad de siembra del minijardín clonal, en una primera etapa a 10x10cm con una planta adicional en el centro, resultó en un alto impacto en productividad (74%), mayor

Rodríguez-Solís, A. (2022). *Productividad de minijardines clonales en Tectona grandis* (Linn. F.) dentro de un ambiente protegido. [Tesis de Maestría]. Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.

eficiencia en el uso del espacio y, una mejor gradualidad del cambio en el sistema operativo.

Para determinar el efecto de la frecuencia de cosechas y arreglos espaciales, se evaluó durante 9 ciclos continuos productivos, tres frecuencias de cosecha (10, 12 y 14 días) y cinco arreglos espaciales (10x10 cm, 10x5 cm, 7x5 cm, 10x10 cm con planta en el medio y 10x10 cm con dos plantas por hoyo) de siembra en los minijardines. Se estableció un diseño factorial (3x5) para evaluar frecuencia de cosecha (factor A) y cinco arreglos espaciales de siembra (factor B) con 4 repeticiones (genotipos). El análisis de varianza y prueba de Tukey ($\alpha=0,05$), mostraron valores significativamente diferentes para los arreglos 10x10 cm*1/2, 10x5 cm y 7x5 cm con 0,90, 0,88 y 0,86 brotes planta madre⁻¹ respectivamente, con relación al arreglo 10x10 cm*2, que presentó un promedio por cosecha de brotes planta madre⁻¹ bajo (0,77). El arreglo 7x5cm registró un promedio de 247 brotes m⁻² por cosecha como la mayor producción. Se utilizó un modelo lineal para explicar la influencia de arreglos espaciales de siembra, densidad, frecuencia, humedad relativa (%), temperatura y radiación sobre la tasa de brotación, que mostró correlaciones positivas con todas las variables excepto con la densidad de siembra. Dentro del modelo, la frecuencia y radiación presentaron una relación positiva con la productividad, mientras que la temperatura fue negativa. Se concluye que una frecuencia cada 14 días y arreglos de siembra de 10x10 cm*1/2 y 10x5 cm, promueven una mayor productividad de brotes por planta madre del minijardín clonal.

Finalmente, se evaluó el efecto de dos reguladores de crecimiento (ácido giberílico (GA₃) y 6-bencilaminopurina (BAP)). El estudio se llevó a cabo mediante un ensayo con diseño factorial (2x4), como factor (A) se utilizó al GA₃ y la BAP, mientras que como factor (B) las dosis 0, 5, 10 y 20 mg l⁻¹. El análisis de varianza y pruebas de comparación mostraron que el uso del GA₃ aumentó significativamente la producción y longitud de brotes. Por su parte, el BAP no presentó efectos significativos en la producción. La aplicación de 10 y 20 mg l⁻¹ de GA₃ aumentó la producción de brotes por planta madre de 1,02 como base a 1,47 y 1,50 aumentando la producción en un 44 y 47% respectivamente, en cosecha quincenal ordinaria, y de 169 hasta 172 brotes por metro cuadrado correspondiente a un 38 y 33 %. Al aplicar 5 mg l⁻¹ hasta 20 mg l⁻¹ de GA₃ se obtuvo brotes desde 4,19 a 4,44 cm de longitud. En la tasa de enraizamiento, las diferencias se presentaron en el GA₃ que demostró ser superior al BAP en un 49% para el enraizamiento diario medio, con una

velocidad de 1,30 brotes por día. En conclusión, aplicar 10 mg l⁻¹ de GA₃ es suficiente para aumentar el rendimiento en la productividad de minijardines clonales de teca.

Palabras clave: Silvicultura clonal, propagación vegetativa, mejoramiento genético, clones, teca.

GENERAL ABSTRACT

The increase in the area cultivated in Costa Rica with the *Tectona grandis* (teak) species is justified by the high price of its wood in international markets. Therefore, the demand for improved genetic material has increased and the production of plants in protected environments has been a solution due to the multiple advantages and advances in selected genetic material.

The present study seeks to contribute to the increase of productivity in clonal teak minigardens in a protected environment. This research was conducted in the greenhouses of the GENFORES project at the San Carlos Technological Campus (TEC), where three trials were established to evaluate the effect of two substrates and five spatial planting arrangements, as well as the effect of different harvest frequencies in five planting arrangements, and finally, the effect of growth phytohormones at different application doses was evaluated.

To determine the effect of the substrate, stone dust, charcoal, and fine and coarse sand, four easily available inert substrates, were characterized by analyzing their granulometry and moisture retention, of which stone dust was selected as the best. An experimental trial with a factorial design (2x5) evaluated two substrates (pure stone dust and mixed with 25% charcoal), five spatial planting arrangements (10x10 cm, 10x5 cm, 7x5 cm, 10x10 cm with a plant in the middle and 10x10 cm with two plants per hole) and four clones as replicates. The trial was evaluated during five continuous production cycles to increase its statistical robustness and the representativeness of the results. The use of stone dust without addition of charcoal recorded the highest productivity at the lowest cost. The spatial planting arrangement of 10x10 cm with one plant in the center ($n=145$ plants m^{-2}) had the highest shoot production per mother plant (1.16) and the 7x5 cm arrangement had the highest productivity per area, with 206 shoots m^{-2} per month. The change in planting density of the clonal mini garden, in a first stage to 10x10cm with an additional plant in the center, resulted in a high impact on productivity (74%), greater efficiency in the use of space and a better gradual change in the operating system.

To determine the effect of harvest frequency and spatial arrangements, three harvest frequencies (10, 12 and 14 days) and five spatial arrangements (10x10 cm, 10x5 cm, 7x5 cm, 10x10 cm with plant in the middle and 10x10 cm with two plants per hole) of sowing

in the mini gardens were evaluated during 9 continuous productive cycles. A factorial design (3x5) was established to evaluate harvest frequency (factor A) and five spatial planting arrangements (factor B) with 4 replicates (genotypes). The analysis of variance and Tukey's test ($\alpha=0.05$) showed significantly different values for the 10x10 cm*1/2, 10x5 cm and 7x5 cm arrangements with 0.90, 0.88 and 0.86 shoots mother plant⁻¹ respectively, in relation to the 10x10 cm*2 arrangement, which presented a low average per harvest of shoots mother plant⁻¹ (0.77). The 7x5cm arrangement recorded an average of 247 shoots m⁻² per harvest as the highest production. A linear model was used to explain the influence of spatial sowing arrangements, density, frequency, relative humidity (%), temperature and radiation on sprouting rate, which showed positive correlations with all variables except sowing density. Within the model, frequency and radiation showed a positive relationship with productivity, while temperature was negative. It is concluded that a frequency every 14 days and planting arrangements of 10x10 cm*1/2 and 10x5 cm, promote a higher productivity of shoots per mother plant of the clonal mini garden.

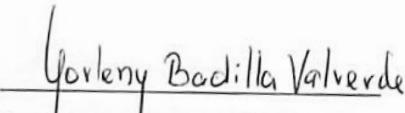
Finally, the effect of two growth regulators (gibberilic acid (GA₃) and 6-benzylaminopurine (BPA)) was evaluated. The study was carried out by means of a factorial design trial (2x4), GA₃ and BPA were used as factor (A), while doses of 0, 5, 10 and 20 mg l⁻¹ were used as factor (B). The analysis of variance and comparison tests showed that the use of GA₃ significantly increased shoot production and shoot length. On the other hand, BPA had no significant effect on production. The application of 10 and 20 mg l⁻¹ of GA₃ increased the production of shoots per mother plant from 1.02 as base to 1.47 and 1.50, increasing production by 44 and 47%, respectively, in ordinary biweekly harvest, and from 169 to 172 shoots per square meter, corresponding to 38 and 33%. When 5 mg l⁻¹ to 20 mg l⁻¹ of GA₃ were applied, shoots ranging from 4.19 to 4.44 cm in length were obtained. In the rooting rate, the differences were presented in GA₃ which proved to be superior to BPA by 49% for the average daily rooting, with a rate of 1.30 shoots per day. In conclusion, applying 10 mg l⁻¹ of GA₃ is sufficient to increase the productivity performance of clonal teak mini-gardens.

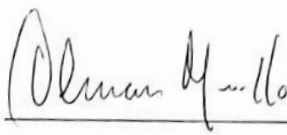
Keywords: clonal forestry, vegetative propagation, tree improvement, clones, teak.

ACREDITACIÓN

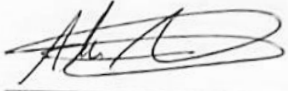
CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE PROYECTO DE GRADUACIÓN

Trabajo final de graduación defendida públicamente ante el Tribunal Evaluador, integrado por la Ing. Yorleny Badilla Valverde Ph.D., el Ing. Olman Murillo Gamboa Ph.D. y Ing. William Hernández Castro, Ph.D., como requisito parcial para optar por el grado de Magister en Ciencias Forestales, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.


Ing. Yorleny Badilla Valverde, PhD.
Directora de tesis


Ing. Olman Murillo Gamboa, PhD.
Profesor lector


Ing. William Hernández Castro, Ph.D.
Lector externo


Ing. Alexander Berrocal Jiménez, Ph.D.
Coordinador del programa de Maestría


Ing. Arantxa Rodríguez Solís, Lic.
Estudiante

DEDICATORIA

Para Dios, mis hermanas Liz y Treiciel y mis sobrinos Fabián, Deiner, Emilia y Evan que en el transcurso de mis estudios fueron de gran apoyo y ánimo.

AGRADECIMIENTOS

Un profundo agradecimiento a mi tutora Yorleny Badilla por la oportunidad de colaborar en el proyecto de investigación “Mejoramiento del paquete tecnológico de producción clonal en ambiente protegido de *Tectona grandis* y *Cordia alliodora*”.

Al equipo de trabajo (Olman Murillo, Yorleny Badilla y Mario Zúñiga) por la dirección en todo el proceso.

Al equipo de trabajo en GENFORES (Yancy, Caleb, Eli y don Wil) por el apoyo, la compañía y colaboración en todo el proceso del trabajo experimental.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN GENERAL	i
GENERAL ABSTRACT.....	iv
ACREDITACIÓN	vi
DEDICATORIA.....	vii
AGRADECIMIENTOS.....	viii
ÍNDICE GENERAL	ix
ÍNDICE DE CUADROS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
CAPÍTULO 1	1
Resumen.....	1
Abstract.....	2
Introducción	3
Metodología	4
Descripción de sitio.....	4
Selección de sustratos.....	5
Descripción y manejo del ambiente protegido	6
Diseño Experimental	6
Variables de respuesta.....	7
Análisis de Datos.....	8
Resultados	8
Discusión	13
Conclusiones	15
Agradecimientos	15
Referencias.....	16
CAPÍTULO 2	22
Resumen.....	22
Abstract.....	23
Introducción	23
Metodología	26
Descripción de sitio y del ambiente protegido	26

Manejo del minijardín clonal	27
Diseño Experimental	27
Análisis de los datos.....	28
Resultados	30
1. Efecto de la densidad de siembra y frecuencia de cosecha.....	30
2. Relación de variables climáticas y silvícolas en la producción de brotes por planta madre	32
Análisis de regresión múltiple.....	33
Discusión	36
1. Efecto de la densidad de siembra y frecuencia de cosecha.....	36
2. Relación de variables climáticas y silvícolas en la tasa de brotadura.....	37
Conclusiones	39
Reconocimientos.....	39
Referencias.....	40
CAPÍTULO 3	48
Resumen.....	48
Abstract	49
Introducción	49
Metodología	51
Descripción de sitio	51
Descripción y manejo del ambiente protegido	52
Diseño experimental.....	53
Variables de respuesta.....	54
.....	56
Análisis estadístico.....	56
Resultados	57
Discusión	62
Conclusiones	65
Agradecimientos	65
Referencias.....	66

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Efecto del sustrato y del arreglo espacial de siembra, en la productividad de minijardines clonales de <i>T. grandis</i> , San Carlos, Costa Rica, 2021.....	8
Cuadro 2. Distribución porcentual del tamaño granulométrico de partícula (%), para cada uno de los sustratos investigados, San Carlos, Costa Rica, 2021.....	9
Cuadro 3. Porosidad y capacidad de retención de agua (%) en los sustratos estudiados en minijardines clonales de teca, San Carlos, Costa Rica, 2021.	10
Cuadro 4. Estimación del índice de productividad de propagación clonal de <i>T. grandis</i> en cinco arreglos espaciales de siembra, San Carlos, Costa Rica, 2021.	12
Cuadro 5. Diseño factorial para la evaluación de frecuencias y arreglos espaciales de siembra en la producción del minijardín clonal de <i>T. grandis</i> , San Carlos, Costa Rica.	28
Cuadro 6. Matriz dicotómica para analizar el valor cualitativo del arreglo espacial de siembra en el modelo lineal de regresión múltiple.	29
Cuadro 7. Frecuencia de Cosecha y Arreglo Espacial en la productividad de minijardines clonales de <i>T. grandis</i> , San Carlos, Costa Rica.	30
Cuadro 8. Análisis de correlación para el modelo lineal de regresión múltiple, para predecir la tasa de brotadura en minijardines clonales de teca en función de variables productivas y climáticas, San Carlos, Costa Rica.	33
Cuadro 9. Análisis de varianza del modelo lineal de regresión múltiple para predecir la tasa de brotadura en minijardines clonales de teca en función de variables productivas y climáticas, San Carlos. Costa Rica.	34
Cuadro 10. Diseño factorial para la evaluación del efecto del GA ₃ y el BAP en la producción del minijardín clonal de teca, San Carlos, Costa Rica.....	53
Cuadro 11. Efecto de la aplicación del GA ₃ y BAP en la productividad de minijardines clonales de teca, San Carlos, Costa Rica.	57
Cuadro 12. Contrastes ortogonales en la evaluación del efecto de dosis de GA ₃ y BAP en la productividad de minijardines clonales de <i>T. grandis</i> , San Carlos, Costa Rica. ...	58
Cuadro 13. Efecto del GA ₃ y BAP en la tasa y vigor de enraizamiento de mini estaquillas de <i>T. grandis</i> , San Carlos, Costa Rica.	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ensayo de sustratos y espaciamientos de minijardines clonales de <i>T. grandis</i> . San Carlos, Costa Rica, 2021.	7
Figura 2. Producción de brotes por área (m ²) en función de cinco arreglos espaciales de siembra, en minijardines clonales de <i>T. grandis</i> . San Carlos, Costa Rica, 2021.	10
Figura 3. Tasa de brotación por planta madre, en función de cinco arreglos espaciales de siembra, en minijardines clonales de <i>T. grandis</i> . San Carlos, Costa Rica, 2021.....	11
Figura 4. Mortalidad (%) por sustratos (a) y arreglos espaciales de siembra (b) en un minijardín clonal de <i>T. grandis</i> . San Carlos, Costa Rica, 2021.....	12
Figura 5. Producción de brotes por metro cuadrado en minijardines clonales de <i>T. grandis</i> , en función de la frecuencia de cosecha y del arreglo espacial de siembra, San Carlos, Costa Rica. N= densidad de siembra por metro cuadrado.	32
Figura 6. Producción de brotes por planta madre, en función de la radiación solar (a), la temperatura (b) en diferentes Frecuencias de Cosecha en minijardines clonales de <i>T. grandis</i> , San Carlos, Costa Rica. *Corresponde al valor promedio de brotes por planta madre por frecuencia de cosecha.....	35
Figura 7. Ensayo de aplicación de dosis de GA ₃ y BAP en minijardines clonales de <i>T. grandis</i> . (a) Vista del bancal con la distribución de unidades experimentales, (b) aislamiento temporal con cartón, de cada parcela durante la aplicación del tratamiento (dosis), San Carlos, Costa Rica.	54
Figura 8. Plantas madre de <i>T. grandis</i> en el minijardín clonal bajo el efecto del GA ₃ (a); brotes en fase de enraizamiento al aire, San Carlos, Costa Rica (b).	56
Figura 9. Efecto de las dosis del GA ₃ y BAP en la tasa de brotes por planta madre, longitud de brotes y producción de brotes por área en minijardines clonales de <i>T. grandis</i> , San Carlos, Costa Rica.	60

CAPÍTULO 1

Efecto del sustrato y arreglo espacial de siembra en la productividad de minijardines clonales de *Tectona grandis* Linn. F

Arantxa Rodríguez-Solís^{1,2}, Yorleny Badilla-Valverde², Olman Murillo²

Resumen

Introducción *Tectona grandis* es la especie con la mayor área plantada en Costa Rica, debido a los altos precios en el mercado internacional. La producción de plantas para reforestación se ha tecnificado aceleradamente en el país, actualmente se desarrolla basado en tecnologías de ambientes protegidos, que permiten aumentar la productividad, disminuir costos de operación y ofrecer material de siembra durante todo el año. **Objetivo** Evaluar el efecto de dos sustratos y cinco densidades de siembra en la productividad de minijardines clonales de *Tectona grandis* dentro de un ambiente protegido, San Carlos, Costa Rica. **Materiales y métodos** Para esto, se caracterizó físicamente cuatro sustratos inertes de fácil adquisición. Se estableció un ensayo experimental con diseño factorial (2x5) para evaluar dos sustratos (polvo de piedra puro y mezclado con 25% de carbón). Junto con cinco arreglos espaciales de siembra y cuatro clones como efecto repetición. El ensayo se evaluó durante cinco ciclos continuos de producción para aumentar su robustez estadística y aumentar la representatividad de los resultados. **Resultados** Se seleccionó el polvo de piedra como óptimo, mediante un análisis de su granulometría y buena retención de humedad. El uso del polvo de piedra como sustrato, sin adición del carbón, registró la mayor productividad y a un menor costo. El arreglo espacial de siembra de 10x10 cm con una planta en el centro ($n=145$ plantas/m²), registró la mayor producción de brotes por planta madre (1,16). El arreglo 7x5 cm aumentó la productividad hasta en 206 brotes m²/mes. **Conclusión** El cambio de densidad de siembra del minijardín clonal, en una

¹ Este trabajo formó parte de la tesis de maestría en Ciencias Forestales, Escuela de Ing. Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica del primer autor, financiado parcialmente por la Vicerrectoría de Investigación y Extensión y el Sistema de Posgrado del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

² Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal, Costa Rica. arantxarodriguezs@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0003-2875-6435>); ybadilla@itcr.ac.cr (autor para correspondencia; <https://orcid.org/0000-0002-6743-9734>); olmuga@yahoo.es (<https://orcid.org/0000-0003-3213-8867>).

primera etapa a 10x10cm con una planta adicional en el centro, resultó en un alto impacto en productividad (74%), mayor eficiencia en el uso del espacio y, una mejor gradualidad del cambio en el sistema operativo.

Palabras clave: silvicultura clonal, propagación vegetativa, mejoramiento genético, ambiente protegido, mini estacas.

Abstract

Introduction *Tectona grandis* is the species with the largest planted area in Costa Rica, due to the high prices in the international market. The production of plants for reforestation has been technified at an accelerated rate in the country and is currently being developed based on protected environment technologies, which increase productivity, reduce operating costs, and offer planting material throughout the year. **Objective** therefore, this research evaluated the effect of two substrates and five planting densities on the productivity of clonal mini gardens of *Tectona grandis* in a protected environment, San Carlos, Costa Rica. **Materials and methods** for this purpose, four easily available inert substrates were physically characterized, from which stone dust was selected as optimal, through an analysis of its granulometry and good moisture retention. An experimental trial with a factorial design (2x5) was established to evaluate two substrates (pure stone dust and mixed with 25% charcoal). Together with five spatial planting arrangements and four clones as a replicate effect. The trial was evaluated during five continuous production cycles to increase its statistical robustness and increase the representativeness of the results. **Results** The use of stone dust as substrate, without the addition of charcoal, recorded the highest productivity at the lowest cost. The spatial planting arrangement of 10x10 cm with one plant in the center ($n=145$ plants/m²), recorded the highest shoot production per mother plant (1.16). The 7x5 cm arrangement increased productivity by up to 206 shoots m²/month. **Conclusion** The change in planting density of the clonal mini garden, in a first stage to 10x10cm with an additional plant in the center, resulted in a high impact on productivity (74%), greater efficiency in the use of space and a better gradual change in the operating system.

Keywords: clonal forestry, vegetative propagation, tree improvement, greenhouse, mini cuttings.

Introducción

Tectona grandis es un árbol caducifolio de bosques tropicales y subtropicales, con madera de alta calidad, con notables propiedades físicas y mecánicas, durabilidad y resistencia a la descomposición (Camel et al., 2017; Monsalve-Paredes & Bello-Alarcón, 2020). En el comercio mundial anual de maderas tropicales, la madera en rollo de teca representó un 12% del valor generado (Food and Agriculture Organization, 2015). Dentro del mercado de exportaciones de madera en Costa Rica, se registró un aumento en la comercialización principalmente de teca, por sus altos precios con más de un 30% para el 2020 (Murillo et al., 2019; Oficina Nacional Forestal, 2021).

Los mercados principales de exportación tienen como destino países como Singapur, India, Vietnam, China y Emiratos Árabes Unidos (de Camino et al., 2016). Para el año 2010 la FAO reportó 4,3 millones de hectáreas sembradas de *T. grandis*, lo que representó un 2% de la superficie mundial reforestada y el 3% en regiones tropicales de América (Tamarit-Urias et al., 2019). Para Costa Rica correspondió casi a un 60% del área total plantada (Meza et al., 2019) equivalente a 33000 ha aproximadamente.

Los programas de mejoramiento genético con teca han permitido en el país, disminuir en más de dos años el turno de cosecha, aumentar en más de un 25% la productividad, y su valor comercial en más de un 30% por hectárea (Badilla-Valverde & Murillo, 2022; Hine et al., 2019; Murillo et al., 2012; 2013; 2019). La tecnología de propagación impulsó la silvicultura clonal desde los años 80, con un alto impacto en la productividad forestal mundial (Monteuuis & Goh, 2018; Murillo et al., 2012; 2013; Xavier et al., 2013). Se convirtió en una herramienta para la reproducción masiva de los árboles elite (Rojas Parajeles & Abdelnour Esquivel, 2012).

El mercado costarricense de plantas clonadas ha tenido un aumento vertiginoso en los últimos años (Murillo et al., 2018; Murillo & Guevara, 2013), gracias al aumento en productividad y disminución de años para llegar a cosecha (Badilla-Valverde & Murillo, 2022). Los ambientes protegidos utilizan sistemas hidropónicos (ausencia de suelo) en su mayoría (Gruda et al., 2016; Murillo et al., 2018; Xavier et al., 2013). El sustrato provee sostén y buen intercambio de oxígeno en las raíces (Nelson et al., 2019).

Algunos sustratos son la fibra de coco por su estabilidad física y buena aireación, la vermiculita, por su peso ligero y habilidad en retención de nutrientes (Savvas & Gruda, 2018) al igual que el carbón (Sohi et al., 2010).

También las mezclas mejoran el crecimiento (Gruda et al., 2013), como la arcilla expandida (3-8 mm, 70%), astillas de corteza (15%) y compost (15%) en invernaderos de Finlandia (Xie et al., 2020). En Brasil para *T. grandis* se reportó la mezcla vermiculita, arena, cáscara de arroz carbonizada, proporción (4:1) de corteza de pino + vermiculita, cáscara de arroz carbonizada + fibra de coco en proporción (1:1); y mezclas con 25, 50, 75 y 100% de biocarbón (Rezende et al., 2016). En Costa Rica, minijardines de *T. grandis* reportaron sustratos de polvo de piedra y 20% de carbón (Murillo et al., 2012; 2018) y mezclas con 55% de arena con limos y arcillas (Calderón-Ureña et al., 2019).

Investigaciones indicaron que el uso de sustratos como gravas y carbón dan buenos resultados (Murillo et al., 2012) y para aumentar la producción de brotes, se demostró el efecto de distanciamientos de siembra (Murillo et al., 2013). Distanciamientos de 10x10, 10x5 y 7,50x7,50 cm produjeron 110, 160 y 154 brotes por metro cuadrado respectivamente (Murillo et al., 2012; 2013). En espaciamentos de 5x5 cm, se reportó desde 0,48 a 0,77 brotes por planta madre; con mayor producción por metro cuadrado de hasta 266 brotes; no obstante, se requiere de cosechas más frecuentes debido a la competencia por recursos (Badilla, 2014; Murillo et al., 2012; 2013).

Lo anterior ilustra la importancia de estudiar factores que influyen en la productividad (Arcanjo do Nascimento et al., 2020; Badilla et al., 2017; Murillo et al., 2018), como el uso de sustratos con buena retención de humedad a bajo costo (Savvas & Gruda, 2018). Además, diferentes arreglos espaciales de siembra para mejorar su productividad y disminuir costos de producción (Alvarado & Raigosa, 2012). Este trabajo tuvo como objetivo evaluar el efecto de dos sustratos y cinco arreglos espaciales de siembra en la productividad de minijardines clonales de *Tectona grandis* dentro de un ambiente protegido, en San Carlos, zona norte de Costa Rica.

Metodología

Descripción de sitio

El estudio se realizó en el invernadero de la Cooperativa Internacional de Mejoramiento Genético Forestal (GENFORES) ubicado dentro del campus Tecnológico

de San Carlos, Costa Rica. Cuyas coordenadas son 10° 21 '39,28'' latitud norte y 84° 30' 28,72'' longitud oeste, a una elevación de 167 m.s.n.m. (Instituto Meteorológico Nacional, 2021) en la zona de vida Bosque Muy húmedo Tropical (Holdridge, 1982). Esta región presenta un promedio de precipitación de 3200 mm anuales, con mayor precipitación entre mayo a enero, y disminución no menor a 50 mm por mes desde febrero a abril. Presenta una temperatura promedio anual de 25 °C; con valores más altos durante marzo a junio y los más bajos entre diciembre a febrero (Instituto Meteorológico Nacional, 2014).

Selección de sustratos

Se estudió la idoneidad como sustrato hidropónico el polvo de piedra, el carbón, la arena gruesa y fina, por ser los más utilizados en minijardines clonales en Costa Rica. Se evaluó la composición por tamaño de partículas, porosidad y retención de humedad, con base en la metodología del Programa Nacional de Producción Agrícola bajo ambiente protegido (ProNAP) (Quesada & Marin, 2014). El criterio para elegir el mejor sustrato fue su composición granulométrica, donde posea al menos cuatro tamaños de partículas en proporciones homogéneas. El carbón se seleccionó por su aumento en la eficiencia del fertilizante, y reducción de la lixiviación (Semida et al., 2019).

Para obtener la granulometría, se tomó una muestra de 2 kg de polvo de piedra, arena fina, arena gruesa y carbón. El polvo de piedra, la arena fina y gruesa se colocaron en la estufa a 105 °C durante 24 h y el carbón a 60 °C por 24 h para su secado. Para el proceso de tamizaje, se utilizó una criba compuesta de tamices con tamaños de 80, 60, 40, 20, 10 y 8 orificios por pulgada (OPN), sobre un tamizador con amplitud de 60 mm durante 3 min. El porcentaje de partículas de cada tamiz se obtuvo de la relación del peso total del material en el frasco superior y el obtenido en cada tamiz.

Para el análisis de porosidad y retención de humedad, se establecieron dos repeticiones por sustrato, en envases con volumen conocido, a los cuales se le realizaron cinco perforaciones en la base, tapados con cinta adhesiva. Luego, se colocó el sustrato, se agregó agua hasta lograr un brillo en la superficie de las muestras y se dejó reposar durante 15 min. Se drenó el exceso de agua de cada recipiente durante 2 min para obtener el volumen. Posteriormente, cada muestra de sustrato utilizado se pesó para obtener el peso húmedo y se colocó en una estufa a 65 °C durante 48 h para obtener el peso seco.

Para determinar la porosidad total y el porcentaje de capacidad de retención de agua se utilizó la siguientes fórmulas:

$$1. \text{ Porosidad Total (\%)} = \frac{(\text{peso húmedo} - \text{peso seco}) + \text{volumen drenado}}{\text{volumen del sustrato}} * 100$$

$$2. \text{ Capacidad de retención de agua (\%)} = \frac{(\text{peso húmedo} - \text{peso seco})}{\text{volumen del sustrato}} * 100$$

Descripción y manejo del ambiente protegido

El ambiente protegido fue construido con una cobertura en el techo y paredes de polietileno transparente con tratamiento ultravioleta, serán al 60% ubicado a 3 m sobre el nivel del suelo para dar efecto de sombra y mantener una temperatura interna promedio de 35 °C y un rango de humedad relativa entre 80 y 90% (Badilla, 2014; Murillo et al., 2012). Las plantas para el ensayo se obtuvieron mediante el protocolo de propagación vegetativa que utiliza GENFORES (Badilla, 2014; Murillo et al., 2013).

Para el manejo del ensayo se utilizó el protocolo empleado en la producción de plantas, que corresponde a un régimen de fertirriego con solución hidropónica tres veces por semana, impulsado por un sistema de riego por goteo automatizado utilizando una bomba con 1 atm de presión. Donde se aplicó 5 min de agua para humedecer el sustrato, por 15 min la solución nutritiva y por último 5 min de agua para el lavado de las mangueras. Durante la investigación, las plantas madre se cosecharon cada 14 días durante dos meses.

Diseño Experimental

Se estableció un diseño factorial donde se evaluaron cinco arreglos espaciales de siembra y dos sustratos con cuatro repeticiones (Figura 1). Los sustratos evaluados fueron (1) polvo de piedra y (2) mezcla de polvo de piedra con 25% de carbón. Los cinco arreglos espaciales de siembra fueron 10x10 cm ($n=100/\text{m}^2$), 10x10 cm con dos plantas por hoyo ($n=200/\text{m}^2$), 10x5 cm ($n=200/\text{m}^2$), 7x5 ($n=285/\text{m}^2$) y 10x10 cm con planta en el medio ($n=145/\text{m}^2$). Este último caso se debe considerar que no se debe sembrar la planta en el medio donde esté ubicada la línea de riego.

Las repeticiones se constituyeron de 4 clones compuestos de 20 unidades experimentables por repetición, distribuidas en cinco líneas a lo largo, con cuatro plantas

de ancho para los arreglos 10x10 cm, 10x5 cm y 7x5 cm. Un total de 40 plantas para la distribución 10x10*2 cm correspondiente a un par de plantas por hoyo o hueco y, para el 10x10*1/2 cm correspondiente al arreglo espacial con planta en el medio correspondió entre veinticuatro a veintiocho plantas, dependiendo de la distribución de las líneas de riego.



Figura 1. Ensayo de sustratos y espaciamentos de minijardines clonales de *T. grandis*. San Carlos, Costa Rica, 2021.

Variables de respuesta

Se cuantificó la tasa de producción de brotes por planta madre, producción de brotes por metro cuadrado, mortalidad dentro del minijardín y porcentaje de enraizamiento de los brotes cosechados. Con el fin de garantizar madurez en el minijardín, la recolección de los datos inició a los seis meses de establecido. Las pruebas de enraizamiento se realizaron en un ambiente controlado a 30 °C de temperatura y 90% de humedad relativa y bajo el protocolo de propagación vegetativa que utiliza GENFORES (Badilla, 2014; Murillo et al., 2013).

Para efectos de comparación entre los arreglos espaciales, se utilizó el Índice de Productividad de Propagación Clonal (IPPC), como lo sugieren Murillo et al. (2013). El IPPC determina la productividad con base en el número de estaquillas producidas por m²/mes, para lo cual se utilizaron los parámetros, a) número de plantas madre/m², b) tasa de brotes por planta madre, c) frecuencia de cosecha del minijardín, d) tasa de enraizamiento, e) tasa de mortalidad en el minijardín, f) tasa mortalidad en área de enraizamiento (considerada como fija), g) tasa de control de calidad final (considerado

como fija). Se estimó el porcentaje de aumento en productividad con respecto al arreglo de 10x10 cm, por ser el espaciamiento más utilizado a nivel operativo.

Análisis de Datos

Para el procesamiento de la información se utilizó Microsoft Excel 365 y luego InfoStat (IS) versión 2020. Se realizó una comprobación de los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas. Una vez verificado se procedió con el ANDEVA ($p < 0,05$). Con las diferencias significativas determinadas entre los tratamientos, se aplicó una prueba de comparación múltiple con base en la prueba de Tukey.

Resultados

De manera general, el sustrato influyó significativamente en una mayor mortalidad cuando se mezcló con el carbón (Cuadro 1), mientras que el arreglo espacial y las repeticiones si registraron diferencias significativas en todas las variables. La tasa de mortalidad registró una significancia leve ($p < 0,95$) con respecto al sustrato y al arreglo espacial, aunque muy marcada para el efecto de la repetición. Los valores en el porcentaje de enraizamiento oscilaron entre un 98 y 99%, por lo que no hubo diferencias significativas entre los tratamientos.

Cuadro 1. Efecto del sustrato y del arreglo espacial de siembra, en la productividad de minijardines clonales de *T. grandis*, San Carlos, Costa Rica, 2021.

Fuente de Variación	Valor de p			
	Tasa brotadura (Brote/planta)	Producción de brotes por área (m ²)	Mortalidad (%)	Porcentaje de enraizamiento (%)
Sustrato	0,2645 ^{ns}	0,1793 ^{ns}	0,0290*	0,4946 ^{ns}
Arreglo espacial de siembra	0,0024**	<0,0001**	0,0239*	0,9359 ^{ns}
Sustrato*Arreglo espacial de siembra	0,1958 ^{ns}	0,1240 ^{ns}	0,1450 ^{ns}	0,2644 ^{ns}
Repetición	0,0119*	0,0230*	0,0004**	0,4425 ^{ns}
Repetición*Sustrato	0,3346 ^{ns}	0,2574 ^{ns}	0,7875 ^{ns}	0,3429 ^{ns}

Repetición* Arreglo espacial de siembra	0,0265 ^{ns}	0,0176 ^{ns}	0,4397 ^{ns}	0,6174 ^{ns}
--	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------

Modelo: $Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \delta_{ij} \varepsilon_{ijk}$
 * $p > 0,95$; ** $p > 0,99$; ns=no significativo.

Los tamaños de partícula promedio presentes en los cuatro sustratos evaluados fueron 0,40, 0,84 y 2,38 mm respectivamente (Cuadro 2). Las dos partículas de mayor tamaño representaron más del 35% en la arena gruesa, mientras que solo el 8% en la fina. El polvo de piedra se asemejó más a la arena gruesa en su composición de partículas, con un 31% compuesto de partículas de mayor tamaño; y a la arena fina con dos partículas de menor tamaño (17,30 vs 17,00%), que claramente se diferencia de la composición de la arena gruesa con un 13,40% de estas partículas de menor tamaño.

Cuadro 2. Distribución porcentual del tamaño granulométrico de partícula (%), para cada uno de los sustratos investigados, San Carlos, Costa Rica, 2021.

Tamaño partícula (mm)	Arena gruesa	Arena fina	Polvo piedra	Carbón
2,38	28,58	6,49	23,09	99,14
2,00	6,99	1,91	8,32	0,00
0,84	29,34	20,23	34,26	0,00
0,40	20,60	53,67	15,42	0-,00
0,09	13,45	17,33	16,69	0,14
0,06	0,47	0,18	0,82	0,07
Residuo	0,59	0,21	1,39	0,46

Para el caso de arena fina, más del 50% de sus partículas son de 0,4 mm, lo que se comprobó que el 45% de porosidad son espacios relativamente pequeños lo que favoreció que el agua llenara estos espacios porosos. Por otro lado, el carbón utilizado mostró partículas mayores a 2,38 mm y por ende los poros, por esta razón presentó la capacidad de retención más baja de los 4 sustratos evaluados (Cuadro 3).

Cuadro 3. Porosidad y capacidad de retención de agua (%) en los sustratos estudiados en minijardines clonales de teca, San Carlos, Costa Rica, 2021.

Sustrato	Porosidad (%)	Capacidad de retención de agua (%)
Carbón	63,45	16,15
Arena gruesa	49,46	36,49
Arena fina	45,41	42,03
Polvo de piedra	39,01	29,01

Se puede observar un gradiente de incremento en la producción de brotes, conforme aumentaba la densidad de plantas en el minijardín. La prueba mostró que el mejor arreglo espacial fue el 7x5 cm, con 314 brotes por metro cuadrado. Seguido del arreglo espacial 10x5 cm con 222 brotes y 10x10 cm con dos plantas por hoyo, con 206 brotes por metro cuadrado (Figura 2).

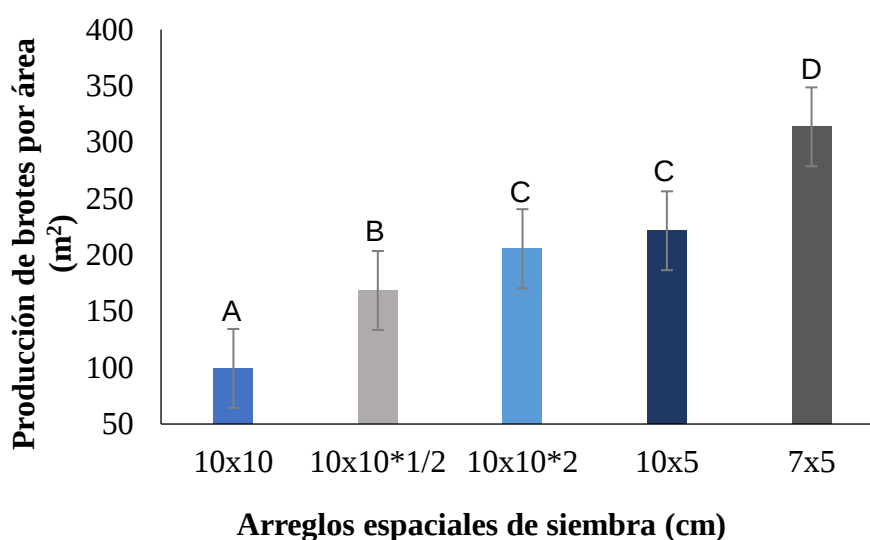


Figura 2. Producción de brotes por área (m²) en función de cinco arreglos espaciales de siembra, en minijardines clonales de *T. grandis*. San Carlos, Costa Rica, 2021.

De manera similar, ocurrió con la tasa de brotes por planta madre (Figura 3), aunque el gradiente se interrumpe con respecto al arreglo de siembra de 10x10*1/2 cm, que supera a los demás tratamientos evaluados. Además, la prueba Tukey mostró que el arreglo espacial 10x10 cm con planta en medio produjo 1,16 brotes por planta madre, seguido del arreglo 10x5 cm con una media de 1,11 brotes por planta. Ambos

estadísticamente superiores al arreglo espacial 10x10 cm, con 0,99 brotes por planta, como la tasa más baja de todos los casos (Figura 3).

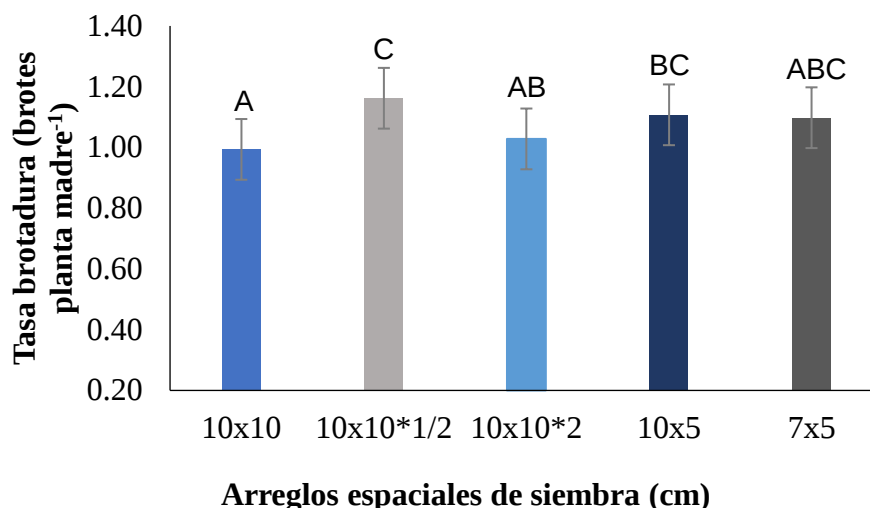


Figura 3. Tasa de brotadura por planta madre, en función de cinco arreglos espaciales de siembra, en minijardines clonales de *T. grandis*. San Carlos, Costa Rica, 2021.

Dado que cada repetición estuvo conformada por un genotipo diferente se observó diferencias significativas para las variables de producción. El clon 5x registró la mejor tasa de brotadura sembrado a 10x10 cm con planta en el medio (1,13 brotes planta⁻¹), mientras que el clon 1BA sembrado a 10x10 cm obtuvo el valor más bajo (0,86 brotes planta⁻¹ y 86 brotes m⁻²). Para el caso en producción de brotes por área, el clon 53 sembrado a 7x5 obtuvo el valor más alto (334 brotes m⁻²). El efecto del genotipo en la producción podría ser de interés a futuro, para una planificación a gran escala de minijardines con lotes monoclonales.

La mortalidad demostró ser significativamente mayor en el sustrato que incluyó el carbón. Con respecto al arreglo espacial, la mayor mortalidad (>14%) se registró para la densidad de 200 plantas m⁻² (10x10*2), mientras que la menor se observó en las densidades 10x10 y 10x5 cm, con un 4,6 y 4,4% respectivamente (Figura 4).

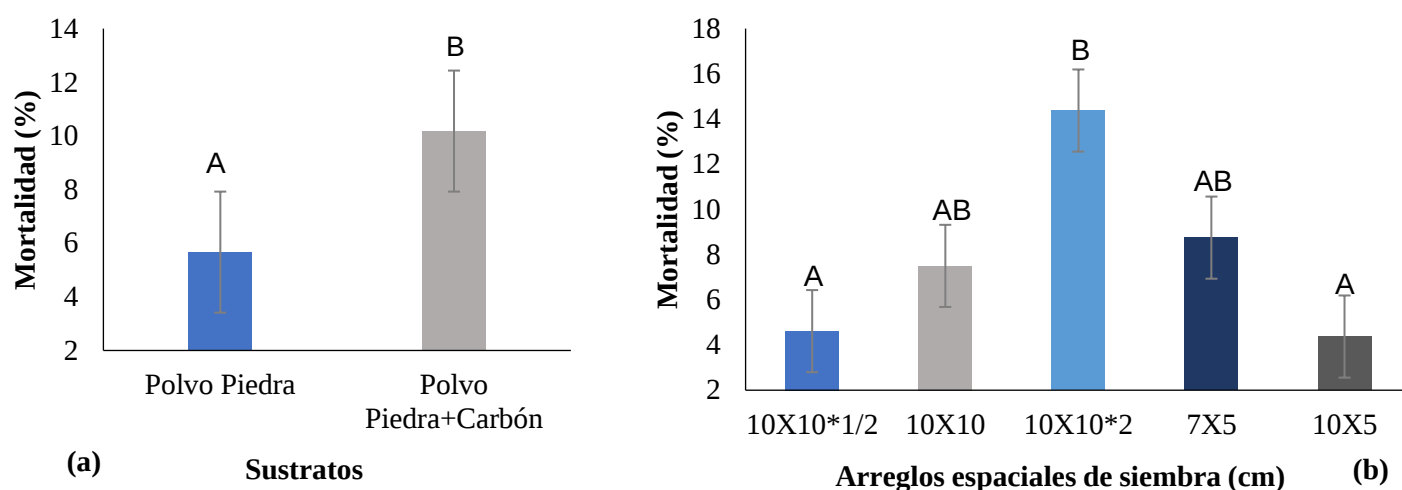


Figura 4. Mortalidad (%) por sustratos (a) y arreglos espaciales de siembra (b) en un minijardín clonal de *T. grandis*. San Carlos, Costa Rica, 2021.

Finalmente, con el índice IPPC, se pudo observar mayor productividad con el aumento en la densidad de siembra, a pesar de que algunos parámetros afectaron la producción como la tasa de brotación por planta madre (Cuadro 4). Todos los arreglos espaciales superaron ampliamente la capacidad de producción de estaquillas por unidad de área, en relación con el espaciamiento 10x10 cm.

Cuadro 4. Estimación del índice de productividad de propagación clonal de *T. grandis* en cinco arreglos espaciales de siembra, San Carlos, Costa Rica, 2021.

Arreglo espacial (cm)	10x10	10x10*1/2	10x10*2	10x5	7x5
Número plantas madre/m ²	100	145	200	200	285
Tasa de brotación (brotes por planta madre)	0,99	1,16	1,03	1,11	1,10
Tasa de enraizamiento (%)	98,6	98,6	98,6	98,6	98,6
Mortalidad en el minijardín clonal (%)	7,5	4,61	14,4	4,38	8,75
Mortalidad en área de aclimatación (%)	5	5	5	5	5
Control de calidad final (%)	15	15	15	15	15
Frecuencia de cosecha al mes	2	2	2	2	2

Tiempo de producción de una estaquilla para ir a campo (semanas)	8	8	8	8	8
IPPC N° plantas/m ² /mes	66	115	126	152	206
Aumento en productividad (%)	0	74	91	130	212

Discusión

Del análisis granulométrico, se determinó que la composición polvo de piedra presentó mayor diversidad en tamaño de partículas. Contiene suficientes partículas finas que le confieren mayor capacidad de retención de agua. Investigaciones demostraron que sustratos con buena proporción en partículas favorecen el drenaje y promueven un intercambio de oxígeno óptimo, lo que mejora el crecimiento de las raíces (Gruda et al., 2013; Nelson et al., 2019). Con el polvo de piedra + carbón (25%), es importante considerar que al combinarlas afecta las propiedades físicas del sustrato (Picken et al., 2008). Partículas mayores a 0,50 mm disminuye la retención de humedad, la capacidad de aireación hasta un 84% debido al aumento del espacio poroso (Morales-Maldonado & Casanova-Lugo, 2015).

La producción de brotes por metro cuadrado aumentó la cantidad de plantas por área. Comportamiento similar se reporta en estudios sobre minijardines clonales de *T. grandis* e *Hieronyma alchorneoides* en San Carlos (Murillo et al 2013), y en minijardines de *T. grandis* en Brasil (Badilla, 2014). Además, cultivos de chile dulce (*Capsicum annuum*) bajo invernaderos en Costa Rica, demostraron que una mayor densidad de siembra mejora los rendimientos por unidad de área (Soto-Bravo et al., 2020). Sin embargo, provoca una mayor competencia por recursos y una mayor mortalidad (Souza et al., 2014).

El arreglo espacial de siembra 10x10*1/2 cm (145 plantas/m²) rompe la tendencia con un efecto atípico y el registro más alto de brotes por planta madre. Estos resultados son contrarios a los reportados por Murillo et al. (2013) con minijardines clonales de *T. grandis*, donde se observó un patrón inversamente proporcional, entre la densidad de siembra y la tasa de producción de brotes por planta madre. Mismo comportamiento fue reportado en *Capsicum baccatum*, Perú, ya que ocurre una competencia menor entre las plantas por nutrientes y recurso hídrico (Paniagua-Hernández et al., 2020; Trujillo

Sánchez, 2021). También, fue similar al reportado en eucalipto (Brasil), en un estudio sobre la producción de brotes en diferentes densidades de siembra (Souza et al., 2014).

La mortalidad de las plantas madre es una variable esencial en el manejo de los minijardines clonales. Puede observarse en la figura 3, que un aumento en la densidad de plantas produce una tendencia al alza en la tasa de mortalidad. El caso más evidente fue el del arreglo de 10x10cm con dos plantas por hoyo. Este sistema de siembra registró una tasa mayor y significativa de mortalidad de casi el doble con respecto a los demás espaciamientos. De manera general, las diferencias observadas en mortalidad entre los tratamientos no fueron significativas (Figura 4b), con excepción del arreglo 10x10*2 plantas (N = 200).

Se demostró el efecto significativo de la repetición (genotipo) e interacción (repetición x arreglo espacial de siembra) en la productividad del minijardín; donde el clon 1BA fue el más sensible cuando se plantó en arreglos de alta densidad. Un estudio realizado en Brasil en minijardines de *T. grandis* reportó la influencia del material genético en la propagación vegetativa (Badilla, 2014). En plantaciones energéticas de eucalipto, Brasil, se reportó el efecto del genotipo e interacción (genotipo x ambiente) en el rendimiento en la producción (Cunha et al., 2021). El uso de cuatro genotipos, permitió un mayor control experimental, mayor representatividad de los resultados y confirió mayor robustez a la investigación (Badilla, 2014; Bonnín et al., 2020; Murillo et al., 2013).

Este estudio demostró que el sustrato y arreglo espacial no afectó el porcentaje de enraizamiento de las estaquillas. Resultado similar al reportado en *Saccharum officinarum* (Colombia) sobre la capacidad de enraizamiento por sistema de inmersión temporal, debido a que fue afectado por las concentraciones de citoquininas adicionadas al medio de cultivo (Sarria, 2022). La tasa de productividad siguió un patrón esperado, en un gradiente de aumento asociado a la densidad de siembra (Murillo et al., 2013). La mortalidad siguió el mismo gradiente, pero no como para afectar los valores de productividad. De manera clara, sembrar más denso en el minijardín aumentará significativamente la producción de brotes por unidad de superficie.

Sin embargo, en términos operativos, una densidad muy alta en el minijardín clonal implica un manejo mucho más intensivo, cosechas más frecuentes, mayor riesgo de aparición de enfermedades, un manejo más cuidadoso del fertirriego. Cambiar el sistema operativo a una intensidad y volumen tan acelerado de trabajo, trae implicaciones en la organización del trabajo y personal. Por tanto, si se desea aumentar la productividad,

es conveniente llevarlo a cabo por medio de cambios graduales en la densidad de siembra, para poder ir observando y adaptando todo el sistema operativo.

El cambio de un arreglo espacial de 10x10 cm a otro de 10x10*1/2 cm, no es tan drástico y significa aumentar en 45 plantas/m², con un aumento de un 74% la producción de estaquillas/m²/mes. Puede considerarse alto y de gran impacto en la eficiencia y costos de producción. Los otros dos espaciamientos más densos (10x5 y 7x5 cm) podrían ser considerados en una segunda etapa, que debería evaluarse primero a escala experimental para su adopción paulatina.

Conclusiones

Se registró una mortalidad mayor con el uso de polvo de piedra mezclado con 25% de carbón, versus el uso de polvo de piedra.

El arreglo espacial de siembra de 10x10 cm con una planta en el centro, registró la mayor producción de brotes por planta madre, la menor tasa de mortalidad y un aumento en la productividad del minijardín clonal.

Con la siembra de 285 plantas por metro cuadrado (7x5 cm) en el minijardín clonal, se alcanzó la mayor producción de mini estaquillas por metro cuadrado y la mayor tasa de productividad dentro del minijardín clonal.

El cambio de densidad de siembra del minijardín clonal, en una primera etapa a 10x10 cm con una planta adicional en el centro, resultó en un alto impacto en productividad, mayor eficiencia en el uso del espacio y, en una mejor gradualidad del cambio en el sistema operativo.

Agradecimientos

Esta investigación formó parte del proyecto de investigación “Mejoramiento del paquete tecnológico de producción clonal en ambiente protegido de *Tectona grandis* y *Cordia alliodora*”, financiado por la Vicerrectoría de Investigación y Extensión y del Sistema de Posgrado, como parte del trabajo de tesis de la Maestría en Ciencias Forestales de la Escuela de Ingeniería Forestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Referencias

- Alvarado, A., & Raigosa, J. (2012). Nutrición y fertilización forestal en regiones tropicales. *Agronomía Costarricense*, 36(1), 113-115. http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0377-94242012000100009&lng=en&tlng=es.
- Arcanjo do Nascimento, D., Peres Filho, O., Guimarães Favare, L., Dias Souza, M., dos Santos, A., & Gomes Silva Junior, J. (2020). Inicial development of *Tectona grandis* L.f under nutritional restriction. *FLORESTA*, 50(2), 1223–1230. <http://dx.doi.org/10.5380/rf.v50i2.62242>
- Badilla-Valverde, Y., & Murillo, O. (2022). Selección clonal de *Tectona grandis* L. f. para el Pacífico seco de Costa Rica. *Uniciencia*, 36(1), 1–15. <https://doi.org/10.15359/RU.36-1.19>
- Badilla, Y. (2014). *Clonagem de Tectona grandis Linn F. por estaquia e miniestaquia* [Tese de Mestrado, Universidad Federal de Vicosa]. Biblioteca Digital Brasileira de Teses e dissertações. <http://locus.ufv.br/handle/123456789/3158>
- Badilla, Y., Xavier, A., & Murillo Gamboa, O. (2017). Storage time effect on mini-cuttings rooting in *Tectona grandis* Linn F. clones. *Revista Árvore*, 41(3), Article e410303. <https://doi.org/10.1590/1806-90882017000300003>
- Bonnin, S. M., Faustino, L. I., Alvarez, J. A., & Graciano, C. (2020). ¿La combinación de clones posee alguna ventaja sobre los sistemas monoclonales? *Revista de La Facultad de Agronomía, La Plata*, 119(2), Artículo 051. <https://doi.org/10.24215/16699513E051>
- Calderón-Ureña, F., Esquivel-Segura, E., & Acevedo-Tapia, M. (2019). Manejo nutricional y de riego en minijardines clonales de *Tectona grandis* (Linn. F) en la zona sur de Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 16(39), 43–52. <https://doi.org/10.18845/rfmk.v16i39.4427>

- Camel, V., Galeano, E., & Carrer, H. (2017). Red de coexpresión de 320 genes de *Tectona grandis* relacionados con procesos de estrés abiótico y xilogénesis. *TIP*, 20(2), 5–14. <https://doi.org/10.1016/j.recqb.2017.04.001>
- Cunha, T. Q. G. da, Santos, A. C., Novaes, E., Hansted, A. L. S., Yamaji, F. M., & Sette, C. R. (2021). Eucalyptus expansion in Brazil: Energy yield in new forest frontiers. *Biomass and Bioenergy*, 144, Article 105900. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2020.105900>
- de Camino, R., Villalobos, R., & Pierre, J. (2016). *Costa Rica case study* (Prepared for FAO as part of the State of the World's Forests 2016 (SOFO)). Food and Agriculture Organization. <http://www.fao.org/3/a-C0180e.pdf>
- Food and Agriculture Organization. (2015). *Global Teak trade in the aftermath of Myanmar's Log export Ban*. <http://www.fao.org/forestry/plantedforests/67508@170537/en/>
- Gruda, N., Gianquinto, Tüzel, Y., & Savvas, D. (2016). *Culture soil-less* (3rd ed). CRC Press, Taylor & Francis Group. <https://doi.org/10.1081/E-ESS3-120053777>
- Gruda, N., Qaryouti, M. ., & Leonardi, C. (2013). Growing media. In Duffy, R (Ed.), *Good Agricultural Practices for greenhouse vegetable crops -Principles for Mediterranean climate areas* (pp. 271–302). Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/3/i3284e/i3284e.pdf>
- Hine, A., Rojas, A., Suarez, L., Murillo, O., & Espinoza, M. (2019). Optimization of pollen germination in *Tectona grandis* (Teak) for breeding programs. *Forests*, 10(10), Article 908. <https://doi.org/10.3390/f10100908>
- Holdridge, L. (1982). *Ecología basada en zonas de vida* (H. Jiménez, Ed.). Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. <http://www.cct.or.cr/contenido/wp-content/uploads/2017/11/Ecologia-Basada-en-Zonas-de-Vida-Libro-IV.pdf> (Trabajo original publicado 1978)

- Instituto Meteorológico Nacional. (2014). *Clima en Costa Rica*. Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica. <https://www.imn.ac.cr/web/imn/clima-en-costa-rica>
- Instituto Meteorológico Nacional. (2021). *Condiciones actuales del tiempo. Estación Automática del TEC, Sede Santa Clara, San Carlos, Alajuela*. <https://www.imn.ac.cr/especial/estacionStaClara.html>
- Lattuada, D. S., Altmann, T., Back, M. M., Lourosa, G. V., & De Souza, P. V. D. (2016). Dosis del nitrógeno en el abonado de minijardin clonal de pitangueras (*Eugenia uniflora*). *Revista Brasileira de Fruticultura*, 38(3), Artículo 317. <https://doi.org/10.1590/0100-29452016317>
- Meza, V., Alfaro, K., Bedoya, R., Romero, M., Valerio, A., & Montenegro, P. (2019). *Reforestación comercial en Costa Rica regiones Huetar Atlántica, Huetar Norte y Chorotega* (1 ed). INISEFOR. (Colección: Estadísticas forestales para la toma de desiciones del manejo forestal sostenible). https://www.fonafifo.go.cr/media/2976/reforestacion_comercial.pdf
- Monsalve-Paredes, M., & Bello-Alarcón, A. (2020). Evaluación antimicrobiana de extractos obtenidos de los residuos de la corteza de Teca (*Tectona grandis* l.f). *CIENCIA UNEMI*, 13(32), 63–68. <http://ojs.unemi.edu.ec/index.php/cienciaunemi/article/view/935>
- Monteuuis, O., & Goh, D. (2018). Teak clonal forestry. *Teaknet Bulletin*, 11(2), 4-13. [https://agritrop.cirad.fr/587824/1/OM&DGTeaknet 11-2018.pdf](https://agritrop.cirad.fr/587824/1/OM&DGTeaknet%2011-2018.pdf)
- Morales-Maldonado, E. R., & Casanova-Lugo, F. (2015). Mezclas de sustratos orgánicos e inorgánicos, tamaño de partícula y proporción. *Agronomía Mesoamericana*, 26(2), 365-372. <https://doi.org/10.15517/am.v26i2.19331>
- Murillo, O., Badilla-Valverde, Y., & Barboza-Flores, S. (2018). Costos de producción en ambiente protegido de clones para reforestación. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 15(37), 15–24. <https://doi.org/10.18845/rfmk.v15i37.3597>

- Murillo, O., Badilla, Y., Villalobos, M., & Rojas-Parajeles, F. (2013). *Optimización de la tecnología de propagación vegetativa in vivo y plantación de teca y pilón* (Colecciones: Informe de Proyectos de Investigación). Instituto Tecnológico de Costa Rica.
https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/3243/optimizacion_tecnologia_propagacion_vegetativa_in_vivo.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Murillo, O., De Resende, V., Badilla, Y., & Gamboa, J. P. (2019). Genotype by environment interaction and teak (*Tectona grandis* L.) selection in Costa Rica. *Silvae Genetica*, 68, 116–121. <https://doi.org/10.2478/sg-2019-0020>
- Murillo, O., Espitia, M., & Castillo, C. (2012). *Fuentes semilleras para la producción forestal* (1ª ed.). Editorial Domar S.A.S.
- Murillo, O., & Guevara, V. (2013). *Estado de los recursos genéticos forestales de Costa Rica 2012* (No. F30/8379). Sistema Nacional de Áreas de Conservación.
- Nelson, S., Nelson, M., Nelson, D., Johnston, D., & Nelson, S. (2019). Plant substrate growing medium. *Patent Application*, 16(18), 9.
<https://patents.google.com/patent/US10959384B2/en>
- Oficina Nacional Forestal. (2021). *Balanza Comercial y Tendencias de las Exportaciones e Importaciones de madera y muebles de madera en Costa Rica, estadísticas 2020*.
<https://onfcr.org/balanza-comercial-y-tendencias-de-las-exportacione-2>
- Paniagua-Hernández, L. D., Arias-Gamboa, L. M., Alpízar-Naranjo, A., Castillo-Umaña, M. Á., Camacho-Cascante, M. I., Padilla-Fallas, J. E., & Campos-Aguilar, M. (2020). Efecto de la densidad de siembra y edad de rebrote en la producción y composición bromatológica de *Tithonia diversifolia* (Hemsl.) A. Gray. *Pastos y Forrajes*, 43(4), 275–283.
<https://payfo.ihatuey.cu/index.php?journal=pasto&page=article&op=view&path%5B%5D=2202>

- Picken, P., Reinikainen, O., & Herranen, M. (2008). Horticultural peat raw material and its chemical and physico-chemical characteristics in Western Finland and Western Estonia. *Acta Horticulturae*, 779, 415–422. <https://doi.org/10.17660/ACTAHORTIC.2008.779.52>
- Quesada, G., & Marin, F. (2014). *Una metodología para la evaluación de sustratos para agricultura protegida*. Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica. <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/AV-1599.pdf>
- Rezende, F. A., dos Santos, V. A. H. F., de Freitas, C. M. B. M., & Morales, M. M. (2016). Biochar na composição de substratos para a produção de mudas de teca. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 51(9), 1449–1456. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900043>
- Rojas Parajeles, F., & Abdelnour Esquivel, A. (2012). Brotación in vitro de yemas de teca (*Tectona grandis* L. f.). *Tecnología en Marcha*, 25(5), 67-72. <https://doi.org/10.18845/tm.v25i5.475>
- Sarria, Y. (2022). *Evaluación de tres medios de cultivo en enraizamiento de caña de azúcar (Saccharum officinarum) por Sistema de inmersión temporal* [Proyecto aplicado o Tesis]. Repositorio Institucional UNAD. <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/47869>
- Savvas, D., & Gruda, N. (2018). Application of soilless culture technologies in the modern greenhouse industry - A review. *European Journal of Horticultural Science*, 83(5), 280–293. <https://doi.org/10.17660/eJHS.2018/83.5.2>
- Semida, W. M., Beheiry, H. R., Sétamou, M., Simpson, C. R., Abd El-Mageed, T. A., Rady, M. M., & Nelson, S. D. (2019). Biochar implications for sustainable agriculture and environment: A review. In K. Balkwill (Ed.), *South African Journal of Botany* (Vol. 127, pp. 333–347). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.11.015>
- Sohi, S. P., Krull, E., Lopez-Capel, E., & Bol, R. (2010). A review of biochar and its use

- and function in soil. In D. L. Sparks (Ed.), *Advances in Agronomy* (Vol. 105, pp. 47–82). Academic Press Inc. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(10\)05002-9](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)05002-9)
- Soto-Bravo, F., Araya-Cubero, E. A., Echandi-Gurdian, C., Soto-Bravo, F., Araya-Cubero, E. A., & Echandi-Gurdian, C. (2020). Efecto de la densidad de siembra y volumen de sustrato sobre parámetros de riego y rendimiento de chile dulce ‘dulcítico’, en hidroponía bajo invernadero. *Agronomía Costarricense*, 44(1), 43–64. <https://doi.org/10.15517/RAC.V44I1.40001>
- Souza, C. C., Xavier, A., Leite, F. P., Santana, R. C., & Paiva, H. N. de. (2014). Densidade de minicepas em minijardim clonal na produção de mudas de eucalipto. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 34(77), 49–56. <https://doi.org/10.4336/2014.pfb.34.77.512>
- Tamarit-Urias, J. C., De los Santos-Posadas, H. M., Aldrete, A., Valdez-Lazalde, J. R., Ramírez-Maldonado, H., & Guerra-De la Cruz, V. (2019). Sistema de crecimiento y rendimiento maderable para plantaciones de teca (*Tectona grandis* L. f.) en Campeche, México. *Madera y Bosques*, 25(3), 1-16. <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2531908>
- Trujillo Sánchez, M. (2021). *Densidad de siembra en la producción y calidad de ají escabeche (Capsicum baccatum L. var. pendulum), en cañete*. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Xavier, A., Wendling, I., & da Silva, R. L. (2013). 2a edição. *Silvicultura Clonal. Princípios e Técnicas*. Editora UFV, Brasil.
- Xie, L., Lehvävirta, S., & Valkonen, J. P. T. (2020). Case study: Planting methods and beneficial substrate microbes effect on the growth of vegetated roof plants in Finland. *Urban Forestry and Urban Greening*, 53, Article 126722. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126722>

CAPÍTULO 2

Efecto de la frecuencia de cosecha y arreglos espaciales de siembra en la productividad de minijardines clonales de *Tectona grandis* Linn. F

Arantxa Rodríguez-Solís¹⁻², Yorleny Badilla-Valverde², Olman Murillo²

Resumen

T. grandis es una de las especies más plantadas en Costa Rica, por su adaptabilidad al ambiente de plantación y al alto valor en el mercado internacional. Esto ha motivado el mejoramiento y optimización de la producción clonal de la especie. Está investigación evaluó durante 9 ciclos continuos productivos, el efecto de 3 frecuencias de cosecha y 5 arreglos espaciales de siembra en minijardines clonales de teca en San Carlos, Costa Rica. Se estableció un diseño factorial (3x5) para evaluar frecuencia de cosecha cada 10, 12 y 14 días (factor A) y los arreglos espaciales de siembra 10x10 cm, 10x5 cm, 7x5 cm, 10x10 cm con planta en el medio y 10x10 cm con dos plantas por hoyo (factor B) con 4 repeticiones (genotipos). El análisis de varianza y prueba de Tukey ($\alpha=0,05$), mostraron valores significativamente diferentes para los arreglos 10x10 cm*1/2, 10x5 cm y 7x5 cm con 0,90, 0,88 y 0,86 brotes planta madre⁻¹ respectivamente, con relación al arreglo 10x10 cm*2, presentó el promedio más bajo (0,77) por cosecha de brotes planta madre⁻¹. El arreglo 7x5 cm registró un promedio de 247 brotes m⁻² por cosecha con la mayor producción. También se buscó explicar la influencia de arreglos espaciales de siembra, densidad, frecuencia, humedad relativa (%), temperatura y radiación sobre la tasa de brotadura, con un modelo líneal, el cual mostró correlaciones positivas con todas las variables excepto con la densidad de siembra. Dentro del modelo, la frecuencia y radiación presentaron una relación positiva con la productividad, mientras que la

¹ Este trabajo formó parte de la tesis de maestría en Ciencias Forestales, Escuela de Ing. Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica. del primer autor, el cual fue financiado parcialmente por la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del Instituto Tecnológico de Costa Rica. arantxarodriguezs@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0003-2875-6435>).

² Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal, Costa Rica. ybadilla@itcr.ac.cr (autor para la correspondencia; <https://orcid.org/0000-0002-6743-9734>); olmuga@yahoo.es (<https://orcid.org/0000-0003-3213-8867>).

temperatura fue negativa. Se concluye que una frecuencia cada 14 días y arreglos de siembra de 10x10 cm*1/2 y 10x5 cm, promueven una mayor productividad de brotes por planta madre del minijardín clonal.

Palabras clave: Teca, silvicultura clonal, propagación vegetativa, productividad, clones.

Abstract

T. grandis is one of the most planted species in Costa Rica thanks to its high value in the international market. This has motivated the improvement and optimization of production. The research evaluated the effect of 3 harvesting frequencies and 5 spatial seeding patterns in clonal teak mini gardens in San Carlos, Costa Rica, during 9 continuous production cycles. A factorial design (3x5) was established to evaluate harvest frequency every 10, 12 and 14 days (factor A) and 5 spatial seeding patterns (factor B) with 4 replications (genotypes). The analysis of variance and Tukey's test ($\alpha=0.05$) showed significantly different values for the 10x10 cm*1/2, 10x5 cm and 7x5 cm patterns with 0.90, 0.88 and 0.86 shoots mother plant⁻¹ respectively, in relation to the 10x10 cm*2 spatial seeding patterns, which presented a low average per harvest of shoots mother plant-1 (0.77). The 7x5cm patterns recorded an average of 247 shoots m⁻² per harvest as the highest production. A linear model was used to explain the influence of spatial seeding patterns, density, frequency, relative humidity (%), temperature and radiation on sprouting rate, which showed positive correlations with all variables except plant density. Within the model, frequency and radiation showed a positive relationship with productivity, while temperature was negative. It is concluded that a frequency every 14 days and planting patterns of 10x10 cm*1/2 and 10x5 cm, promote a higher productivity of shoots per mother plant of the clonal mini garden.

Key words: Teak, clonal forestry, vegetative propagation, productivity, clones.

Introducción

Tectona grandis se planta a gran escala en los trópicos (Tamarit-Urias et al., 2019), principalmente por su alto valor de mercado y la madera de alta calidad (Monsalve-

Paredes & Bello-Alarcón, 2020). Para el 2010 en Latinoamérica se estimó alrededor de 278000 hectáreas plantadas (Vaides López et al., 2019). La mayoría de las plantaciones de teca en la región fueron establecidas por inversionistas cautivados por el alto precio de la madera, que oscila entre los \$300 y \$1650 dólares por metro cúbico de trozas para aserrío (FAO, 2009; Polo Santos et al., 2017). En Costa Rica, *T. grandis* representa aproximadamente un 60% del área total plantada en el país (Meza et al., 2019), con un estimado de 33000 hectáreas. Dentro de la balanza comercial del país, las exportaciones de teca, en rollo generaron un ingreso de \$17 millones en el 2020 (Barrantes & Ugalde, 2020; ONF, 2021).

Con el propósito de aumentar la productividad y competitividad del cultivo de la teca y la melina en el país, se inician esfuerzos de mejoramiento genético desde los años 80 (Murillo et al., 2017; Resende et al., 2018), que se consolidan a partir del 2002 mediante un programa cooperativo y enfocado en silvicultura clonal (Badilla & Murillo, 2011) denominado GENFORES. Este programa ha desarrollado un paquete tecnológico para la producción de plantas que ha sido adoptado con éxito a nivel operativo por las empresas forestales de la región, con énfasis en teca y melina (Hernández-Castro et al., 2021).

Como parte esencial del paquete tecnológico de la silvicultura clonal, se ha venido desarrollando un sistema productivo en ambiente protegido, capaz de producir durante todo el año. El sistema se basa en el establecimiento de un minijardín clonal, constituidos por plantas madre que provienen de árboles plus o genéticamente superiores, que recibe un manejo intensivo para producir y abastecer al mercado de plantas de la más alta calidad genética (Espitia et al., 2011). Brasil inició con la producción de plantas de eucalipto en ambiente protegido desde finales de los años 70 (Zobel & Talbert, 1984), con el fin de optimizar los procesos de propagación clonal a escala comercial. Con el objetivo de aumentar la tasa de multiplicación y disminuir costos de producción masiva de plantas de genotipos superiores, provenientes de programas avanzados de mejoramiento (MADR et al., 2009; Rojas Parajeles & Abdelnour Esquivel, 2012; Santos et al., 2013).

Dentro del ambiente protegido en que se maneja un minijardín clonal se considera como elementos clave, los factores climáticos y ambientales, tales como la humedad relativa, temperatura, riego, nutrición, densidad de siembra e intervalos de cosecha, entre otros. Los cuales afectan significativamente el comportamiento y productividad del mini

jardín clonal (Badilla Valverde & Murillo, 2005; Badilla, 2014; Calderón-Ureña et al., 2019; Fajardo et al., 2016; Ventura & Pulgar, 1990). La planificación de cultivos necesita herramientas que faciliten la toma de decisiones para la sostenibilidad del sistema, lo que incluye la producción de plantas de la mejor calidad (Castañeda & Potes, 2019). Los modelos matemáticos incluyen variables y parámetros que permiten estimar la producción o la cosecha esperada de los cultivos (Rodríguez-González et al., 2018). Cuyo análisis posibilita establecer correlaciones de estas variables, para conocer la dinámica del cultivo y su relación con el ambiente (López-Cruz et al., 2005).

Diferentes investigaciones en *T. grandis* han demostrado el efecto de la densidad de siembra en la producción de brotes en minijardines clonales. En Brasil, espaciamientos reducidos de 5*5 cm, disminuye hasta 0,48 brotes por planta madre. Sin embargo, colectivamente se logra una mayor producción de brotes por metro cuadrado, de hasta 190 brotes (Badilla, 2014). No obstante, estos arreglos espaciales de siembra de densidad alta requieren de cosechas más frecuentes, debido a la competencia por nutrientes y agua (Murillo et al., 2013; 2017). En contraste, con distanciamientos de 10x10 cm, 10x5 cm y 10x7,5 cm se ha reportado una producción de 63, 108 y 83 brotes por metro cuadrado respectivamente (Badilla, 2014). En *Solanum tuberosum* var en sistemas aeropónicos se reportó el efecto de la densidad de siembra en la producción final y en la regulación del intervalo de cosechas (Martínez & Soust, 2018). En *Opuntia ficus-indica* Mill se registró una clara dependencia con la densidad de siembra, que afectó el rendimiento y frecuencia de cosecha (Dubeux et al., 2006).

Para garantizar calidad y productividad de los minijardines clonales, se debe conocer el tiempo de respuesta que poseen las plantas madre en la producción de brotes, para asegurar un buen manejo y producción de esquejes (Machacuay & Llancari, 2020; Singh et al., 2006). Un ajuste en la densidad de siembra es una de las medidas más eficaces para maximizar el rendimiento (Xu et al., 2017). Esta investigación tuvo como objetivo, determinar el efecto de la frecuencia de cosecha y de arreglos espaciales de siembra en la productividad de minijardines clonales de *Tectona grandis* (L.F), dentro de un ambiente protegido en San Carlos, zona norte de Costa Rica.

Metodología

Descripción de sitio y del ambiente protegido

El estudio se realizó en el invernadero de investigación de la Cooperativa Internacional de Mejoramiento Genético Forestal (GENFORES), ubicado dentro del campus regional del Instituto Tecnológico de Costa Rica, en San Carlos, zona norte del país. Cuyas coordenadas son 10° 21 '39.28'' Latitud Norte y 84° 30' 28.72'' Longitud Oeste a una elevación de 167 msnm (IMN, 2021) en la zona de vida Bosque Muy húmedo Tropical (Holdridge, 1982). Esta región presenta un promedio de precipitación de 3200 mm anuales, con la mayor precipitación entre los meses de mayo a enero, con una disminución, no menor a los 50 mm por mes, durante los meses de febrero a abril. Mientras que la temperatura promedio anual es de 25°C; con valores más altos durante los meses de marzo a junio y los más bajos entre diciembre a febrero (IMN, 2014).

El ambiente protegido utilizado tenía una altura máxima de 5m, con una cobertura de polietileno transparente en el techo y paredes con tratamiento ultravioleta, serán como sombra al 60% ubicado en el techo y paredes hasta una altura de 3 metros sobre el nivel del suelo, que lograron mantener una temperatura promedio de 35°C, con valores máximos de 43°C y una humedad relativa entre 80% y 90% (Badilla, 2014; Murillo et al., 2017).

El minijardín está constituido por bancales de 1,2 metros de ancho por 7 metros de largo y 20 centímetros de altura, con paredes formadas por bloques de cemento de 12 centímetros de ancho por 20 centímetros de altura y 40 centímetros de largo. Se utilizó un sistema de fertirriego automatizado, con cinta por goteo con orificios distanciados cada 20 centímetros. Se empleó una bomba (1 atmósfera de presión) para impulsar el agua o solución hidropónica a través de una tubería que alimenta cada cama en el sistema (Murillo et al., 2017). El sustrato de los bancales se compuso de polvo de piedra, que consiste en un material triturado para obtener diversas partículas con tamaños menores a 1 cm (Pérez, 2012). El bancal se rellenó y se niveló, se desinfectó por medio de un fungicida 15 días previo a la siembra de las plantas madre para el estudio.

Las plantas para el establecimiento del ensayo se obtuvieron mediante el protocolo de propagación vegetativa que utiliza GENFORES. Consiste en la colecta de brotes de una longitud promedio de 3 centímetros, se les realiza una reducción del área foliar a un

1/4 de su tamaño original. Para enraizar a cada mini estaca se le aplicó en la base AIB en polvo al 3% y se introdujo en pellets de 36 mm de diámetro por 45 mm de altura rellenos de turba. Posteriormente se colocaron durante 15 días en el área de enraizamiento, con un sistema de riego por nebulización, a una frecuencia de 15 minutos por un período de 35 segundos, de 8am a 4pm. Con estas condiciones se mantuvo una temperatura promedio de 30°C y 90% de humedad relativa promedio (Badilla, 2014).

Manejo del minijardín clonal

Para el manejo del ensayo se utilizó el protocolo empleado por GENFORES en la producción de plantas, que corresponde a un régimen de fertirriego donde se aplica 5 minutos de agua para humedecer el sustrato, 15 minutos la solución nutritiva y por último 5 minutos de agua para el lavado del sistema. Este procedimiento se realiza 3 veces por semana (lunes, miércoles y viernes) con una solución hidropónica con elementos mayores en concentraciones de 5% en nitrógeno (N), fósforo (P_2O_5) y potasio (K_2O), un 2% de calcio (Ca) y 83% en diluyente y regulador de pH e inertes y elementos menores en magnesio (MgO) en 30.000 ppm, azufre (S) en 26.100 ppm, boro (B) en 1.000 ppm, hierro (Fe) en 1.000 ppm, manganeso (Mn) en 500 ppm, zinc (Zn) en 300 ppm, cobre (Cu) en 200 ppm, molibdeno (Mo) en 50 ppm y 94% en diluyente y regulador de pH e inertes.

Diseño Experimental

Se estableció un ensayo de arreglos espaciales de siembra con un diseño factorial (3x5) donde se evaluaron tres frecuencias de cosecha y cinco arreglos espaciales de siembra con cuatro repeticiones (genotipos).

Las frecuencias de cosecha evaluadas fueron periodos de 10, 12 y 14 días. Mientras que los cinco arreglos espaciales de siembra fueron 10x10 cm ($n=100\text{ m}^{-2}$), 10x10 cm con 2 plantas por hoyo ($n=200\text{ m}^{-2}$), 10x5 cm ($n=200\text{ m}^{-2}$), 7x5cm ($n=285\text{ m}^{-2}$) y 10x10 cm con planta adicional en el medio ($n=145\text{ m}^{-2}$). En este último tratamiento se tomó en cuenta la presencia de las líneas o cintas de riego, distribuidas en medio de cada dos líneas de plantas. Lo cual redujo a 45 plantas adicionales por metro cuadrado.

Como repetición se utilizó 4 genotipos élite, con lo cual, cada repetición fue un lote monoclonal. La unidad experimental consistió en 20 plantas por tratamiento en cada repetición. Para los arreglos (tratamientos) 10x10 cm, 10x5 cm y 7x5 cm las plantas se distribuyeron en 5 líneas con 4 plantas de ancho. El tratamiento 10x10cm*2 plantas por

hoyo, se utilizó la misma distribución de 5 x 4 líneas de plantas, pero ahora con 40 unidades o doble planta por hoyo. Para el tratamiento 10x10cm*1/2 en el arreglo espacial con planta en el medio se utilizó entre 24 a 28 plantas dependiendo de la distribución de las líneas de riego. (Cuadro 5).

Cuadro 5. Diseño factorial para la evaluación de frecuencias y arreglos espaciales de siembra en la producción del minijardín clonal de *T. grandis*, San Carlos, Costa Rica.

		Factor B	b1	b2	b3	b4	b5
		(Arreglo espacial de siembra cm)	10x10	10x10*2	10x10*1/2	10x5	7x5
Factor A	a1	10	a1b1	a1b2	a1b3	a1b4	a1b5
(Frecuencia de cosecha días)	a2	12	a2b1	a2b2	a2b3	a2b4	a2b5
	a3	14	a3b1	a3b2	a3b3	a3b4	a3b5

La cosecha de los brotes del estudio se inició a los 2,5 meses de sembradas las plantas madre, para asegurar que ya habían alcanzado su madurez de producción de brotes. La cosecha se realizó de manera continua durante 4 meses, de acuerdo con las frecuencias de cada cosecha. Se realizó 3 colectas continuas de datos para cada una de las tres frecuencias evaluadas. De cada cosecha se colectó todos los brotes funcionales para producción (Badilla & Murillo, 2005). Cada cosecha se cuantificó por frecuencia, repetición y arreglo espacial de siembra, para finalmente calcular la cantidad de brotes por planta madre.

Análisis de los datos

El estudio estableció como variables de respuesta la tasa de producción de brotes por planta madre y la producción de brotes por metro cuadrado. De manera adicional, se correlacionó las variables de respuesta con variables climáticas, tales como temperatura (°C), humedad relativa (%) y radiación solar, así como con la frecuencia de cosecha, tipo de arreglo espacial de siembra y número de plantas madre. Los datos climáticos se obtuvieron de la estación meteorológica más cercana (campus del Tecnológico) de la red del Instituto Meteorológico Nacional. Se tomó el valor promedio diario de la radiación a través de las horas luz de 7:00 am a 5:00 pm. Para los datos de temperatura y porcentaje de humedad relativa, se tomó el promedio diario de los datos tomados cada 30 minutos

por el sensor Hobo Pro V2 con una capacidad de memoria de 21000 medidas y una precisión de $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ ubicado dentro del invernadero.

El procesamiento de la información se hizo por medio de la hoja electrónica Excel 365 e InfoStat (IS) versión 2020. Se realizó la comprobación de los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas previo al ANDEVA ($p < 0,05$). Al verificarse los supuestos y encontrarse diferencias entre los tratamientos, se aplicó la prueba Tukey de comparación múltiple, para analizar las diferencias entre los tratamientos evaluados.

Con las variables de respuesta, las variables climáticas y las de producción, se procedió a realizar un análisis de regresión mediante el ajuste de un modelo lineal múltiple con apoyo del InfoStat (IS). Se procedió inicialmente a verificar los supuestos de no colinealidad, linealidad, independencia de las variables, homocedasticidad y normalidad de los datos. El análisis de correlación se utilizó de previo para determinar el orden de prioridad de cada variable dentro del modelo. Se utilizó una significancia de $p < 0,05$.

Para seleccionar los factores que ejercen mayor influencia en la variable dependiente, se utilizó el método paso a paso (*stepwise*). Con la matriz de correlación de Pearson (Cuadro 8), se determinó el orden de prioridad de entrada de cada variable. Para incluir el factor del arreglo espacial de siembra al modelo, se construyó una matriz de variables dicotómicas (Cuadro 6). Finalmente, para validar el modelo se tomó una muestra independiente del 10% de la base de datos total.

Para la construcción y ajuste de los parámetros del modelo se utilizó como criterios de selección el coeficiente de determinación (Guerra et al., 2003) y el de correlación de Pearson, que señala la dirección de la asociación lineal entre las variables e indica la fuerza con que se vinculan (Lalinde et al., 2018).

Cuadro 6. Matriz dicotómica para analizar el valor cualitativo del arreglo espacial de siembra en el modelo lineal de regresión múltiple.

Variable ficticia	Arreglo espacial de siembra (cm)				
		10x10*1/2	10x10*2	10x5	7x5
Z1	10x10*1/2	1	0	0	0
Z2	10x10*2	0	1	0	0

Z3	10x5	0	0	1	0
Z4	7x5	0	0	0	1

*Para la categoría de referencia se tomó el arreglo espacial 10x10 centímetros.

Resultados

1. Efecto de la densidad de siembra y frecuencia de cosecha

En la comparación de medias entre los factores productivos, se obtuvo diferencias altamente significativas entre los tratamientos de ambos factores (Frecuencia de Cosecha y Arreglo Espacial), así como entre las repeticiones y las interacciones entre los Factores.

Cuadro 7. Frecuencia de Cosecha y Arreglo Espacial en la productividad de minijardines clonales de *T. grandis*, San Carlos, Costa Rica.

Fuente de Variación	Valor de p	
	Tasa brotadura (Brote/planta)	Producción de brotes por área (m ²)
Frecuencia de Cosecha	<0,0001**	<0,0001**
Arreglo Espacial de siembra	0,0007**	<0,0001**
Frecuencia Cosecha*Arreglo Espacial	0,1222	<0,0001**
Repetición	0,0020**	0,0059**
Repetición*Frecuencia Cosecha	0,3077	0,3593
Repetición*Arreglo Espacial	0,1986	0,5747
Error	4,5x10-3	128.98

Modelo: $Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \delta_{ij} \varepsilon_{ijk}$

**p>0.99

Con el análisis de varianza se pudo determinar que los factores Frecuencia de Cosecha, Arreglos Espaciales de siembra y la interacción (Frecuencia Cosecha*Arreglos Espaciales) influyeron significativamente en la producción de brotes por planta madre y en el número de brotes por metro cuadrado (Cuadro 7). Se observó también una marcada diferencia significativa entre las repeticiones, debido a que esta investigación estaba constituida por genotipos distintos.

La prueba de comparación múltiple demostró que cada frecuencia de cosecha evaluada fue significativamente diferente con respecto a las demás, con valores de brotes por planta madre de 0,67 brotes para cada 10 días, 0,75 brotes para cada 12 días y 1,12 brotes para cada 14 días. Del análisis se demostró que la frecuencia de cosecha de 14 días permite la recuperación de las plantas madre y la capacidad de producir al menos un brote nuevo. Para la variable producción de brotes por metro cuadrado, se observó el mismo comportamiento con una mayor producción para la frecuencia de cosecha cada 14 días, con un total de 211 brotes, seguido de 140 brotes para cada 12 días y finalmente 123 brotes si se cosecha cada 10 días.

Con los arreglos espaciales de 10x10 cm con planta en el medio, 10x5 cm y 7x5 cm, se registró una tasa de brotadura de 0,90; 0,88 y 0,86 brotes por planta respectivamente, sin encontrar diferencias significativas entre ellos. Sin embargo, si fueron significativamente diferentes al arreglo espacial 10x10 cm con dos plantas por hoyo, con 0,77 brotes por planta, como el valor más bajo de todos.

Con relación a la producción de brotes por metro cuadrado, todos los arreglos espaciales de siembra evaluados presentaron diferencias significativas entre sí. De manera descendente, se registró 246 para el 7x5 cm, 175 para el 10x5 cm, 154 para el 10x10 cm con dos plantas por hoyo, 130 para el 10x10 cm con planta en el medio, y 81 brotes para el 10x10 cm.

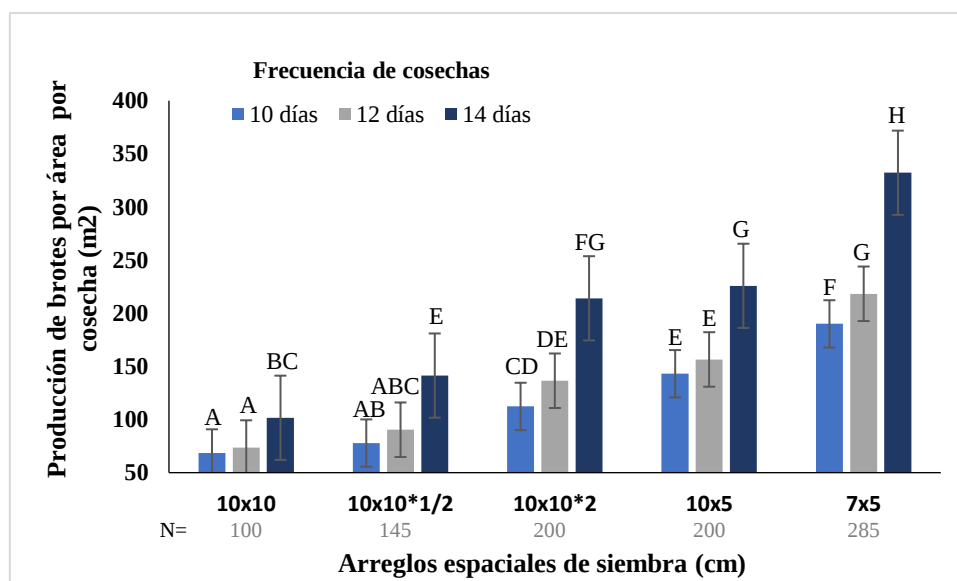


Figura 5. Producción de brotes por metro cuadrado en minijardines clonales de *T. grandis*, en función de la frecuencia de cosecha y del arreglo espacial de siembra, San Carlos, Costa Rica. N= densidad de siembra por metro cuadrado.

Del análisis se obtuvo diferencias significativas en la interacción entre las frecuencias de cosecha y los arreglos espaciales de siembra (Figura 5). El rendimiento más alto correspondió al arreglo 7x5 cm con una cosecha cada 14 días, con 332 brotes por metro cuadrado, que resultó estadísticamente diferente al resto de las combinaciones. Este resultado superó en un 47% y en un 52% a los dos siguientes mejores resultados que fueron el arreglo espacial 10x5 cm y 7x5 cm con frecuencias de 14 y 12 días, con una producción de 225 y 218 brotes respectivamente. Mientras que los rendimientos más bajos correspondieron con la frecuencia de cosecha de 10 y 12 días y, los arreglos espaciales de 10x10 cm y 10x10 cm con planta en el medio, con valores por metro cuadrado de 68 a 77 brotes respectivamente.

2. Relación de variables climáticas y silvícolas en la producción de brotes por planta madre

El ajuste del modelo consistió en ajustar la mejor función que explique la nube de puntos y que demuestre el comportamiento de la producción de brotes por planta madre, en función de las variables climáticas y de manejo (Vargas Sabadías, 1995; Walz, 2015).

Análisis de regresión múltiple

Con el propósito de determinar las variables con alguna asociación con la producción del minijardín clonal, se muestra en el cuadro 8 los resultados de la matriz de correlaciones de Pearson entre el grupo de variables investigadas. Esta matriz mostró que la tasa de brotes y el número de brotes tuvieron correlaciones significativas y positivas con la frecuencia de cosecha y la humedad relativa. Y el número de brotes se asoció positivamente con la densidad de siembra. Por otra parte, la tasa de brotadura se correlacionó negativa y significativamente con la temperatura (°C). Finalmente, la frecuencia de cosecha se registra significativa y positivamente asociada con una mayor humedad relativa, pero negativamente asociada a las altas temperaturas.

Cuadro 8. Análisis de correlación para el modelo lineal de regresión múltiple, para predecir la tasa de brotadura en minijardines clonales de teca en función de variables productivas y climáticas, San Carlos, Costa Rica.

	Tasa brot	N brotes	Densidad siembra	Frecuencia	HR (%)	Radiación (W/m²)	T (°C)
Tasa brot	1						
N brotes	0,71	1					
Densidad siembra	-0,14	0,56	1				
Frecuencia	0,67	0,49	-0,07	1			
HR (%)	0,51	0,38	-0,06	0,74	1		
Radiación	0,10	0,09	0,03	-0,21	-0,27	1	
T	-0,39	-0,31	0,02	-0,46	-0,75	-0,21	1

Con base en los resultados de la matriz de correlaciones se procedió a ajustar el mejor modelo de predicción posible, tal y como se muestra en el cuadro 9.

Cuadro 9. Análisis de varianza del modelo lineal de regresión múltiple para predecir la tasa de brotadura en minijardines clonales de teca en función de variables productivas y climáticas, San Carlos. Costa Rica.

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>	<i>Coeficiente de determinación ajustado (R²-aj)</i>	<i>Error típico</i>	<i>Porcentaje de sesgo</i>
Regresión	3	80,49	1996,52	9,26x10 ⁻²⁰⁶	0,94	0,20	4,15
Residuos	321	0,04					
Total	324						
Modelo <i>Tasa de brotadura= 0,11*Frecuencia-0,03*Temperatura+0,38*Radiación</i>							

Tasa de brotadura: producción de brotes por planta madre.

Frecuencia: número de días entre la cosecha de brotes.

Temperatura: Temperatura (°C) promedio entre cosechas.

Radiación: Radiación solar (Wm⁻²) promedio (de 7:00 am-5:00 pm) entre cosechas.

Para determinar la influencia conjunta de más de una variable en la producción de brotes por planta madre, se construyeron 10 ecuaciones de regresión múltiple y por medio del método paso a paso, se eligió el modelo con las variables que influyeron estadísticamente en la variable dependiente.

Dentro del modelo, se muestra la relación de cada variable con respecto a la tasa de brotadura, donde se determinó que la tasa de brotadura está influenciada por la frecuencia de cosecha, la temperatura y la radiación solar. El modelo nos infiere que, para aumentar un brote por planta madre se debe aumentar la frecuencia de cosecha, disminuir 0,03 grados Celsius la temperatura y aumentar la radiación 0,38 watts.

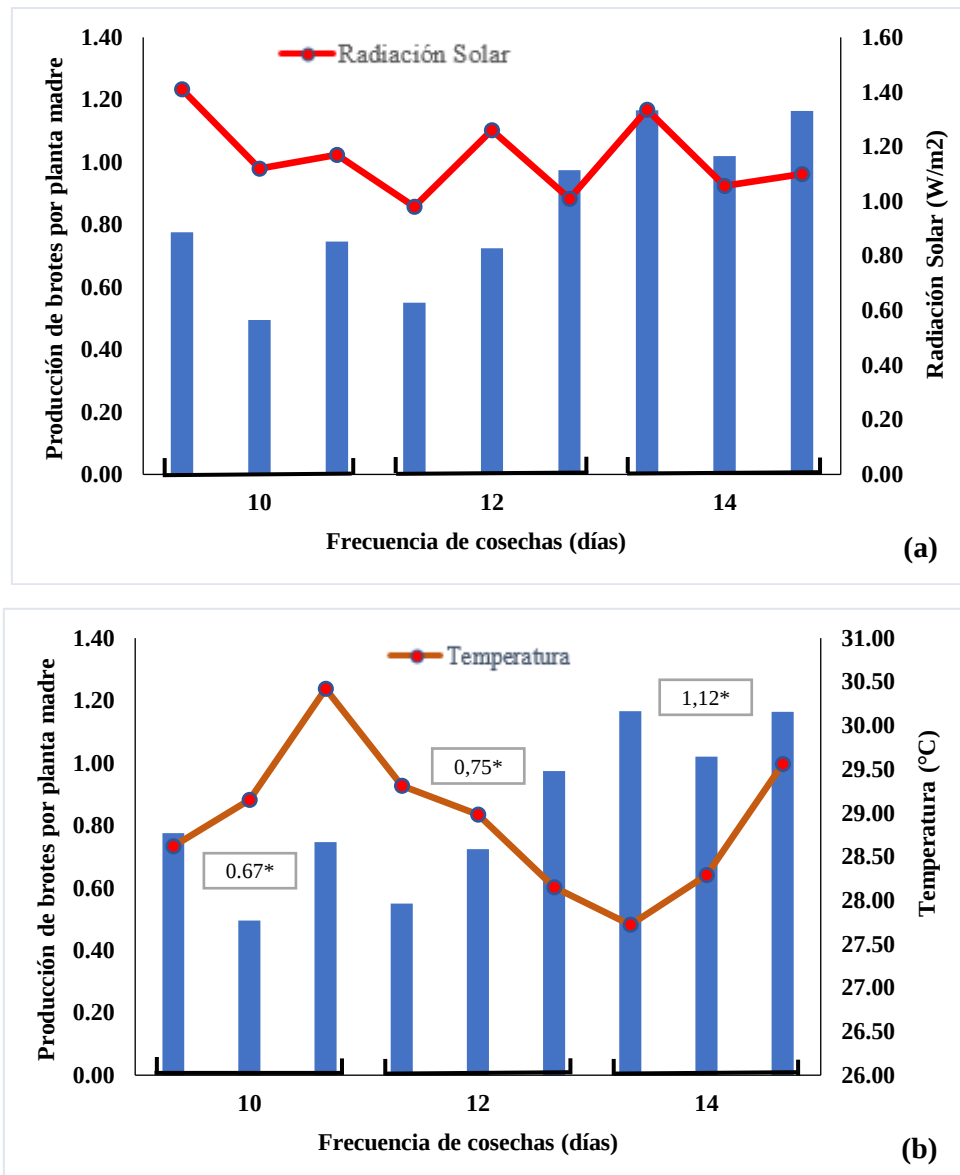


Figura 6. Producción de brotes por planta madre, en función de la radiación solar (a), la temperatura (b) en diferentes Frecuencias de Cosecha en minijardines clonales de *T. grandis*, San Carlos, Costa Rica. *Corresponde al valor promedio de brotes por planta madre por frecuencia de cosecha.

Puede observarse que mayor radiación, mayor tasa de producción de brotes por planta madre (Figura 6a). Sin embargo, la frecuencia de cosecha entre 10 y 12 días, bajo una radiación de 1,2 watts, presentaron un efecto negativo en la producción de brotes por planta madre. No obstante, este efecto parece ser temporal y se restablece al pasar a una frecuencia de cosecha cada 15 días. Por otro lado, a menor temperatura mayor tasa de producción de brotes por planta madre (Figura 6b).

En la frecuencia de cosecha cada 10 días se refleja la variación e inconsistencia en la producción (Figura 6), así como un efecto adverso en el vigor de las plantas del minijardín. Sin embargo, cuando las cosechas se dan cada 12 días la producción aumenta paulatinamente, inicia una recuperación en la respuesta de las plantas, que continuó en la frecuencia de cosecha de 14 días, con un aumento en la producción de brotes.

Discusión

1. Efecto de la densidad de siembra y frecuencia de cosecha

Los valores en la producción de brotes en el minijardín clonal mostraron un comportamiento ascendente conforme disminuye la frecuencia entre cosechas, que generó la mayor cantidad de brotes por planta madre y metro cuadrado a una cosecha cada 14 días. Este resultado concuerda con el resultado reportado por Murillo et. al (2013) que registraron una frecuencia de cosecha dos veces por mes para minijardines clonales de *T. grandis* en Costa Rica. Por otro lado, este valor es aceptable comparado con otras especies que reportaron la mayor cantidad de brotes por planta madre, a una frecuencia de cosecha cada 22 días en micropropagación de *Fraxinus excelsior* en Irlanda (Douglas et al., 2017), y en *Cordia trichotoma*, *Peltophorum dubium* y *Myrocarpus frondosus*, a una frecuencia de cosecha cada 60 días (Niella et al., 2014).

Los resultados obtenidos para la tasa de brotadura en el arreglo espacial de 10x10 cm con dos plantas por hoyo, demuestra como una alta competencia entre las plantas madre provocan una disminución en la producción de brotes por planta. Resultado similar se obtuvo en un estudio sobre crecimiento y productividad en *Solanum tuberosum* (Balena et al., 2021). Además, los valores en la producción de brotes por área muestran un comportamiento creciente conforme la densidad de siembra aumenta. Un resultado similar fue descrito por Mabapa et al. (2017) sobre plantaciones de campo de *Moringa oleífera*, donde demostró que una mayor densidad de siembra producía mayor cantidad de biomasa, sin importar las frecuencias de cosechas utilizadas (Mabapa et al., 2017). Mismo comportamiento fue reflejado en otro estudio sobre el efecto en la productividad a diferentes densidades de siembra en *Zea mays* en Brasil (Veloso et al., 2020).

Este estudio, demuestra que una densidad de siembra de 285 plantas (7x5 cm) por metro cuadrado a una frecuencia de cosecha cada 14 días promueve la mayor producción

de brotes por área. Un estudio en palma forrajera reafirma que al aprovechar un área disponible con la mayor cantidad de plantas efectivas para producción, y a un rango de intervención óptimo, potencia la producción por unidad de área (Lopes da Silva et al., 2019). En el sector productivo agrícola desde 1990, mencionan la conveniencia del uso de altas densidades de plantación al usar altas frecuencias de corte (Ventura & Pulgar, 1990). En plantaciones de *Gliricidia sepium* reportan la significancia entre la interacción frecuencia y densidad de siembra para aumentar la producción de biomasa (Clavero et al., 1999).

En esta investigación se determinó que existen diferencias significativas entre las repeticiones sobre la producción de brotes dentro del minijardín. Estas diferencias entre clones pueden ser explicados por la condición genética de cada genotipo. Este mismo resultado se obtuvo en un estudio en *T. grandis* utilizando diferentes clones bajo ambiente protegido, que mostró diferentes respuestas en el porcentaje de enraizamiento de los brotes (Badilla et al., 2016). Al utilizarse la técnica de micropropagación en *Gmelina arborea*, se observó, diferencias significativas en la tasa de inducción de brotes y porcentaje de enraizamiento entre familias y genotipos utilizados (Valverde-Cerdas et al., 2004). En *Eucalyptus pellita* F al comparar 2 clones, se demostró como uno de ellos superó en la capacidad de enraizamiento y formación de raíces (Sulichantini et al., 2014).

2. Relación de variables climáticas y silvícolas en la tasa de brotadura

En la matriz de correlación, la densidad de siembra presentó una asociación negativa con respecto a la tasa de brotadura. Resultado similar al reportado en *Ipomoea batatas* L Lamb, en que se determinó que al establecer menos plantas por unidad de área aumentó la producción, debido a que las plantas quedaban expuestas a una mayor radiación solar, menor competencia por agua y recursos nutricionales (Mercado Villar et al., 2019). No obstante, esta variable no fue significativa dentro del modelo inferencial.

Por otro lado, la humedad relativa (%) presentó una correlación alta con la tasa y el número de brotes, sin embargo, en el modelo de regresión no presentó influencia, posiblemente debido al fertirriego por goteo utilizado. Ya que, cuando la temperatura aumenta, el agua se convierte en vapor y permanece en el sistema como una constante. Autores mencionan, que la relación inversa entre la temperatura y la humedad no es un factor crítico en la producción, porque el fertirriego al ser dirigido en el sistema radicular,

permite que las plantas tengan la cantidad suficiente de agua y nutrientes para mantener sus funciones fisiológicas óptimas (Martínez-Ramírez, 2008; Wulf, 2021).

Los valores presentados en la evaluación del modelo mostraron que el porcentaje de sesgo obtenidos en la regresión lineal múltiple mostró ser un valor un aceptable. Aunque fuera del rango del 2% habitual para estos modelos (Jiménez González, 2012). Sin embargo, presentó un coeficiente de determinación alto. Coeficientes similares fueron reportados en modelos de aprendizaje automático utilizados para la predicción de rendimientos en cultivos agrícolas con valores entre 0,82-0,99 (García Arteaga et al., 2020).

Este modelo mostró que la tasa de brotadura está sujeta a las variables de frecuencia de cosecha, temperatura y radiación. Un estudio en *Zea mays* L. determinó que factores como la temperatura y la radiación presentaron una relación estrecha con el crecimiento y desarrollo de las plantas (Xu et al., 2017). La variable radiación fue la que presentó el coeficiente más alto. Esto puede ser explicado por el fotoperiodo, transformado en energía química a través de la fotosíntesis. Un comportamiento similar es explicado por el crecimiento en la concentración de saponinas en *Chenopodium quinoa* willd al mostrar un aumento en el fotoperiodo capturado como radiación y temperatura (García-Parra et al., 2018). Asimismo, en minijardines clonales de teca en Colombia, reportan que a mayor niveles de luz fotosintéticamente activa se produce mayor cantidad de mini estacas por unidad de área (MADR et al., 2009).

Para el caso de la temperatura, los datos mostraron un efecto inverso sobre la producción de brotes por planta madre. En un estudio de *Zea mays* L. factores como la temperatura y la radiación mostraron una relación estrecha con el crecimiento y desarrollo de las plantas (Xu et al., 2017). Un resultado similar fue reportado por Rodríguez & Vicet (2020) en una modelación realizada en pasto estrella (*C. nlemfuensis*) bajo diferentes escenarios climáticos, donde mostraron los efectos negativos sobre el rendimiento de materia seca acumulada, debido al aumento de la temperatura media y disminución de la radiación global (Rodríguez & Vicet, 2020).

El efecto adverso de una alta radiación solar sobre la producción de brotes por planta madre, puede deberse a que las plantas llegan a un nivel de saturación de radiación; como lo demostrado en un estudio sobre la dinámica de absorción de CO₂ en

Lycopersicon esculentum Mill. (tomate) bajo invernadero (Arellano, 2017). Un estudio realizado en *Agave tequilana* var mostró que al aumentar la dosis de radiación se disminuyó el número de brotes por plántula (Ángeles-Espino et al., 2013). Es evidente como influye el clima en la productividad de los cultivos. La literatura explica que en zonas donde existe estaciones bien marcadas, el rendimiento baja cuando se enfrenta a una helada y, la eficiencia aumenta cuando no existe estrés térmico, ya que desde el punto de vista metabólico no hay factores limitantes para la fotosíntesis (Herrera et al., 2017; Upadysheva, 2013).

Conclusiones

Una frecuencia de cosecha cada 14 días asegura la mayor cantidad de brotes por unidad de planta madre y por área.

Los arreglos espaciales de siembra que aseguran una mayor cantidad de brotes por planta madre son, 10x10 centímetros con planta en el medio y el arreglo de 10x5 centímetros.

Con la siembra de 285 plantas por metro cuadrado (7x5 cm), se alcanzó la mayor producción de brotes por área.

Existe una alta influencia de la radiación en la producción de brotes por planta madre.

Reconocimientos

Esta investigación formó parte del proyecto de investigación “Mejoramiento del paquete tecnológico de producción clonal en ambiente protegido de *Tectona grandis* y *Cordia alliodora*”, financiado por la Vicerrectoría de Investigación y Extensión, así como del trabajo de tesis de la Maestría en Ciencias Forestales de la Escuela de Ingeniería Forestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Referencias

- Ángeles-Espino, A., Valencia-Botín, A., Virgen-Calleros, G., Ramírez-Serrano, C., Paredes-Gutiérrez, L., & Hurtado-De la Peña, S. (2013). Determinación de la dosis letal (DL50) con Co60 en vitroplántulas de Agave tequilana var. Azul. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 36(4), 381–386. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-73802013000400003&script=sci_abstract&tlng=pt
- Arellano, J. (2017). *Efecto de las condiciones ambientales en la dinámica de absorción de CO2 en tomate de invernadero* [Universidad Autónoma de Querétaro]. <http://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/1161>
- Badilla Valverde, Y., & Murillo, O. (2005). Manejo de jardines clonales. In *Kurú: Revista Forestal (Costa Rica)* (Vol. 2, Issue 6). Editorial Tecnológica de Costa Rica. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5123227&info=resumen&idioma=SPA>
- Badilla, Y. (2014). *Clonagen de Tectona grandis Linn F. por estaquia e miniestaquia* [Universidad Federal de Vicos, Brasi]. <http://163.178.205.27:8080/xmlui/handle/123456789/56>
- Badilla, Y., & Murillo, O. (2005). Enraizamiento de estacas de especies forestales . *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 2(6), 1–6. <https://revistas.tec.ac.cr/index.php/kuru/article/view/538>
- Badilla, Y., & Murillo, O. (2011). Avances en el mejoramiento genético de la teca en GENFORES. *Conferencia Forestal Internacional: Bosques Plantados de Teca*.
- Badilla, Y., Xavier, A., Murillo, O., & De Paiva, H. N. (2016). IBA efficiency on mini-cutting rooting from teak (*Tectona grandis* Linn F.) clones. *Revista Arvore*, 40(3), 477–485. <https://doi.org/10.1590/0100-67622016000300011>
- Balena, L., Malanchuk, J. P., Tamanini Junior, C., Ribas, E. L., Eschemback, V., & Kawakami, J. (2021). Crescimento, produtividade e dormência de minitubérculos de batata produzidos por aeroponia em função da densidade de plantio e data de

- colheita. *Horticultura Brasileira*, 39(2), 161–168. <https://doi.org/10.1590/S0102-0536-20210206>
- Barrantes, A., & Ugalde, S. (2020). *Informe de usos y aportes de la madera en Costa Rica – Oficina Nacional Forestal (ONF)*. <https://onfcr.org/usos-y-aportes-de-la-madera-en-costa-rica/>
- Calderón-Ureña, F., Esquivel-Segura, E., & Acevedo-Tapia, M. (2019). Manejo nutricional y de riego en minijardines clonales de *Tectona grandis* (Linn. F) en la zona sur de Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 16(39), 43–52. <https://doi.org/10.18845/rfmk.v16i39.4427>
- Castañeda, L. N. R., & Potes, S. P. (2019). Estimación del rendimiento del cultivo de *Passiflora Edulis* (Maracuyá) a partir de modelos estadísticos. *INVENTUM*, 14(26), 33–42. <https://doi.org/10.26620/UNIMINUTO.INVENTUM.14.26.2019.33-42>
- Clavero, T., Razz, R., & Rodríguez-Petit, A. (1999). Efecto de la densidad de siembra y la frecuencia de corte sobre la producción de biomasa y energía bruta en *Gliricidia sepium*. *Revista de La Facultad de Agronomía*, 16(1), 226–230. https://www.revfacagronluz.org.ve/v16_s/v167z021.html
- Douglas, G. C., Namara, J. M., O’Connell, K., Dunne, L., & Grant, J. (2017). *Vegetative propagation of dieback-tolerant Fraxinus excelsior on*. Swedish University of Agricultural Sciences. <https://t-stor.teagasc.ie/handle/11019/1225>
- Dubeux, J. C. B., dos Santos, M. V. F., de Andrade Lira, M., dos Santos, D. C., Farias, I., Lima, L. E., & Ferreira, R. L. C. (2006). Productivity of *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller under different N and P fertilization and plant population in north-east Brazil. *Journal of Arid Environments*, 67(3), 357–372. <https://doi.org/10.1016/J.JARIDENV.2006.02.015>
- Espitia, M., Murillo, O., & Castillo, C. (2011). Ganancia genética esperada en teca (*Tectona grandis* L.F.) en Córdoba (Colombia). *Colombia Forestal*, 14(1), 81. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2011.1.a07>
- Fajardo, E., Rodríguez, N., Bernal, R., Benítez, D., & Rivera, A. (2016). Sustrato y sistema de riego óptimos para la producción de tomate bajo condiciones de

- invernadero. *I3+*, 3(1), 72. <https://doi.org/10.24267/23462329.162>
- FAO. (2009). The future of teak and the high-grade tropical hardwood sector. *Planted Forests and Trees Working Papers (FAO)*. <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=XF2009440935>
- García-Parra, M., Plazas-Leguizamón, N., Carvajal Rodríguez, D., Ferreira Torrado, S., & Parra, J. (2018). Descripción de las saponinas en quinua (“*Chenopodium quinoa*” willd) en relación con el suelo y el clima: Una revisión - Dialnet. *Informador Técnico*, 82(2), 241–249. <https://doi.org/10.23850/22565035.1451>
- García Arteaga, J. J., Zambrano Zambrano, J. J., Alcivar Cevallos, R., & Zambrano Romero, W. D. (2020). Predicción del rendimiento de cultivos agrícolas usando aprendizaje automático. *Revista Arbitrada Interdisciplinaria Koinonía*, 5(2), 144–160. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7672167&info=resumen&idioma=SPA>
- Guerra, C., Cabrera, A., & Fernández, L. (2003). Criteria for the selection of statistical models in scientific research. *Cuban Journal of Agricultural Science*, 37(1), 3–9. https://www.researchgate.net/publication/296629045_Criteria_for_the_selection_of_statistical_models_in_scientific_research
- Hernández-Castro, W., Badilla-Valverde, Y., Murillo-Gamboa, O. (2021). Estimación de parámetros genéticos de *Gmelina arborea* Roxb. (melina) en el Caribe de Costa Rica. *Uniciencia*, 35(1), 352–366. <https://doi.org/10.15359/RU.35-1.22>
- Herrera, R. S., Verdecia, D. M., Ramírez, J. L., García, M., & Cruz, A. M. (2017). Relación entre algunos factores climáticos y la composición química de *Tithonia diversifolia*. *Cuban Journal of Agricultural Science*, 51(2).
- Holdridge, L. (1982). *Ecología basada en zonas de vida* (H. Jiménez (ed.); IICA).
- IMN. (2014). *Clima en Costa Rica*. Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica. <http://www.imn.ac.cr/educacion/CLIMA DE COSTA RICA.html>
- IMN. (2021). *Estación Automática del TEC, Sede Santa Clara, San Carlos, Alajuela*.

Condiciones Actuales Del Tiempo.
<https://www.imn.ac.cr/especial/estacionStaClara.html>

Jiménez González, R. (2012). *Estadística Inferencial II*. www.academia.edu.
https://www.academia.edu/8137314/Estadística_Inferencial_II

Lalinde, H., Diego, J., Castro, E., Rangel, C., Gerardo, J., Sierra, T., Andrés, C., Torrado, A., Karina, M., Sierra, C., Milena, S., Pirela, B., & José, V. (2018). Sobre el uso adecuado del coeficiente de correlación de Pearson: definición, propiedades y suposiciones. *Archivos Venezolanos de Farmacología y Terapéutica*, 37(5), 587–601. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?>

Lopes da Silva, A., Batista de Sousa, D., Sousa Amorim, D., da Silva Santos, M., Balduino da Silva, K., & Rodrigues do Nascimento, R. (2019). Caracterização morfológica, frequência de colheita e ensilagem de palma forrageira: Uma revisão. *Nucleus Animalium*, ISSN-e 2175-1463, Vol. 11, Nº. 1, 2019, Págs. 13-24, 11(1), 13–24. <https://doi.org/10.3738/21751463.2958>

López-Cruz, I. ., Ramírez-Arias, A., & Rojano-Aguilar, A. (2005). Modelos matemáticos de hortalizas en invernadero: trascendiendo la contemplación de la dinámica de cultivos. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 11(2), 257–267. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=60911211>

Mabapa, M. P., Ayisi, K. K., & Mariga, I. K. (2017). Effect of Planting Density and Harvest Interval on the Leaf Yield and Quality of Moringa (*Moringa oleifera*) under Diverse Agroecological Conditions of Northern South Africa. *International Journal of Agronomy*, 2017, 9. <https://doi.org/10.1155/2017/2941432>

Machacuay, A., & Llancari, Y. M. (2020). Efecto de dosis de nitrógeno sobre la producción de estaquillas de *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla* en jardín clonal. *Revista Forestal Del Perú*, 35(3), 5–17. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.21704/rfp.v35i3.1597>

MADR, CONIF, & refocosta. (2009). *Propagación vegetativa de la Teca (Tectona grandis L.f) por el método de miniestacas*. Imageprinting Ltda.

Martínez-Ramírez, J. N. (2008). *Uso de diferentes cubiertas plásticas en invernaderos*

- para mejorar los efectos de radiación, temperatura y humedad relativa [Centro de Investigación de Química Aplicada].
<https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1025/593>
- Martínez, K., & Soust, G. (2018). *Análisis del efecto de densidad de siembra en la producción de semilla prebásica de papa (Solanum tuberosum var. Chieftain) bajo sistema aeropónico de producción*. Universidad de la República.
- Mercado Villar, L., Barrera Violeth, J., & Romero Ferrer, J. (2019). Crecimiento y rendimiento de dos genotipos de batata (*Ipomoea batatas* L Lamb) bajo el efecto de tres densidades de siembra. In J. L. Hernández Burgos (Ed.), *Sistema de siembra y uso eficiente de recursos* (Vol. 1, pp. 23–47). CECAR.
- Meza, V., Alfaro, K., Bedoya, R., Romero, M., Valerio, Adriana, & Montenegro. (2019). *Reforestación comercial en Costa Rica Regiones Huetar Atlántica, Huetar Norte y Chorotega*. https://www.fonafifo.go.cr/media/2976/reforestacion_comercial.pdf
- Monsalve-Paredes, M., & Bello-Alarcón, A. (2020). Evaluación antimicrobiana de extractos obtenidos de los residuos de la corteza de Teca (*Tectona grandis* L.f). *CIENCIA UNEMI*, 13(32), 63–68.
<http://ojs.unemi.edu.ec/index.php/cienciaunemi/article/view/935>
- Murillo, O., Badilla-Valverde, Y., Villalobos, M., & Rojas-Parajeles, F. (2013). *Optimización de la tecnología de propagación vegetativa in vivo y plantación de teca y pilón*.
https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/3243/optimizacion_tecnologia_propagacion_vegetativa_in_vivo.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Murillo, O., Espitia, M., & Castillo, C. (2017). *Conceptos del mejoramiento genético forestal*.
- Niella, F., Rocha, S., Eibl, B., Schoffen, C., Martinez, M., Conti, P., Franco, M., & Ayala, L. (2014). Propagación clonal de *Peltophorum dubium* (caña fistola), *Myrocarpus frondosus* (incienso), y *Cordia trichotoma* (peteribi) para su conservación y domesticación. *Revista Yvyrareta*, 21, 44–50.
<https://hdl.handle.net/20.500.12219/2693>

- ONF. (2021). *Balanza Comercial y Tendencias de las Exportaciones e Importaciones de madera y muebles de madera en Costa Rica, estadísticas 2020*. Oficina Nacional Forestal. <https://onfcr.org/balanza-comercial-y-tendencias-de-las-exportacione-2>
- Pérez, E. A. (2012). *Georecursos y su uso en Costa Rica*.
- Polo Santos, J. M., Suarez Padrón, I. E., & Gatti, K. C. (2017). Micropropagación de *Tectona grandis* L. f. a partir de meristemas preexistentes. *H.A.A. Temas Agrarios*, 18(2), 83–93. <https://repositorio.unicordoba.edu.co/handle/ucordoba/785>
- Resende, M., Murillo, O., & Badilla, Y. (2018). *Genética cuantitativa y selección en el mejoramiento forestal*. Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Rodríguez-González, O., Florido-Bacallao, R., & Varela-Nualles, M. (2018). Aplicaciones de la modelación matemática y la simulación de cultivos agrícolas en Cuba. *Cultivos Tropicales*, 39(1). http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362018000100018
- Rodríguez, J. L. L., & Vicet, R. L. (2020). Modelación y simulación del rendimiento del pasto estrella (*C.nlemfuensis*) bajo diferentes condiciones de manejo y escenarios climáticos. *AlfaPublicaciones*, 2(3), 21–42. <https://doi.org/10.33262/ap.v2i3.33>
- Rojas Parajeles, F., & Abdelnour Esquivel, A. (2012). Brotación in vitro de yemas de teca (*Tectona grandis* L. f.). *Revista Tecnología En Marcha*, 25(5), 67. <https://doi.org/10.18845/tm.v25i5.475>
- Santos, J. P., Suarez Padrón, I., & Gatti, K. C. (2013). Micropropagación de *Tectona grandis* L. f. A partir de meristemas preexistentes *Tectona grandis* L. f. Micropropagation from preexisting meristems. In *Julio-Diciembre* (Vol. 18, Issue 2).
- Singh, S., Bhandari, A. S., & Ansari, S. A. (2006). Stockplant Management for Optimized Rhizogenesis in *Tectona grandis* Stem Cuttings. *New Forests 2006 31:1*, 31(1), 91–96. <https://doi.org/10.1007/S11056-004-7361-9>
- Sulichantini, E. D., Sutisna, M., Sukartiningsih, & Rusdiansyah. (2014). Clonal Propagation of Two Clones *Eucalyptus pellita* F. Muell By Mini-Cutting.

International Journal of Science and Engineering, 6(2), 117–121.
<https://doi.org/10.12777/ijse.6.2.117-121>

Tamarit-Urias, J. C., De los Santos-Posadas, H. M., Aldrete, A., Valdez-Lazalde, J. R., Ramírez-Maldonado, H., & Guerra-De la Cruz, V. (2019). Sistema de crecimiento y rendimiento maderable para plantaciones de teca (*Tectona grandis* L. f.) en Campeche, México. *Madera y Bosques*, 25(3).
<https://doi.org/10.21829/myb.2019.2531908>

Upadysheva, G. Y. (2013). Stability of fructification of the cherry at cultivation on clonal stocks. *Horticulture and Viticulture*, 3, 35–39. <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=RU2013000389>

Vaides López, E., Alvarado Hernández, A., & Moya Fernández, R. (2019). Site characteristics that determine the growth and productivity of teak (*Tectona grandis* l. f.) of young plantations in Guatemala. *Agronomía Costarricense*, 43(1), 135–148.
<https://doi.org/10.15517/rac.v43i1.35684>

Valverde-Cerdas, L., Alvarado, L., & Hine, A. (2004). Micropropagation of clones from controlled crosses of *Gmelina arborea* in Costa Rica. *New Forests* 2004 28:2, 28(2), 187–194. <https://doi.org/10.1023/B:NEFO.0000040945.75019.38>

Vargas Sabadías, A. (1995). *Estadística descriptiva e inferencial* (II, Vol. 8). Universidad de Castilla-La Mancha. [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=RbaC-wPWqjsC&oi=fnd&pg=PA9&dq=Sabadías,+A.+V.+\(1995\).+Estadística+descriptiva+e+inferencial+\(Vol.+8\).+Univ+de+Castilla+La+Mancha.&ots=WR3s5EH7n0&sig=umgzry6wwt3KTFUOvMx3j0TMo0w#v=onepage&q=Sabadías%2C+A.+V.\(1995](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=RbaC-wPWqjsC&oi=fnd&pg=PA9&dq=Sabadías,+A.+V.+(1995).+Estadística+descriptiva+e+inferencial+(Vol.+8).+Univ+de+Castilla+La+Mancha.&ots=WR3s5EH7n0&sig=umgzry6wwt3KTFUOvMx3j0TMo0w#v=onepage&q=Sabadías%2C+A.+V.(1995)

Veloso, C. A. C., Carvalho, E. J. M., Silva, A. R., & Filho, A. S. (2020). Manejo de adubação fosfatada no cultivo do milho sob sistema plantio direto em diferentes densidades populacionais no Oeste do Pará. *Brazilian Journal of Development*, 6(10), 82499–82506. <https://doi.org/10.34117/BJDV6N10-616>

Ventura, J., & Pulgar, R. (1990). Efecto de la densidad de siembra y frecuencia de corte sobre los componentes de la producción y follaje de yuca *Manihot esculenta*, Crantz. *Revista de La Facultad de Agronomía Agronomía*, 7(4), 229–243.

https://www.revfacagronluz.org.ve/v07_4/v704z004.html

Walz, M. F. (2015). Programa de Estadística aplicada a la Biología: una propuesta. *Revista de Didáctica de Las Matemáticas*, 88, 17–29.
<http://www.sineuton.org/numeros>

Wulf, M. (2021). *Entendiendo el fertirriego* (A. Viedna & H. Avilés (eds.); 6th ed.). IOEDiciones.

Xu, W., Liu, C., Wang, K., Xie, R., Ming, B., Wang, Y., Zhang, G., Liu, G., Zhao, R., Fan, P., Li, S., & Hou, P. (2017). Adjusting maize plant density to different climatic conditions across a large longitudinal distance in China. *Field Crops Research*, 212, 126–134. <https://doi.org/10.1016/J.FCR.2017.05.006>

Zobel, B., & Talbert, J. (1984). *Applied forest tree improvement*. John Wiley & Sons.
<https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19840699048>

CAPÍTULO 3

GA₃ y BAP en la productividad de minijardines clonales de *Tectona grandis* Linn. F

Arantxa Rodríguez-Solís¹⁻², Yorleny Badilla-Valverde², Olman Murillo²

Resumen

Los reguladores de crecimiento facilitan la propagación y aumentan el rendimiento en la producción de plantas. La adición en diferentes cantidades determina una mayor efectividad en la regeneración celular. Por tanto, este estudio evaluó el efecto de varias dosis del GA₃ (ácido giberélico) y de la BAP (bencilaminopurina) en la productividad de minijardines clonales de teca en San Carlos, Costa Rica. Se estableció un ensayo con diseño factorial (2x4). Como factor (A) se utilizó al GA₃ y la BAP, mientras que como factor (B) las dosis 0, 5, 10 y 20 mg l⁻¹. El análisis de varianza y pruebas de comparación mostraron que el uso del GA₃ aumentó significativamente la producción y longitud de brotes. Mientras que, el BAP no presentó efectos significativos en la producción. La aplicación de 10 y 20 mg l⁻¹ de GA₃ aumentó la producción de brotes por planta madre de 1,02 como base a 1,47 y 1,50 aumentando la producción en un 44 y 47% respectivamente, en cosecha quincenal ordinaria, y 169 hasta 172 brotes por metro cuadrado correspondiente a un 38 y 33%. Al aplicar 5 mg l⁻¹ hasta 20 mg l⁻¹ de GA₃ se obtuvo brotes desde 4,19 a 4,44 cm de longitud. En la tasa de enraizamiento, las diferencias se presentaron en el GA₃ que demostró ser superior al BAP en un 49% para el enraizamiento diario medio, con una velocidad de 1,30 brotes por día. En conclusión, aplicar 10 mg l⁻¹ de GA₃ es suficiente para aumentar el rendimiento en la productividad de minijardines clonales de teca.

¹ Este trabajo formó parte de la tesis de maestría en Ciencias Forestales, Escuela de Ing. Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica, del primer autor, el cual fue financiado parcialmente por la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del Instituto Tecnológico de Costa Rica. arantxarodriguezs@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0003-2875-6435>)

² Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal, Costa Rica. arantxarodriguezs@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0003-2875-6435>); ybadilla@itcr.ac.cr (autor para correspondencia; <https://orcid.org/0000-0002-6743-9734>); olmuga@yahoo.es (<https://orcid.org/0000-0003-3213-8867>).

Palabras clave: Teca, ambiente protegido, mejoramiento genético, propagación vegetativa, reguladores de crecimiento.

Abstract

Growth regulators facilitate propagation and increase yield in plant production. Addition in different amounts determines greater effectiveness in cell regeneration. Therefore, this study evaluated the effect of various doses of GA₃ (gibberellic acid) and BPA (6-benzylaminopurine) on the productivity of clonal teak mini gardens in San Carlos, Costa Rica. A trial with a factorial design (2x4) was established. GA₃ and BAP were used as factor (A), while doses of 0, 5, 10 and 20 mg l⁻¹ were used as factor (B). The analysis of variance and comparison tests showed that the use of GA₃ significantly increased shoot production and shoot length. Besides, BPA had no significant effect on production. The application of 10 and 20 mg l⁻¹ of GA₃ increased the production of shoots per mother plant from 1.02 as base to 1.47 and 1.50 increasing the production by 44 and 47% respectively, in ordinary biweekly harvest, and 169 to 172 shoots per square meter corresponding to 38 and 33%. When 5 mg l⁻¹ to 20 mg l⁻¹ of GA₃ were applied, shoots from 4.19 to 4.44 cm in length were obtained. In the rooting rate, the differences were presented in GA₃ which proved to be superior to BAP by 49% for the average daily rooting, with a rate of 1.30 shoots per day. In conclusion, applying 10 mg l⁻¹ of GA₃ is sufficient to increase the productivity performance of clonal teak mini gardens.

Key words: Teak, greenhouse, tree improvement, vegetative propagation, growth regulators.

Introducción

Los reguladores de crecimiento han sido un componente importante en la producción de plantas (Davies, 2013). Las giberelinas, citoquininas y auxinas promueven un aumento y alargamiento de brotes reproductivos y vegetativos (Kong & Von Aderkas, 2004). Facilitan la propagación y aumentan considerablemente el rendimiento en la

producción de plantas, principalmente de cultivos *in vitro* (Alexandra & Dorica, 2020; Dutra et al., 2009).

Las giberelinas son fitohormonas vegetales que ayudan al desarrollo temprano de embriones, a la hiper elongación de tallo, maduración de polen, floración, desarrollo del fruto y expansión foliar, tanto *in vitro* como *ex situ* (Cardoso et al., 2012; Staden et al., 2008; Vale-Montilla, 2018). Las citoquininas como el 6-bencilaminopurina (BAP), ayudan a la formación de yemas, desarrollo de brotes, ampliación de hojas y cotiledones, mejoran el desarrollo reproductivo, la fotosíntesis y la senescencia (Aucapiña Criollo & López Peña, 2016; Mok & Mok, 1994; Staden et al., 2008). Por otro lado, la asociación de citoquininas y giberelinas en diferente concentración, determina un porcentaje de la efectividad en la regeneración de células caulinares (Alexandra & Dorica, 2020). Fitorreguladores como el GA₃, BAP y kinetinas han sido también utilizadas en inducción floral *in vitro* (Mohamed et al., 2018).

En *Chlorella pyrenoidosa*, se utilizó el ácido giberélico, el ácido indol-3-butírico, la kinetina, la 6-bencilaminopurina y el ácido 1-naftalenoacético, en concentraciones que iban de 2 mg l⁻¹ a 10 mg l⁻¹, de donde se determinó que la concentración de 4 mg l⁻¹ en BAP aumentó la biomasa y el rendimiento en la producción (Kokkiligadda et al., 2017). En plantas jóvenes de *Cinchona ledgeriana* la adición de GA₃ aumentó la altura y el tamaño de las hojas, mientras que la aplicación de BAP influyó fuertemente en el aumento del diámetro de tallo, número de hojas y contenido de clorofila (Maxiselly et al., 2021). En cultivos de *Solanum tuberosum* las citoquininas influyeron de manera positiva en la productividad del cultivo (Ahmed & Gebretensay, 2019).

En pináceas las más utilizadas para aumento en la producción de brote reproductivo, vegetativo y en su longitud apical fueron la giberelina cuatro más siete (GA_{4/7}), la bencilaminopurina (BAP) y el ácido naftalenacético (NAA-800) (Venegas-González et al., 2016). De un estudio realizado con plantas en vivero de *Swietenia macrophylla* King, resultó que aplicar giberelinas por aspersión aumentó la relación de área foliar, causado probablemente por un mayor desarrollo de su aparato fotosintético (Vale-Montilla, 2018). En un estudio de propagación *in vitro* de *Tectona grandis* en Cuba, se reportó que concentraciones de 2,22 µM de 6-BAP produce hasta 4 brotes por explante (Quiala Mendoza et al., 2014). En micropropagación *in vitro* de *T. grandis* en Costa Rica,

la aplicación de 10 mg l⁻¹ de benziladenina (BA), produjo la mayor cantidad de brotación de yemas en estacas provenientes del campo (Abdelnour & Muñoz, 2005).

En propagación *in vitro* es conocido, que para obtener una multiplicación y alargamiento de brotes de manera homogénea, es necesario la adición de giberelinas como el GA₃, aunque también se obtiene por varias combinaciones entre BAP, ANA, AIB y GA₃ (Dutra et al., 2009). Con lo cual se obtiene un aumento de la tasa de multiplicación (Santos et al., 2013). Debido al beneficio potencial del uso de estos fitorreguladores en la producción de plantas, combinado con el aumento del mercado de plantas clonadas para reforestación comercial en el país, debido a que se ha convertido en el sistema más eficiente y económico de producción clonal forestal a escala comercial (Badilla et al., 2016; Murillo et al., 2018; Xavier et al., 2013).

A pesar del amplio conocimiento del uso de reguladores de crecimiento en la propagación *in vitro* de especies forestales, no se cuenta con suficiente experiencia en su aplicación en condiciones de propagación *in vivo* o ambiente protegido; se planteó esta investigación, cuyo objetivo fue determinar el efecto del BAP y del GA₃, a diferentes dosis, en la productividad del minijardín clonal de *Tectona grandis* en ambiente protegido.

Metodología

Descripción de sitio

El estudio se realizó en los invernaderos de la Cooperativa Internacional de Mejoramiento Genético Forestal (GENFORES), ubicados en el campus Tecnológico de San Carlos, zona norte de Costa Rica, coordenadas 10° 21 '39,28'' Latitud Norte y 84° 30' 28,72'' Longitud Oeste, a una elevación de 167 m.s.n.m (Instituto Meteorológico Nacional, 2021). El sitio se ubica en la zona de vida Bosque Muy húmedo Tropical (Holdridge, 1982). Esta región presenta un promedio de precipitación de 3200 mm anuales, con el mayor registro de lluvia de mayo a enero. Durante la estación seca no se registra un mes (febrero a abril) con menos de 50 mm de lluvia. La temperatura promedio anual es de 25°C; con valores más altos durante los meses de marzo a junio y los más bajos entre diciembre a febrero (Instituto Meteorológico Nacional, 2014).

Descripción y manejo del ambiente protegido

El ambiente protegido fue construido con una cobertura en el techo y paredes de polietileno transparente con tratamiento ultravioleta, y serán al 60% ubicado a 3 metros sobre el nivel del suelo, para dar un efecto de sombra y mantener una temperatura promedio de 30-35°C y una humedad relativa entre 80% y 90% (Badilla, 2014; Murillo et al., 2012).

El minijardín está constituido por bancales sobre el suelo, de 1,2 metros de ancho por 7 metros de largo por 20 centímetros de altura y conformados por bloques de cemento en toda su periferia. Se utilizó un sistema de fertirriego automatizado, con 4 cintas de goteo en cada cama, con goteros cada 20 cm. Se empleó una bomba (1 atm de presión) para impulsar el agua o la solución hidropónica a través de una tubería que alimenta cada cama en el sistema (Murillo et al., 2012).

Las plantas madre para el ensayo se produjeron vegetativamente de las colecciones genéticas de GENFORES, tal y como lo describe Badilla (2014). Se colectó brotes del meristemo de aproximadamente 3 centímetros de longitud, se les redujo el área foliar a un 1/4 de su tamaño original, se les aplicó el ácido indol-tres-butílico (AIB 3%) en la base y se introdujeron en pellets Jiffy de 36 mm de diámetro por 45 mm de altura rellenos de turba. Posteriormente se colocaron en el área de enraizamiento durante 3 semanas, con un sistema de riego por nebulización a una frecuencia de 15 minutos durante 35 segundos, que lograron mantener una temperatura promedio de 30°C y una humedad relativa superior al 90% (Badilla, 2014). Una vez enraizadas las plantas, se plantaron en las parcelas experimentales, con una densidad de 10x10 cm en los bancales del minijardín clonal.

Para el manejo del ensayo se utilizó el protocolo empleado en la producción comercial de plantas, que corresponde a un régimen de fertirriego en una frecuencia de 3 veces a la semana, con una programación que aplica 5 minutos de agua para humedecer el sustrato, 15 minutos con solución nutritiva y por último 5 minutos de agua para el lavado de las mangueras. La solución hidropónica utilizada estaba compuesta por elementos mayores en una concentración de 5% en nitrógeno (N), fósforo (P₂O₅) y potasio (K₂O), un 2% de calcio (Ca) y 83% en diluyente y regulador de pH e inertes. Mientras que la solución con los elementos menores estaba compuesta por magnesio

(MgO) en 30 000 ppm, azufre (S) en 26 100 ppm, boro (B) en 1 000 ppm, hierro (Fe) en 1 000 ppm, manganeso (Mn) en 500 ppm, zinc (Zn) en 300 ppm, cobre (Cu) en 200 ppm, molibdeno (Mo) en 50 ppm y 94% en diluyente y regulador de pH e inertes.

Las plantas madre se mantuvieron bajo este régimen durante 4 meses previos al inicio del experimento, hasta que alcanzaran una madurez, tamaño y una productividad estable. Durante el experimento, la cosecha de los brotes se realizó cada 15 días durante un mes y medio.

Diseño experimental

El ensayo se estableció con un diseño factorial donde se evaluaron dos fitorreguladores y cuatro dosis de aplicación en cada uno, con tres repeticiones (Cuadro 10). Los fitorreguladores evaluados fueron (1) ácido giberélico (GA₃) y (2) 6-bencilaminopurina (BAP). Las cuatro dosis correspondieron a 0 mg l⁻¹ como testigo, 5 mg l⁻¹, 10 mg l⁻¹ y 20 mg l⁻¹ (Figura 7a).

Como efecto estadístico de repetición se utilizaron tres clones (genotipos) de la misma colección élite de teca de GENFORES. Por tanto, cada repetición consistió en una unidad monoclonal. Mientras que la unidad experimental base de cada tratamiento consistió en 14 plantas (rametos).

Cuadro 10. Diseño factorial para la evaluación del efecto del GA₃ y el BAP en la producción del minijardín clonal de teca, San Carlos, Costa Rica.

		Factor B	b1	b2	b3	b4
		(Dosis mg l⁻¹)	0	5	10	20
Factor A	a1	GA ₃	a1b1	a1b2	a1b3	a1b4
	a2	BAP	a2b1	a2b2	a2b3	a2b4

La solución experimental se obtuvo mediante la preparación de 100 ml para cada uno de los tratamientos (dosis de 20, 10 y 5 mg l⁻¹), para lo cual se preparó una solución con 0,002, 0,001 y 0,0005 ± 0,0001 g de producto respectivamente. Cada concentración fue disuelta en una cantidad de 3-4 gotas de alcohol etílico al 95% hasta conseguir la disolución total del fitorregulador (Cardoso et al., 2012; Maxiselly et al., 2021). Posteriormente, se adicionó y homogenizó con agua destilada hasta completar 100 ml de disolución para cada una de las concentraciones a evaluar.

Se utilizó un dispensador de líquido pequeño con 50 ml de volumen, debidamente identificado para cada dosis y fitorregulador. Se procedió a rociar toda el área foliar de cada unidad experimental de manera, con aproximadamente 0,45 ml de solución por planta individual. La aplicación se realizó en las primeras horas de la mañana y tres días posterior a la cosecha de brotes (Cunha de Barcellos, 2014). Las aplicaciones se repitieron durante un mes y medio de duración del experimento. Para mantener un mejor control y focalización de la aplicación, y evitar contaminar las unidades experimentales vecinas, se aisló cada parcela con una pared de cartón (Figura 7b).



Figura 7. Ensayo de aplicación de dosis de GA₃ y BAP en minijardines clonales de *T. grandis*. (a) Vista del bancal con la distribución de unidades experimentales, (b) aislamiento temporal con cartón, de cada parcela durante la aplicación del tratamiento (dosis), San Carlos, Costa Rica.

Variables de respuesta

Las variables de respuesta del estudio fueron a) tasa de producción de brotes por planta madre en cada cosecha quincenal, b) producción de brotes por superficie (m²), c) longitud del brote (cm), d) mortalidad dentro de la unidad experimental y e) tasa de enraizamiento de los brotes.

Se crearon tres variables adicionales que evaluaron el enraizamiento de las estaquillas, análogo a los mismos principios utilizados con la velocidad de germinación de semillas (Czabator, 1962; Espitia et al., 2016; González-Zertuche & Orozco-Segovia, 1996). Para su determinación, se pusieron los brotes a enraizar al aire en bandejas plásticas en posición invertida (Figura 2b), con base en la metodología establecida en

GENFORES (Badilla et al., 2016). Con esto fue posible verificar diariamente el estado de enraizamiento de las estaquillas. Los parámetros estimados fueron: enraizamiento diario medio, índice de velocidad de enraizamiento, valor del enraizamiento y porcentaje de enraizamiento.

Para el enraizamiento diario medio (EDM), se utilizó la siguiente fórmula (González-Zertuche & Orozco-Segovia, 1996; Maguire, 1962):

$$1) \text{ EDM} = \sum \left(\frac{n_i}{t} \right)$$

En el que:

n_i = número de brotes enraizados al día i .

t = tiempo de enraizamiento desde el día cero hasta el enraizamiento del último brote.

El valor del enraizamiento (VE) mediante la siguiente expresión:

$$2) \text{ VE} = \text{EDM} * \text{VP} \text{ (Czabator, 1962; Espitia et al., 2016)}$$

En donde:

EDM = enraizamiento diario medio.

VP = corresponde al enraizamiento diario medio máximo alcanzado en el ensayo.

El índice de velocidad de enraizamiento (IVE) se calculó mediante la fórmula dispuesta por Maguire (1962):

$$3) \text{ IVE} = \frac{P_1}{T_1} + \frac{P_2}{T_2} + \frac{P_3}{T_3} + \dots + \frac{P_n}{T_n} \text{ (Maguire, 1962)}$$

Donde:

$P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$ = número de brotes enraizados en el primer, segundo, tercer y último conteo de la evaluación.

$T_1, T_2, T_3, \dots, T_n$ = tiempo en días para cada enraizamiento.

Las pruebas de enraizamiento se realizaron, mediante el método al aire, en un ambiente a 30°C de temperatura y 90% de humedad relativa (Badilla, 2014). A cada estaca se le disminuyó previamente su área foliar a un cuarto de su tamaño original. Se

les aplicó hormona AIB (3%) en la base para homogenizar su enraizamiento. Finalmente se dejaron enraizar al aire como se muestra en la figura 8b.

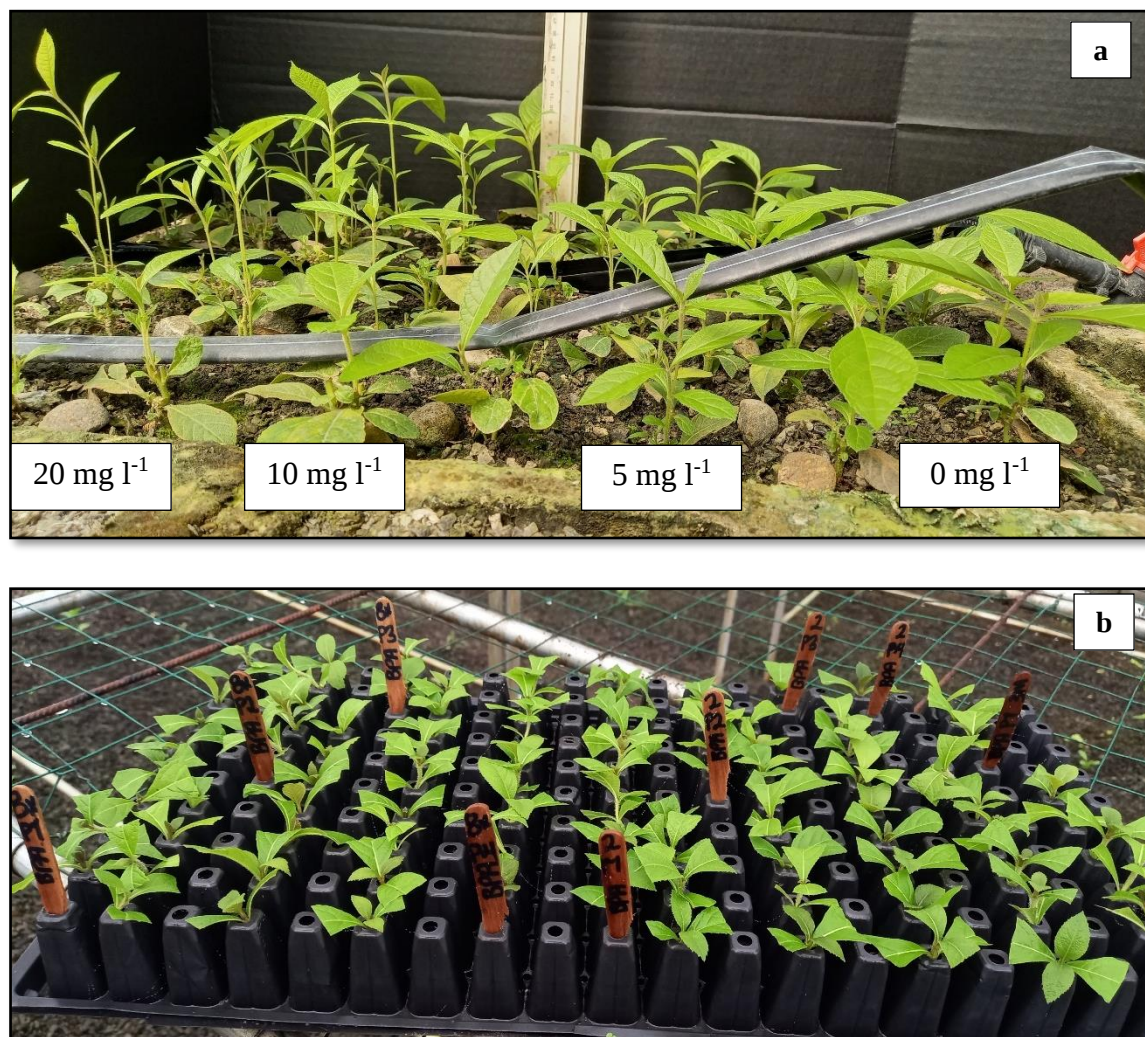


Figura 8. Plantas madre de *T. grandis* en el minijardín clonal bajo el efecto del GA₃ (a); brotes en fase de enraizamiento al aire, San Carlos, Costa Rica (b).

Análisis estadístico

Para el procesamiento de la información se utilizó Microsoft Excel 365 e InfoStat (IS) versión 2020. Se realizó comprobación de los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas para proceder luego con un ANDEVA ($p < 0,05$) para cada una de las variables investigadas. Una vez verificado los datos y encontradas diferencias entre los tratamientos, se aplicó la prueba de comparación múltiple de Tukey para el factor de los fitorreguladores y dosis aplicadas, y contrastes ortogonales para comparar las interacciones fitorregulador*dosis.

Resultados

Se muestra el resultado del análisis de varianza con los valores de probabilidad basados en un nivel del 95% de confiabilidad.

Cuadro 11. Efecto de la aplicación del GA₃ y BAP en la productividad de minijardines clonales de teca, San Carlos, Costa Rica.

Fuente de Variación	Valor de p			
	Tasa brotadura	Producción de brotes por área (m ²)	Longitud de brote	Mortalidad
Fitorregulador	0,008**	0,008**	0,0086**	0,003 ^{ns}
Dosis	0,0003**	0,0003**	0,0065**	0,7615 ^{ns}
Fitorregulador*Dosis	0,0017**	0,0017**	0,0017**	0,8138 ^{ns}
Repetición (clon)	0,0056**	0,0056**	0,0096**	0,0233*
Fitorregulador*Repetición	0,2376 ^{ns}	0,2376 ^{ns}	0,4578 ^{ns}	0,1738 ^{ns}
Dosis*Repetición	0,4432 ^{ns}	0,4432 ^{ns}	0,2468 ^{ns}	0,0990 ^{ns}

Modelo: $Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \delta_{ij} \varepsilon_{ijk}$

* $p > 0.05$; ** $p > 0.01$; ns= no significativo

El análisis de varianza, para la tasa de brotación, producción de brotes por metro cuadrado y longitud de brote mostraron diferencias significativas para los factores fitorregulador, dosis y la interacción fitorregulador*dosis. La variable mortalidad no presentó diferencias significativas en los factores mencionados (Cuadro 11). En la prueba de comparación múltiple, el fitorregulador que presentó el mejor rendimiento, con una tasa de brotación de 1,30 brotes por planta y 188,17 brotes por metro cuadrado fue la aplicación de GA₃ con relación al BAP que registró una tasa de 0,96 brotes por planta y 139,78 brotes por metro cuadrado. La variable longitud de brote registró el máximo crecimiento con el uso del GA₃, con un promedio de 4,92 cm. Mientras que con la aplicación del BAP los brotes exhibieron una longitud promedio de 3,90 cm.

Con el efecto de dosis, la prueba de Tukey demostró la formación de dos grupos, que presentaron diferencias significativas para la tasa de brotación y producción de brotes

por área. El primer grupo se formó entre el testigo y la dosis de 5 mg l⁻¹ con valores promedios entre 0,97 a 1,07 brotes por planta madre. El segundo grupo lo conformaron las dosis de 10 mg l⁻¹ y 20 mg l⁻¹, con valores promedios de 1,23 a 1,25 brotes por planta madre respectivamente. Para longitud de brotes, las diferencias fueron significativas y se presentaron entre el testigo (con una longitud promedio de 3,92 cm) y todas las dosis aplicadas (con valores promedios entre 4,45 a 4,68 cm), sin diferencias significativas entre ellas.

Los resultados de las pruebas de contrastes ortogonales se detallan en el cuadro 12. Se realizaron siete contrastes para comparar el efecto de la interacción (fitorregulador*dosis) en la tasa de brotación, producción de brotes por área y longitud de brote.

Cuadro 12. Contrastes ortogonales en la evaluación del efecto de dosis de GA₃ y BAP en la productividad de minijardines clonales de *T. grandis*, San Carlos, Costa Rica.

Contrastes		Valor de p		
		Tasa de brotación	Producción de brotes por área (m ²)	Longitud de brote
BAP	1. Testigo vs Dosis 5, 10, 20 mg l ⁻¹	0,3861 ^{ns}	0,3861 ^{ns}	0,5562 ^{ns}
	2. Dosis 20 mg l ⁻¹ vs Dosis 5 y 10 mg l ⁻¹	0,551 ^{ns}	0,551 ^{ns}	0,5474 ^{ns}
	3. Dosis 10 mg l ⁻¹ vs Dosis 5 mg l ⁻¹	0,5503 ^{ns}	0,5503 ^{ns}	0,8909 ^{ns}
GA₃	4. Testigo vs Dosis 5, 10, 20 mg l ⁻¹	<0,0001**	<0,0001**	<0,0001**
	5. Dosis 20 mg l ⁻¹ vs Dosis 5 y 10 mg l ⁻¹	0,0175*	0,0175*	0,0993 ^{ns}
	6. Dosis 10 mg l ⁻¹ vs Dosis 5 mg l ⁻¹	0,009**	0,0019**	0,2915 ^{ns}
Contraste general	7. BAP*Dosis vs GA ₃ *Dosis	<0,0001**	<0,0001**	<0,0001**

Modelo: $Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \delta_{ij} \varepsilon_{ijk}$

*p>0.95; **p>0.99; ns=no significativo

Los resultados obtenidos muestran que no hubo respuesta al aplicar el BAP en las plantas, reflejado en la no significancia de los tres primeros contrastes. Que puede verificarse en la figura 3 para todas las dosis aplicadas. Para el caso del GA₃ hubo

diferencias significativas en los contrastes cuatro, cinco, seis y siete (Cuadro 13 y Figura 8a).

El cuarto contraste (GA_3) presentó diferencias altamente significativas entre todas las dosis con respecto al testigo, para las variables tasa de brotadura, producción de brotes por área y longitud de brote. Con el quinto contraste (GA_3), las diferencias significativas se observaron en las variables tasa de brotadura y producción de brotes por área, generando un mayor efecto al aplicar una dosis de 20 mg l^{-1} con respecto a las dosis de 5 y 10 mg l^{-1} . El sexto contraste (GA_3) muestra el mismo comportamiento relacionado a la dosis de 10 mg l^{-1} en comparación con la dosis de 5 mg l^{-1} .

El efecto de la aplicación del GA_3 en todas las dosis evaluadas, resultó en un aumento significativo y creciente en todas las variables de producción (Figura 10). Mientras que el testigo registró 1,02 brotes por planta madre, 147 brotes por metro cuadrado y 3,81 cm de longitud de brote, se observó que a mayor dosis de GA_3 se registró un incremento constante, hasta alcanzar con 20 mg l^{-1} aumentando en un 18, 44 y 47% los brotes por planta madre, y en un 18, 38 y 33% los brotes por metro cuadrado con longitudes de 4,95, 5,30 y 5,61 cm respectivamente.

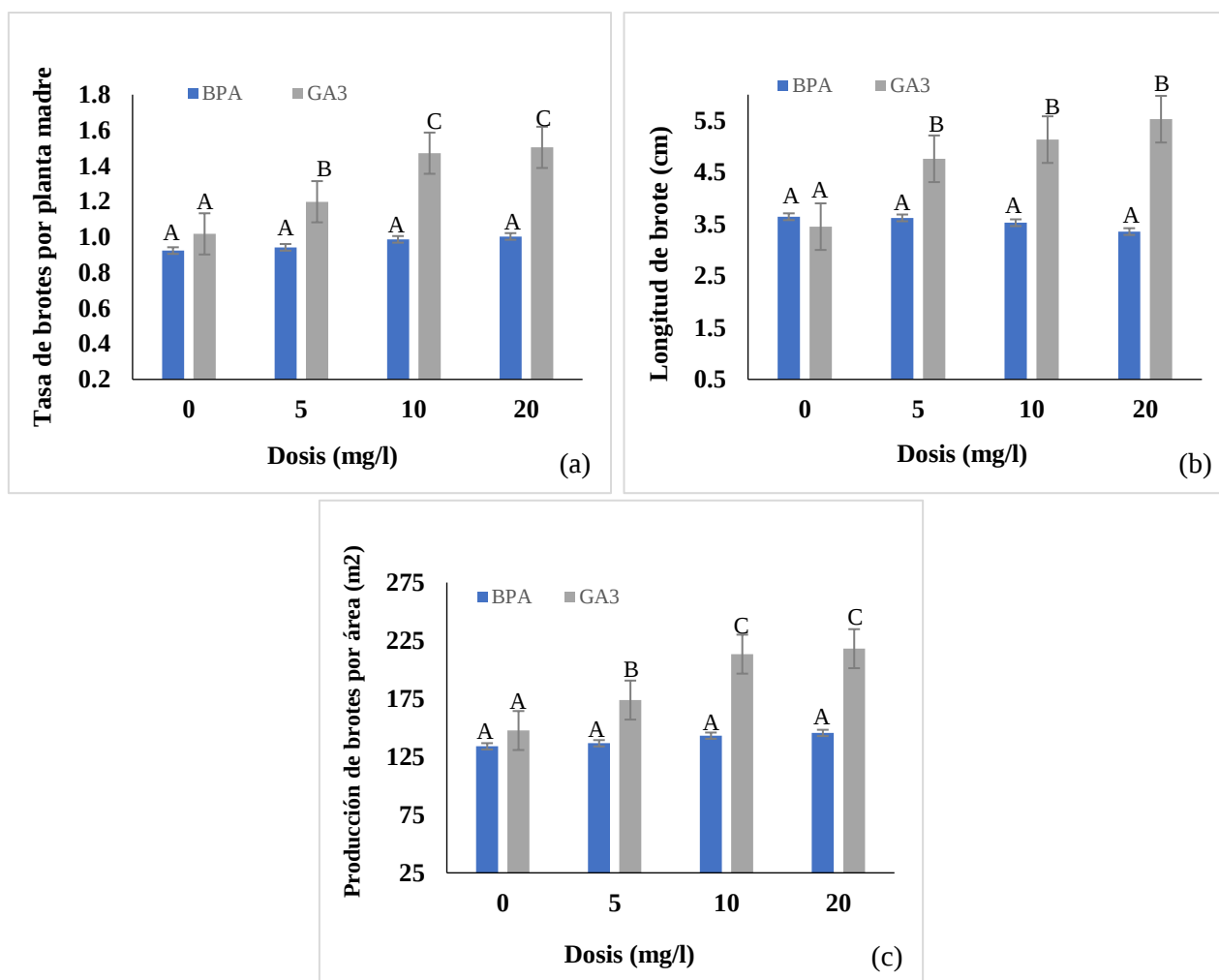


Figura 9. Efecto de las dosis del GA3 y BAP en la tasa de brotes por planta madre (a), longitud de brotes (b) y producción de brotes por área (c) en minijardines clonales de *T. grandis*, San Carlos, Costa Rica.

El otro aspecto evaluado fue en relación con el efecto en la velocidad o vigor de enraizamiento. En el cuadro 13 se detalla el análisis de varianza de la evaluación en el proceso de enraizamiento de las mini estacas producidas en el ensayo experimental.

Cuadro 13. Efecto del GA₃ y BAP en la tasa y vigor de enraizamiento de mini estaquillas de *T. grandis*, San Carlos, Costa Rica.

Fuente de Variación	Valor de <i>p</i>			
	Enraizamiento diario medio	Porcentaje enraizamiento	Índice velocidad enraizamiento	Valor enraizamiento
Fitorregulador	0,029*	0,193	0,016*	0,032*
Dosis	0,110	0,609	0,316	0,341
Fitorregulador*Dosis	0,414	0,588	0,689	0,809
Repetición (clon)	0,019*	0,617	0,179	0,019*
Fitorregulador*Repetición	0,776	0,833	0,914	0,820
Dosis*Repetición	0,7297	0,8121	0,9322	0,3787

Modelo: $Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \delta_{ij} \varepsilon_{ijk}$

* $p > 0.95$

Se puede observar que el enraizamiento diario medio, el índice velocidad de enraizamiento y el valor de enraizamiento, mostraron diferencias significativas, como resultado de la aplicación de fitorreguladores de crecimiento en las plantas madre (Cuadro 4). Sin embargo, no hubo diferencias con el porcentaje de enraizamiento. Se observa también, que el efecto repetición (clon) registró diferencias significativas en el enraizamiento diario medio y en el valor de enraizamiento.

En la prueba de comparación múltiple, las diferencias fueron acentuadas con el GA₃ que demostró ser superior al BAP. Para el enraizamiento diario medio, el GA₃ presentó valores diarios medios de 0,85 brotes, con un índice de velocidad de 1,30 brotes por día y un valor de enraizamiento de 0,42. En comparación con el fitorregulador BAP que presentó valores diarios de enraizamiento de 0,57 brotes a un índice de velocidad de 0,83 brotes por día, y un valor de enraizamiento promedio de 0,25 unidades. El porcentaje de enraizamiento no presentó diferencias significativas, ya que ambos reguladores obtuvieron una tasa de enraizamiento de casi el 100%.

Discusión

Basado en el análisis de esta investigación, la aplicación de GA₃, mostró en todas las dosis evaluadas, un efecto significativo de aumento en la producción y longitud de brote, en contraste con la aplicación de BAP. Sin embargo, en un estudio realizado en *Eustoma grandiflorum* (Raf.) Shinn en vivero, se reportó resultados positivos con la aplicación de 6 mg l⁻¹ de BAP y la combinación de 6 mg l⁻¹ de GA₃ y BAP, con aumentos entre un 300% y 450% en el número de brotes por planta (Castillo-González et al., 2019). Además, en un estudio de propagación in vitro en *Prunus armenica* L. se reportó un mayor número de brotes laterales a partir del uso de un medio basal QL suplementado con BAP a razón de 4,44 μmol l⁻¹ y GA₃ 1,44 μmol l⁻¹ (Zare Khafri et al., 2020).

En investigaciones de propagación in vitro de *Gossypium barbadense* L. se reportó un patrón creciente del efecto de BPA, con explantes de mayor altura, mayor número de hojas y de entrenudos con yemas axilares (López-Medina et al., 2020). De manera similar, se reportó un mayor vigor en la formación de plantas in vitro de *Amaranthus tricolor*, con una concentración de 0,20 mg l⁻¹ de BAP (Tahir & Mathew, 2021). En estudios de propagación in vitro de *T. grandis* se reportó, que con una concentración mayor a 0,5 mg l⁻¹ de BAP, se obtuvo un aumento significativo en la producción de nuevos brotes con relación al tratamiento control (Polo Santos et al., 2017).

En esta investigación no se encontró diferencias significativas con la aplicación de BAP en relación con el testigo, para ninguna de las dosis evaluadas de 5 a 20 mg l⁻¹. Partiendo de la fisiología de la planta, donde el meristemo apical inhibe el crecimiento de brotes axilares más próximos a él, y que a su decapitación estimula el activación de yemas dormantes (Shimizu-Sato et al., 2001), podría explicar la rápida aparición de nuevos brotes en las planta madre, producto de la acción de la auxinas AIA y ANA presentes en la zona apical; que, con la acción exógena de la giberelina debido a su principal función que es la promoción del crecimiento del tallo, hojas y raíces, lo que no sucede con las citoquininas que en su mayoría son sintetizadas en la raíz, de donde son transportadas a lo largo del tallo, por lo que se podrían ver temporalmente inhibidas de actuar en el corto plazo, a pesar de su incorporación exógena a distintas dosis (Delgado García et al., 2016).

En concordancia, el estudio reveló que aplicar 10 mg l⁻¹ y 20 mg l⁻¹ de GA₃ aumentó significativamente la producción y longitud del brote con respecto al testigo. Sin

embargo, los brotes producidos bajo el efecto de la dosis de 20 mg l⁻¹, exhibieron una hoja de menor tamaño y un tallo más delgado o fino. Akhtar et al. (2017) mencionan que altas concentraciones de este fitorregulador tiende a producir brotes delgados y alargados, lo que dificulta su manipulación durante la cosecha, preparación y colocación en la bandeja de enraizamiento. Se ha reportado también, que en la producción de semilla artificial de *Physalis peruviana* L, se observó un efecto negativo en la longitud de hoja y de brote, al utilizar concentraciones altas de GA₃ (Yücesan et al., 2015). En tubérculos se ha reportado también un efecto negativo en las proporciones de la planta, con un aumento en la concentración del GA₃, donde a pesar de una mayor producción vegetativa (brotes por planta), se reportó una reducción del peso del tubérculo, debido probablemente a la competencia por recursos. (Silva et al., 2011).

Por lo que la aplicación de 10 mg l⁻¹ de GA₃ no mostró evidencia de un efecto adverso en las plantas ni en los brotes producidos, más bien de favorecer el rendimiento en 0,45 brotes por planta y 52 brotes por metro cuadrado. (44% y 38% respectivamente). Si se analiza desde el punto de vista de los costos, el uso de 10 mg l⁻¹ de GA₃ implicaría un costo adicional mensual de US \$0,10 por metro cuadrado, o también un costo casi despreciable de US \$ 0,001 por brote o mini estacilla.

En relación con la tasa de enraizamiento, en este estudio no se determinó ningún efecto adicional al aplicar diferentes dosis de los fitorreguladores en los brotes de *T. grandis* para mejorar su tasa de enraizamiento. Ese mismo resultado se encontró en un estudio en propagación in vitro de *S. macrophylla* donde reportó que la adición de 0,5 ppm y 1 ppm de BAP en el medio de cultivo, no favoreció la producción de raíces en los esquejes (Campos Ruiz, 2019). En experiencias de propagación vegetativa en *Orites myrtoidea*, se reportó que los mejores resultados en la formación de raíces se logró a partir de concentraciones de AIB entre 1 000 a 4 000 ppm, sin la necesidad de agregar ácido giberélico (GA) en la solución (Schiappacasse et al., 2019).

La mayor energía de enraizamiento observada en los brotes obtenidos bajo acción del GA₃ versus BAP, (enraizamiento diario, índice de velocidad y valor de enraizamiento), es un resultado que podría considerarse como esperado. La estacilla se origina del corte de un brote terminal o meristemo de la planta madre, lo cual le confiere una alta concentración de auxinas endógenas, que promoverán un rápido estímulo a la activación de yemas en los entrenudos y posteriormente, a la formación de raíces (George

et al., 2008). Por tanto, la adición de dosis de giberelina pudo complementar la acción temprana de las auxinas endógenas, e iniciar su acción rápida para la formación de raíces, lo que podría explicar que la aplicación del BAP no lograra ningún estímulo adicional temprano en el enraizamiento.

En un estudio sobre germinación de *Peumus boldus* MOL se determinó que sumergir las semillas en una solución de GA₃ a 10 g l⁻¹ durante 48 horas genera el valor de germinación de 0,1 unidades, siendo el más alto con respecto a los otros tratamientos (Rodríguez Crespillo, 1997). En *Physalis ixocarpa* se observó que aplicar ácido giberélico incrementó significativamente la germinación presentando el IVE más alto de aproximadamente 5 semillas germinadas por día con respecto a otros ácidos como: el benzoico, salicílico y sulfosalicílico (García-Osuna et al., 2018). Esto se explica con que el ácido giberélico está asociado a la rápida síntesis de aminoácidos y amidas, lo cual incrementa la tasa de germinación (Gupta & Mukherjee, 1982).

En este estudio, se evidenció que la mortalidad, la tasa de enraizamiento y la producción de brotes por planta madre, variaron entre los clones utilizados. Donde el clon 2 fue el genotipo que registró el mayor rendimiento. Estas diferencias encontradas demuestran la influencia del genotipo en la tasa de reproducción vegetativa. Otros investigadores han reportado resultados similares, donde mencionan que estas diferencias entre clones, forma parte de la variación natural en los programas de mejoramiento genético (Resende et al., 2018). En evaluaciones para aumentar la productividad tanto en especies forestales como en agrícolas, se menciona la alta relación con el genotipo (Badilla, 2014; Gamboa-Tabares et al., 2021; Mejía Salazar et al., 2021). En híbridos de *Eucalyptus benthamii* x *Eucalyptus dunnii* reportaron que la producción de miniestacas estuvo influenciada por los clones utilizados, lo que evidenció el efecto del genotipo en la productividad clonal (Ebling Brondani et al., 2012). En un estudio sobre *Solanum lycopersicum* L. se menciona que el efecto del genotipo explica en mayor medida el rendimiento en producción clonal (Cordoba-Novoa et al., 2018).

Finalmente, la mortalidad del ensayo se mantuvo en un rango de 0,9% a 5,6%, lo que permitió una mayor confiabilidad de los datos. Estos resultados estuvieron dentro del rango de valores esperados bajo los parámetros utilizados en el sistema productivo (Murillo et al., 2013). Además, los valores de sobrevivencia fueron entre un 94% y 99%,

similares a los reportados por Badilla (2014), donde usó varios clones de *T. grandis* y reportó una supervivencia entre un 94% hasta 100% (Badilla, 2014).

Conclusiones

La aplicación de GA₃ en dosis de 10 mg l⁻¹ y 20 mg l⁻¹ aumenta la producción en un 44 y 47% y longitud de brotes, en un 17 y 19% respectivamente, en el minijardín clonal de *T. grandis* en ambiente protegido.

Aplicar 10 mg l⁻¹ de GA₃ es suficiente para aumentar el rendimiento en la productividad del minijardín.

La aplicación de BAP no mostró respuesta en el aumento de la producción de brotes del minijardín clonal de teca.

Agradecimientos

Esta investigación formó parte del proyecto de investigación “Mejoramiento del paquete tecnológico de producción clonal en ambiente protegido de *Tectona grandis* y *Cordia alliodora*”, financiado por la Vicerrectoría de Investigación y Extensión, así como del trabajo de tesis de la Maestría en Ciencias Forestales de la Escuela de Ingeniería Forestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Referencias

- Abdelnour, A., & Muñoz, A. (2005). Micropropagación de teca (*Tectona grandis* L.f). In *Kurú: Revista Forestal (Costa Rica)* (Vol. 2, Issue 5). Editorial Tecnológica de Costa Rica.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5123391&info=resumen&idioma=SPA>
- Ahmed, K., & Gebretensay, F. (2019). Yield and Yield Components of Potato (*Solanum tuberosum* L.) as affected by Plant Growth Regulators and Potato Varieties at Kulumsa Agricultural Research Centre, Southeastern Ethiopia. *AJSI*, 4.
- Akhtar, D., Shar, H., Memon, S., Kalhoro, S. A., Shahen, M., Hussain Shar, A., Qambrani, M. A., Shar, P. A., Shar, A. G., Liu, J., Shen, F., Marri, N., Qambrani, A., Shar, A., & Kalhoro, A. (2017). Regeneration of Potato Plantlets Through Shoot Tip Culture Comparison Between GA3 and BAP The systemic pharmacological investigation level in the mechanisms of Chinese Traditional Medicine (TCM) through the Guanxin Shutong Capsule formula for treatment of. *American Journal of Biology and Life Sciences*, 5(3), 13–20.
<http://www.openscienceonline.com/journal/ajbls>
- Alexandra, F., & Dorica, B. (2020). The influence of phytohormones on indirect regeneration of goji (*Lycium barbarum* L.). *Journal of Horticulture*, 24(1), 40–45.
www.journal-hfb.usab-tm.ro
- Aucapiña Criollo, C. B., & López Peña, P. A. (2016). *Definición de protocolos para el uso de fitohormonas en el crecimiento de orquídeas a nivel in vitro*. [Universidad Politécnica Salesiana, Quito]. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/12147>
- Badilla, Y. (2014). *Clonagen de Tectona grandis Linn F. por estaquia e miniestaquia* [Universidad Federal de Vicosa, Brasi].
<http://163.178.205.27:8080/xmlui/handle/123456789/56>
- Badilla, Y., Xavier, A., Murillo, O., & De Paiva, H. N. (2016). IBA efficiency on mini-cutting rooting from teak (*Tectona grandis* Linn F.) clones. *Revista Arvore*, 40(3), 477–485. <https://doi.org/10.1590/0100-67622016000300011>
- Campos Ruiz, J. (2019). *Propagación in vitro de Swietenia macrophylla King utilizando ácido Naftalenacético (ANA) y Bencilaminopurina (BAP)* [Universidad Nacional de

Trijullo]. <https://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/15287>

- Cardoso, J. C., Ono, E. O., & Rodrigues, J. D. (2012). Gibberellic acid in vegetative and reproductive development of Phalaenopsis orchid hybrid genus. *Horticultura Brasileira*, 30(1), 71–74. <https://www.scielo.br/j/hb/a/JygFq8SvPYvnkck8Fc54H3j/?lang=en>
- Castillo-González, A. M., Valdez-Aguilar, L. A., & Avitia-García, E. (2019). Response of lisianthus (*Eustoma grandiflorum* [Raf.] Shinn) to applications of growth regulators. *Acta Horticulturae*, 1263, 241–244. <https://doi.org/10.17660/ACTAHORTIC.2019.1263.31>
- Cordoba-Novoa, H. A., Gómez, S. V., & Núñez, C. E. (2018). Evaluación del rendimiento y fenología de tres genotipos de tomate cherry (*Solanum lycopersicum* L.) bajo condiciones de invernadero. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 12(1), 113–125. <https://doi.org/10.17584/RCCH.2018V12I1.7348>
- Cunha de Barcellos, A. (2014). Fitorreguladores de Crescimento em Algodoeiro. *Embrapa Agricultura Digital*, 1–5. <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/998971/1/COT373.pdf>
- Czabator, F. J. (1962). Germination Value: An Index Combining Speed and Completeness of Pine Seed Germination. *Forest Science*, 8(4), 386–396. <https://doi.org/10.1093/FORRESTSCIENCE/8.4.386>
- Davies, P. (Ed.). (2013). *Plant Hormones: Physiology, Biochemistry and Molecular Biology*. Springer Science & Business Media. [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=AVTtCAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP8&dq=Davies,+P.+J.+\(Ed.\).+\(2013\).+Plant+hormones:+physiology,+biochemistry+and+molecular+biology.+New+York,+EUA:+Springer+Science+%26+Business+Media&ots=qtzyk2i7AX&sig=EeJAh9k0hPrR1TweD5R](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=AVTtCAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP8&dq=Davies,+P.+J.+(Ed.).+(2013).+Plant+hormones:+physiology,+biochemistry+and+molecular+biology.+New+York,+EUA:+Springer+Science+%26+Business+Media&ots=qtzyk2i7AX&sig=EeJAh9k0hPrR1TweD5R)
- Delgado García, L.M. & Hoyos Sánchez, R.A (2016). Multiplicación clonal in vivo e in vitro de la especie forestal nativa *Aniba perutilis* Hemsl. *Acta Agron*, 65(2) 190-196. doi: <http://dx.doi.org/10.15446/acag.v65n2.42808>
- Dutra, L. F., Wendling, I., & Brondani, G. E. (2009). A micropropagação de eucalipto.

- Ebling Brondani, G., Wendling, I., Grossi, F., Ferreira Dutra, L., & Araujo, M. A. (2012). Miniestaquia de *Eucalyptus benthamii* x *Eucalyptus dunnii*: (i) sobrevivência de minicepas e produção de miniestacas em função das coletas e estações do ano. *Ciência Florestal*, 22(1), 11–21. <https://web.a.ebscohost.com/abstract?direct=true&profile=ehost&scope=site&authhtype=crawler&jrnl=01039954&AN=87020526&h=DIUHikAo%2BaDCnSIggHWfnimg3a%2Brq7YPMxsKAt7LHZRrYnP1mS1NsWFFtaSeSdBBSHC4tIP6CpfHz%2Bf4fFm90A%3D%3D&crl=c&resultNs=AdminWebAuth&resultLocal=ErrCrlNotAuth&crlhashurl=login.aspx%3Fdirect%3Dtrue%26profile%3Dehost%26scope%3Dsite%26authtype%3Dcrawler%26jrnl%3D01039954%26AN%3D87020526>
- Espitia, M., Cardona, C., & Araméndiz, H. (2016). Pruebas de germinación de semillas de forestales nativos de Cordoba, Colombia, en laboratorio y casa-malla. *Rev. U.D.C.A Act & Div Cient*, 19(2), 307–315. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-42262016000200007
- Gamboa-Tabares, Jean-Alexánder, Rodríguez-Ortiz, J., Jaime-Andrés, Gamboa-Tabares, J., Armando, Durán-Bautista, J., Ervin-Humphrey, & Rojas-Vargas, J. (2021). Evaluación agronómica de genotipos de *Theobroma cacao* L. en la Amazonia colombiana. *Biotecnología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 19(1), 244–255. <https://doi.org/10.18684/BSAA.V19.N1.2021.1619>
- García-Osuna, H. T., Escobedo Bocardo, L., Robledo-Torres, V., Benavides Mendoza, A., & Ramírez Godina, F. (2018). Germinación y micropropagación de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa*) tetraploide. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12, 2301–2311. <https://doi.org/10.29312/REMEXCA.V0I12.763>
- George, E.; Hall, M.; y De Clerck, G. (2008). Plant propagation by tissue culture. 3rd Ed. vol 1. The Background, 495 p
- González-Zertuche, L., & Orozco-Segovia, A. (1996). Métodos de análisis de datos en la germinación de semillas, un ejemplo: *Manfreda brachystachya*. *Botanical Sciences*,

58, 15–30. <https://doi.org/10.17129/BOTSCI.1484>

Gupta, P., & Mukherjee, D. (1982). Influence of GA₃ pre-soaking of seeds on biochemical changes in seedling parts of *Pennisetum typhoides* Rich. *Proceedings of Indian National Science Academy*, 48(5), 642–648. <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=IN19840040829>

Holdridge, L. (1982). *Ecología basada en zonas de vida* (H. Jiménez (Ed.); IICA).

Instituto Meteorológico Nacional. (2014). *Clima en Costa Rica*. Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica. http://www.imn.ac.cr/educacion/CLIMA_DE_COSTA_RICA.html

Instituto Meteorológico Nacional. (2021). *Estación Automática del TEC, Sede Santa Clara, San Carlos, Alajuela*. Condiciones Actuales Del Tiempo. <https://www.imn.ac.cr/especial/estacionStaClara.html>

Kokkiligadda, S., Pandey, B., & Ronda, S. R. (2017). Effect of plant growth regulators on production of alpha-linolenic acid from microalgae *Chlorella pyrenoidosa*. *Sādhanā* 2017 42:10, 42(10), 1821–1824. <https://doi.org/10.1007/S12046-017-0723-8>

Kong, L., & Von Aderkas, P. (2004). *Plant growth regulators and cone induction in Pinaceae*.

López-Medina, S. E., Mostacero-León, J., López-Zavaleta, A., Gil-Rivero, A. E., & Cruz-Castillo, A. J. D. La. (2020). Propagación in vitro de *Gossypium barbadense* L. “algodón nativo” de fibra marrón. *Agroindustrial Science*, 10(3), 235–239. <https://doi.org/10.17268/AGROIND.SCI.2020.03.03>

Maguire, D. (1962). Speed of germination-Aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor. *Crop Sci.*, 2(1), 176–177.

Maxiselly, Y., Anjasari, I. R. D., Sutari, W., Ariyanti, M., Soleh, M. A., Sari, R. A., & Chiarawipa, R. (2021). Stimulation effect of synthetic plant growth regulator (GA₃ and BAP) on young cinchona plant (*Cinchona ledgeriana*) grown in lowland. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 743(1), 012016.

<https://doi.org/10.1088/1755-1315/743/1/012016>

- Mejía Salazar, J. R., Nieto Sierra, D. F., Mejía Kerguelen, S. L., Arango, M., Burbano Erazo, E., & Higueta Corrales, I. D. J. (2021). Evaluación agronómica y nutricional de genotipos de *Chloris gayana* para la ganadería Colombiana. *Agronomía Mesoamericana*, 382–398. <https://doi.org/10.15517/AM.V32I2.44042>
- Mohamed, N., Taha, R. M., Razak, U. N. A. A., & Elias, H. (2018). The Role of Plant Growth Regulators in the Development of in vitro Flowering, Histology and Ultrastructural Studies in *Impatiens balsamina* cv. Dwarf Bush. *Planta Daninha*, 36. <https://doi.org/10.1590/S0100-83582018360100013>
- Mok, D. W. S., & Mok, M. C. (Eds.). (1994). *Cytokinins Chemistry, Activity, and Function*. CRC Press. [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=yov7iUL7OTAC&oi=fnd&pg=PA7&dq=Mok,+M.+C.+\(1994\)+in+Cytokinins:+Chemistry,+Activity+and+Function,+eds.+Mok,+D.+W.+S.+y+Mok,+M.+C.+\(CRC,+Boca+Raton,+FL\),+pp.+155–166.+León,&ots=0ez3kMFsylv&sig=3yYBWr9_bnzGi8HwCIEXNrMA7UQ#v=onepage&q&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=yov7iUL7OTAC&oi=fnd&pg=PA7&dq=Mok,+M.+C.+(1994)+in+Cytokinins:+Chemistry,+Activity+and+Function,+eds.+Mok,+D.+W.+S.+y+Mok,+M.+C.+(CRC,+Boca+Raton,+FL),+pp.+155–166.+León,&ots=0ez3kMFsylv&sig=3yYBWr9_bnzGi8HwCIEXNrMA7UQ#v=onepage&q&f=false)
- Murillo, O., Badilla-Valverde, Y., & Barboza-Flores, S. (2018). Costos de producción en ambiente protegido de clones para reforestación. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú (Julio-Diciembre, 15(37))*, 15–24. <https://doi.org/10.18845/rfmk.v15i37.3597>
- Murillo, O., Badilla, Y., Villalobos, M., & Rojas-Parajeles, F. (2013). *Optimización de la tecnología de propagación vegetativa in vivo y plantación de teca y pilón*. https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/3243/optimizacion_tecnologia_propagacion_vegetativa_in_vivo.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Murillo, O., Espitia, M., & Castillo, C. (2012). *Fuentes Semilleras para la Producción Forestal (1º)*. Editorial Domar S.A.S.
- Polo Santos, J. M., Suarez Padrón, I. E., & Gatti, K. C. (2017). Micropropagación de *Tectona grandis* l. f. a partir de meristemas preexistentes. *H.A.A. Temas Agrarios*, 18(2), 83–93. <https://repositorio.unicordoba.edu.co/handle/ucordoba/785>
- Quiala Mendoza, E., Barbón Rodríguez, R., Chávez Milán, M., La O Cárdenas, M., de

- Feria Silva, M., Pérez Peralta, M., & León Quintana, M. (2014). Propagación clonal de la teca (*Tectona grandis* L.) mediante cultivo in vitro. *Anales de La Academia de Ciencias de Cuba*, 4(2), 4–6. <http://revistaccuba.sld.cu/index.php/revacc/article/view/118>
- Resende, M., Murillo, O., & Badilla, Y. (2018). *Genética cuantitativa y selección en el mejoramiento forestal*. Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Rodríguez Crespillo, M. (1997). *Efecto del ácido giberélico (GA3) y tiempo de remojo sobre la germinación de semillas de Boldo (Peumus boldus Mol.)* [Universidad de Talca]. https://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/20.500.13082/10660/UTALCA_TES02.pdf?sequence=1
- Santos, J. P., Suarez Padrón, I., & Gatti, K. C. (2013). Micropropagación de *Tectona grandis* L. f. A partir de meristemas preexistentes *Tectona grandis* L. f. Micropropagation from preexisting meristems. In *Julio-Diciembre* (Vol. 18, Issue 2).
- Schiappacasse, F., Peña, C., Peñailillo, P., Schiappacasse, F., Peña, C., & Peñailillo, P. (2019). *Orites myrtoidea* (Proteaceae): efecto de estratificación fría en germinación de semillas y ácido indol butírico en enraizamiento de estacas. *Gayana. Botánica*, 76(2), 168–175. <https://doi.org/10.4067/S0717-66432019000200168>
- Shimizu-Sato, S., & Mori, H. (2001). Control of outgrowth and dormancy in axillary buds. *Plant Physiology*, 127(4), 1405-1413. <http://doi.org/10.1104/pp.010841>
- Silva, E. C. da, Pinto, C. de A., Souza-Dias, J. A. C. de, & Araújo, T. H. de. (2011). Uso de reguladores de crescimento em brotos destacados de batata-semente. *Horticultura Brasileira*, 29(4), 504–509. <https://doi.org/10.1590/S0102-05362011000400010>
- Staden, J. van, Zazimalova, E., & George, E. . (2008). Plant Growth Regulators II: Cytokinins, their Analogues and Antagonists. In E. F. George, M. A. Hall, & G.-J. De Klerk (Eds.), *Plant Propagation by Tissue Culture* (3rd ed., p. 479). Springer Netherlands.
- Tahir, S. M., & Mathew, J. Y. (2021). Effects of varying concentrations of plant growth

regulators on the in vitro propagation of *Amaranthus* (*Amaranthus tricolor* L.). *Science World Journal*, 16(2), 183–188. <https://www.scienceworldjournal.org/article/view/21789>

Vale-Montilla, C. C. (2018). *Análisis de crecimiento de plántulas de caoba (Swietenia macrophylla King) en tratamientos con auxinas y giberelinas bajo condiciones de vivero*. <http://localhost:8080/xmlui/handle/654321/1335>

Venegas-González, A., Muñoz, V. L., & Toral-Ibañeza, M. (2016). Influencia del uso de reguladores de crecimiento sobre brotes vegetativos y número de estróbilos masculinos en *Pinus pinea* L. en Chile. *Ciência Florestal*, 26(4), 1087–1096. <https://doi.org/10.5902/1980509824997>

Xavier, A., Wendling, I., & da Silva, R. L. (2013). *Clonal forestry: principles and techniques*. Publisher UFV.

Yücesan, B. B., Mohammed, A., Arslan, M., & Gürel, E. (2015). Clonal propagation and synthetic seed production from nodal segments of Cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.), a tropical fruit plant. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 39, 797–806. <https://doi.org/10.3906/tar-1412-86>

Zare Khafri, A., Solouki, M., Zarghami, R., Fakheri, B., Mahdinezhad, N., & Naderpour, M. (2020). In vitro propagation of three Iranian apricot cultivars. *In Vitro Cellular & Developmental Biology - Plant* 2020 57:1, 57(1), 102–117. <https://doi.org/10.1007/S11627-020-10112-W>