

Estado de la publicación: No informado por el autor que envía

Evaluación clonal de *Tectona grandis* L.f bajo tres condiciones de suelo y de manejo silvicultural en Nicoya, Abangares y San Carlos

Ana Paula Pérez Poveda, Rafael Ángel Murillo Cruz, Fernando Ramírez Núñez, William Hernández Castro, David Antonio Carvajal Arroyo, Mónica Lisbeth Cortés Cortés, Ana Gabriela Salazar Ruiz

<https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.11467>

Enviado en: 2025-03-11

Postado en: 2025-03-25 (versión 1)

(AAAA-MM-DD)

Evaluación clonal de *Tectona grandis* L.f bajo tres condiciones de suelo y de manejo silvicultural en Nicoya, Abangares y San Carlos

Clonal evaluation of *Tectona grandis* L.f under three soil and silvicultural management conditions in Nicoya, Abangares and San Carlos

Ana Paula Pérez Poveda¹, Rafael Ángel Murillo Cruz², Fernando Ramírez Núñez³, William Hernández Castro⁴, David Antonio Carvajal Arroyo⁵ Mónica Lisbeth Cortes Cortes⁶, Ana Gabriela Salazar Ruiz⁷

Resumen

[**Introducción**]: *Tectona grandis* L.f es la especie mayormente cultivada en Costa Rica por lo que la selección de genotipos con características superiores es de suma importancia para maximizar el potencial genético y económico de las plantaciones forestales de teca en Costa Rica. [**Objetivo**]: Identificar los mejores genotipos y determinar los parámetros genéticos en tres diferentes sitios a la edad de 24 meses. [**Metodología**]: La investigación se realizó en los cantones de San Carlos, Nicoya y Abangares para lo cual se establecieron tres ensayos con bloques completos al azar. Se realizaron mediciones periódicas del DAP y la altura total de cada clon y se tomaron muestras de suelos en cada sitio para determinar la influencia de las condiciones edáficas. [**Resultados**]: Los clones con el mejor rendimiento fueron el 20, 25, 18, 2 y 3, los cuales mostraron un mayor volumen total de calidad a los 24 meses en San Carlos. Los parámetros genéticos indican una alta variabilidad de la heredabilidad media del clon y la parcela, así como una alta variación ambiental. [**Conclusiones**]: El conjunto clonal tuvo un crecimiento mayor en San Carlos > Nicoya > Abangares. Los parámetros genéticos se expresaron mejor en San Carlos y no se expresaron en Nicoya y Abangares a la edad evaluada.

Palabras clave: Clones, fenotipo, genotipo, parámetros genéticos, selección.

¹ Ingeniera forestal, egresada de la Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional, Costa Rica. ana.perez.poveda@est.una.ac.cr, <https://orcid.org/0009-0008-6456-635X>

² Instituto de Investigación y Servicios Forestales, Universidad Nacional, Costa Rica. rafael.murillo.cruz@una.ac.cr, <https://orcid.org/0000-0002-5326-3563> ;

³ Instituto Regional de Estudio en Sustancias Tóxicas, Universidad Nacional, Costa Rica. fernando.ramirez.munoz@una.cr, <https://orcid.org/0000-0003-0904-0204>

⁴ Instituto de Investigación y Servicios Forestales, Universidad Nacional, Costa Rica. william.hernandez.castro@una.cr, <https://orcid.org/0000-0003-2416-8329>

⁵ Ingeniero forestal, egresada de la Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional, Costa Rica. davidcarpio.daca@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4090-2485>

⁶ Ingeniera forestal, egresada de la Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional, Costa Rica. monicacortes360@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7261-340X>

⁷ Ingeniera forestal, egresada de la Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional, Costa Rica. gabysalazarruiz@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8394-2658>

Abstract

[Introduction]: *Tectona grandis* L.f is the species mostly cultivated in Costa Rica so the selection of genotypes with superior characteristics is of utmost importance to maximize the genetic and economic potential of teak forest plantations in Costa Rica. **[Objective]:** To identify the best genotypes and determine genetic parameters at three different sites at the age of 24 months. **[Methodology]:** The research was conducted in the cantons of San Carlos, Nicoya and Abangares for which three randomized complete block trials were established. Periodic measurements of DBH and total height were made for each clone and soil samples were taken at each site to determine the influence of edaphic conditions. **[Results]:** The clones with the best yield were 20, 25, 18, 2 and 3, which showed higher total quality volume at 24 months in San Carlos. Genetic parameters indicate high variability of mean clone and plot heritability, as well as high environmental variation. **[Conclusions]:** The clonal set had higher growth in San Carlos > Nicoya > Abangares. Genetic parameters were better expressed in San Carlos and not expressed in Nicoya and Abangares at the evaluated age.

Key words: Clones, phenotype, genotype, genetic parameters, selection.

1. Introducción

Tectona grandis L.f. es una de las especies de madera tropical de alta calidad más cultivadas en Costa Rica y en el mundo (Camino *et al.*, 2013). Debido a las cualidades de su madera (solidez, resistencia, color), se considera una de las especies más cotizadas en el mercado internacional, y sus productos tienen un alto valor en el mismo (Armijos, 2014; Camino *et al.*, 2013). En Costa Rica, específicamente, la teca es una de las especies más utilizadas en proyectos de reforestación comercial (Meza *et al.*, 2019), con aproximadamente 47,626.5 hectáreas cultivadas para el 2020 (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos [INEC], 2021).

La selección temprana de individuos superiores de *Tectona grandis* es crucial para maximizar el potencial genético y económico de las plantaciones forestales comerciales en Costa Rica. Actualmente, GENFORES (Genética Forestal) y el vivero forestal de propagación clonal del Instituto de Investigación y Servicios Forestales (INISEFOR) de la Universidad Nacional realizan esfuerzos importantes en la producción de material genéticamente superior de especies comerciales. Estos esfuerzos se atribuyen a que Costa Rica, al ser un país pequeño, no dispone de grandes extensiones territoriales que permitan la reforestación a gran escala; por lo tanto, no puede competir con grandes productores de madera como Brasil, Chile y países asiáticos, entre otros (Barrantes y Ugalde, 2015). Bajo esta premisa, es necesario señalar que el país debe producir madera de buena calidad para poder consolidarse en el mercado mundial (Chavarría y Molina, 2018).

Por esta razón, el mejoramiento genético se ha convertido en una herramienta fundamental que contribuye en la silvicultura, permitiendo identificar genotipos con características superiores a partir de experimentos en campo (Resende *et al.*, 2018). No obstante, las actividades silvícolas realizadas en el establecimiento de plantaciones, las condiciones edafoclimáticas y el material genético utilizado influyen directamente en el rendimiento de los árboles. Asimismo, la combinación de estos tres elementos definirá el éxito de una plantación forestal; por lo tanto, deben ser considerados en cualquier proyecto de producción de madera de calidad (Mollinedo *et al.*, 2016).

Para poder hacer una selección clonal de individuos, se deben realizar evaluaciones tanto fenotípicas (características físicas observables) como genotípicas. Estas últimas se logran mediante la estimación de parámetros genéticos, los cuales permiten obtener información sobre la naturaleza de la acción de los genes involucrados en la herencia de los caracteres, además de proporcionar un panorama general para realizar una selección adecuada del material genético (Genes, 2017). Los parámetros genéticos permiten identificar qué tanto influye el ambiente en la expresión genética de los genotipos; de esta manera, esta interacción es de suma importancia para realizar selecciones certeras. Un programa que facilita este conocimiento es el programa estadístico SELEGEN REML/BLUP, el cual permite la estimación de parámetros genéticos y fue desarrollado para satisfacer las demandas de los programas de mejoramiento genético. Asimismo, considera varios diseños experimentales, diseños de apareamiento, interacción genotipo x ambiente, entre otros (Resende, 2016).

En Costa Rica, diversos estudios han evaluado las características fenotípicas y genéticas de diferentes conjuntos clonales, principalmente con las especies *Tectona grandis* y *Gmelina arborea*. Badilla y Murillo (2022), en el Pacífico Seco, determinaron parámetros genéticos de un conjunto clonal de teca y lograron identificar que 19 de los genotipos estudiados obtuvieron valores significativos. A su vez, Molina *et al.* (2019), en Nicoya, bajo condiciones de suelos Vertisoles, identificaron 6 clones con características superiores en su crecimiento. Por su parte, Molina (2017), en su estudio sobre el comportamiento de clones de teca en Upala (Zona Norte), logró identificar que 4 de los genotipos evaluados obtuvieron un buen rendimiento en su volumen comercial, lo cual asegura una alta productividad para el desarrollo comercial en Upala. Todos estos estudios demuestran la importancia de realizar este tipo de evaluaciones para identificar genotipos superiores que permitan maximizar los rendimientos de una plantación.

En el presente estudio se realizó una evaluación fenotípica y genotípica de 17 clones de *T. grandis* en tres sitios de Costa Rica: San Carlos, Nicoya y Abangares, con el objetivo de identificar clones superiores en diferentes sitios y aportar a la selección preliminar de los genotipos provenientes del vivero del INISEFOR.

2. Metodología

2.1 Área de estudio

El presente estudio se realizó en tres experimentos establecidos en 2021, específicamente en sitios plantados con material clonal de la especie *Tectona grandis*. Estos fueron: San Cristóbal (sitio 1) en el cantón de San Carlos, el cantón de Nicoya (sitio 2) y Coyolar (sitio 3) en el cantón de Abangares (**Figura 1**).

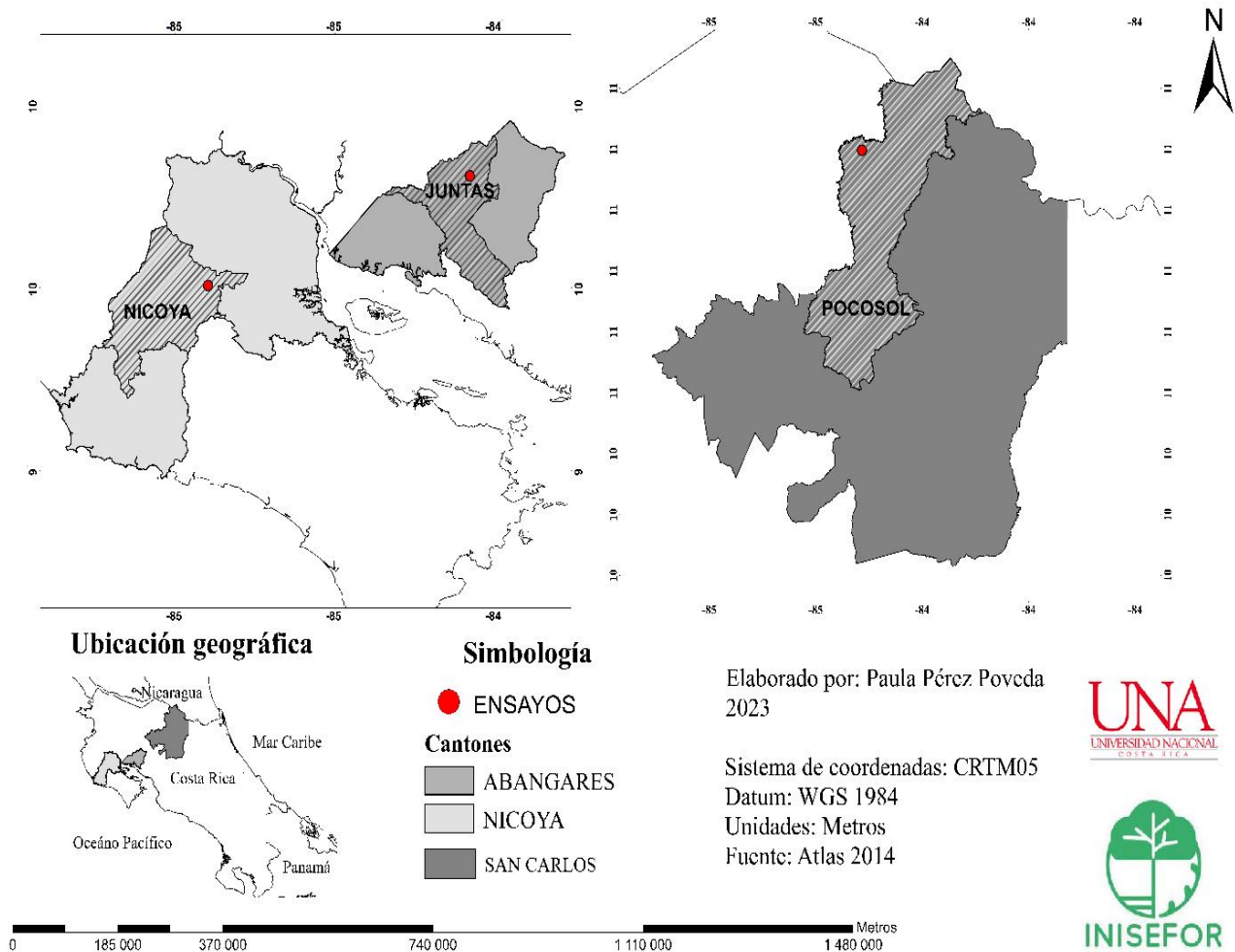


Figura 1. Ubicación de los ensayos clonales de *T. grandis* establecidos en Nicoya, Abangares y San Carlos de Costa Rica.

Figure 1. Location of *T. grandis* clonal trials established in Nicoya, Abangares and San Carlos, Costa Rica.

2.1.2 Descripción biofísica de los sitios

Con respecto a las características de los sitios, en San Carlos la gran mayoría del territorio se encuentra a una altitud que no sobrepasa los 500 msnm; asimismo, los niveles de precipitación oscilan entre los 2 000 y 3 000 mm anuales, con una temperatura media de 25 °C (Instituto de Desarrollo Rural [INDER], 2015a). El experimento establecido en este sitio se ubica específicamente en San Cristóbal de Pocosol en las coordenadas 10°49'43.810" N, 84°30'12.046" W, presenta pendientes leves y suelos rojos del orden Ultisol. Anteriormente, el sitio se utilizó para la reforestación con las especies *Gmelina arborea* Roxb. y *Acacia mangium* Willd.

Los otros dos sitios están ubicados en la provincia de Guanacaste. El segundo sitio se encuentra en Nicoya centro en las coordenadas 10°8'44"N, 85°25'49"W, con precipitaciones promedio de 2 000 mm anuales y temperaturas medias anuales entre 26 °C y 28 °C (Ministerio de Agricultura y Ganadería [MAG], 2020). El sitio es plano, con suelos del orden Alfisol. Finalmente, el tercer

sitio está en Coyolar de Las Juntas de Abangares en las coordenadas 10°18'27.648" N, 84°59'15.576" W. El promedio anual de precipitación es de 2 281 mm, con un periodo de lluvias de mayo a octubre. Tiene una temperatura promedio de 27 °C y una altitud de 150 msnm (INDER, 2015b). En ambos sitios, el suelo fue utilizado anteriormente para la actividad ganadera.

2.2 Mediciones de los experimentos

Las mediciones de crecimiento se realizaron a los 3, 6, 12 y 24 meses después del establecimiento de los árboles, y se compararon entre los sitios (San Carlos, Nicoya y Abangares).

2.2.1 Diseño experimental

Los tres experimentos se establecieron con un diseño de bloques completos al azar, con parcelas de seis árboles por tratamiento (clon). Cada experimento tiene cuatro bloques con 102 árboles cada uno (408 árboles por ensayo). En el sitio 3 (Abangares) no se incluyeron dos genotipos (clon 25 y clon 33) debido a la falta de material en el vivero de propagación clonal en el momento de la siembra.

Los seis clones fueron distribuidos en parejas de forma aleatoria dentro de los bloques, de manera que no quedaran juntos; asimismo, se plantaron con un distanciamiento de 4 m x 4 m (Figura 2). El material genético proviene del vivero de propagación clonal del INISEFOR de la Universidad Nacional, ubicado en La Amapola de Puerto Jiménez, Puntarenas, y se utilizaron 17 genotipos para este proyecto.

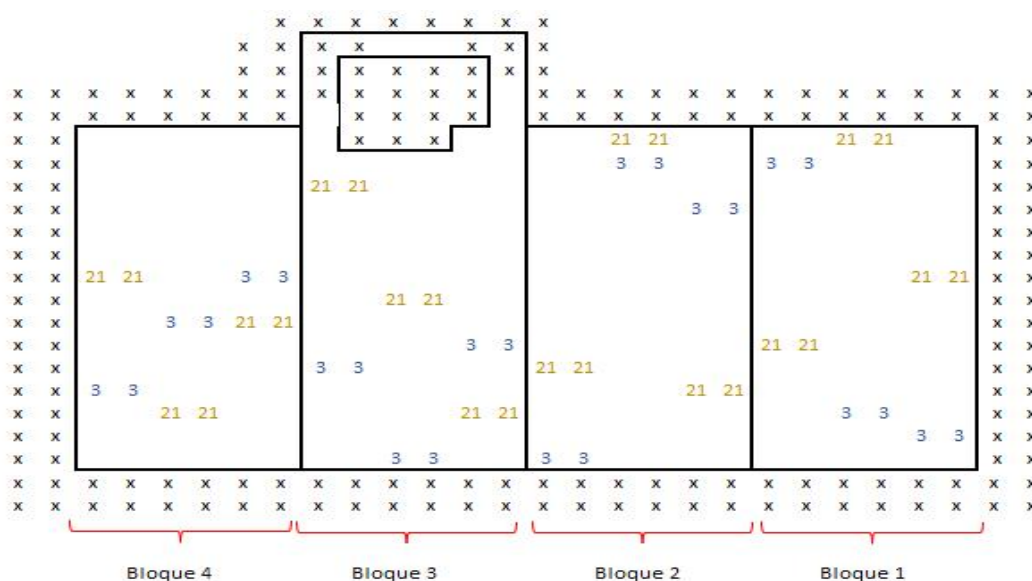


Figura 2. Diseño experimental establecido en el cantón de Abangares, Guanacaste, Costa Rica.
Figure 2. Experimental design established in the canton of Abangares, Guanacaste, Costa Rica.

2.2.2 Muestreo de suelos

Se tomaron tres muestras de suelo a una profundidad de 15 cm, una en cada sitio. Cada muestra se completó con 8 submuestras distribuidas de forma representativa (muestras compuestas).

Posteriormente, se enviaron al Laboratorio de Análisis de Suelos y Foliar del INISEFOR, donde se realizó un análisis químico completo (determinación de metales, fósforo, pH, acidez) y un análisis físico (determinación de la textura del suelo).

2.2.3 Manejo silvicultural

La información sobre el manejo silvicultural se obtuvo mediante entrevistas a los encargados de las fincas, realizadas por teléfono. Así se consultó sobre las actividades realizadas en el establecimiento y mantenimiento de la plantación hasta los 24 meses para identificar diferencias en el manejo silvicultural de los ensayos y determinar su influencia en el crecimiento de los clones.

2.2.4 Variables dasométricas

Para la toma de datos, se utilizó un formulario de campo en el que se registró la información de cada conjunto genético. Adicionalmente, se elaboró un croquis de cada ensayo para ubicar los bloques donde están situados los clones y facilitar el proceso de medición.

A continuación, se mencionan las variables medidas en cada uno de los experimentos:

Altura Total (HT): se midió la altura total de cada uno de los clones con una vara telescópica.

Diámetro a la Altura del Pecho (DAP): la medición de esta variable se llevó a cabo con una cinta diamétrica. Así pues, se tomó la medida del diámetro normal a 1.30 m de altura.

Volumen Total: se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Volumen Total (m}^3\text{)} = \text{DAP (m)}^2 * \pi/4 * \text{ht} * 0.55 \quad (\text{E.1})$$

Calidad: esta variable se calculó utilizando la metodología de Murillo y Badilla (2010), la cual consiste en evaluar la calidad individual de las cuatro primeras trozas de 2.5 metros de largo cada una con una escala de 1 a 4, donde 1 es el valor de mejor calidad. Para su cálculo, se utilizó la siguiente ecuación:

$$\text{Calidad de árbol} = T1 * 0.4 + T2 * 0.3 + T3 * 0.2 + T4 * 0.1 \quad (\text{E.2})$$

Sin embargo, para una mejor comprensión e interpretación de esta variable, se transformó el valor promedio de calidad de cada clon a una escala de 0 a 100 %. Lo anterior se realizó utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{Calidad \%} = 100 * \{1 - [(calidad - 1) / 3]\} \quad (\text{E.3})$$

Volumen con Calidad: para obtener este valor, se castigó el volumen total con corteza, multiplicándolo por el valor de calidad porcentual de cada clon.

2.3 Análisis de la información

La información se analizó considerando variables fenotípicas y genotípicas, ingresándose en una hoja de cálculo de Excel para crear una base de datos homogénea y depurada. El análisis

fenotípico jerarquizó cada clon y sitio; el análisis genético usó el software SELEGEN para generar parámetros genéticos.

2.3.1 Análisis fenotípico

Para este análisis, se crearon tres rankings fenotípicos de altura total en los sitios para identificar los clones de mejor desempeño y evaluar diferencias por sitio. Los rankings se dividieron en tres grupos de productividad (alto, medio y bajo) y se calculó la media general de cada clon por sitio y edad. También se estimó la ganancia fenotípica de cada clon tomando en cuenta DAP, altura total, calidad porcentual y volumen con calidad para San Carlos y Nicoya.

Un análisis estadístico en Infostat versión 2018 incluyó un ANOVA sobre las variables altura total, DAP, calidad y volumen con calidad, y una prueba de medias de Tukey ($\alpha = 0.05$) para evaluar diferencias significativas entre clones.

2.3.2 Análisis genético

Para el análisis genético, se utilizó el software SELEGEN versión 2016 y el método REML/BLUP (Máxima verosimilitud residual/Mejor predicción lineal imparcial). Se seleccionó el modelo 2, que incluye bloques completos al azar y clones no emparentados. La ecuación usada fue:

$$y = Xr + Zg + Wp + e \quad (\text{E.4})$$

Dónde: “y” es el vector de datos, “r” es el vector de los efectos (asumidos como fijos) de repetición sumados a la media general, “g” es el vector del efecto genético total (asumidos como aleatorios), “p” es el vector de los efectos de parcela (asumidos como aleatorios) y “e” es el vector del error o residuo (aleatorios). Las letras X, Z y W representan las matrices de incidencia para los efectos referidos. (Resende *et al.*, 2018)

Se estimaron factores como varianza genética (V_g), varianza ambiental entre parcelas (V_{parc}), heredabilidad individual en sentido amplio (h^2_g), heredabilidad media del clon (h^2_{mc}), precisión de estimación (Acclonal), coeficiente de variación genética (CV $_{gi}$ %), coeficiente de variación experimental (CV $_e$ %) y coeficiente de variación relativa (CV $_r$ %) entre otros (Resende, 2016).

3. Resultados

3.1 Características edáficas

Los análisis de suelo evidenciaron diferencias en la composición edáfica entre los sitios estudiados. En primer lugar, Nicoya mostró una alta fertilidad natural, reflejada en su capacidad de intercambio catiónico (CICE) de 26.3 $\text{cmol} \cdot \text{l}^{-1}$. En comparación, San Carlos y Abangares obtuvieron valores de CICE más bajos, con 5.7 y 5.0 $\text{cmol} \cdot \text{l}^{-1}$, respectivamente (**Cuadro 1**).

En cuanto al pH, Abangares fue el sitio con el valor más alto (5.7), seguido por Nicoya (5.5) y San Carlos con el pH más bajo (5.0). La saturación de acidez fue de 0.4 % en Nicoya, 4.4 % en San Carlos y 17.3 % en Abangares. Estos valores indican que San Carlos y Abangares presentan baja fertilidad natural debido a la acidez del suelo, lo cual podría limitar el crecimiento de la teca si no se aplican prácticas de manejo silvicultural adecuadas, como el encalado. Por otro lado, la

alta saturación de calcio en Nicoya (76.1 %) reafirma su buena fertilidad natural, seguido de Abangares con 68.8 %, mientras que San Carlos presenta un nivel más bajo con 60 %.

Otro factor edáfico relevante para el crecimiento de la teca es la concentración de fósforo. Los análisis reflejaron una deficiencia de este elemento en los tres sitios, con valores inferiores a 2.5 mg*1⁻¹ (**Cuadro 1**). El nivel óptimo para un crecimiento adecuado de teca debería ser igual o superior a 10 mg*1⁻¹ (Murillo, 2024). En cuanto a la textura del suelo, San Carlos se clasifica como arcilloso, Nicoya como arcillo-arenoso, y Abangares como franco-arenoso. Los contenidos de arcilla obtenidos en cada sitio fueron 14.3 % en Abangares, 44.3 % en Nicoya, y 53.4 % en San Carlos.

Cuadro 1. Resultados de los análisis de suelo en los tres sitios de estudio: San Carlos, Nicoya, Abangares, Costa Rica.

Table 1. Soil analysis carried out in the three study sites: San Carlos, Nicoya, Abangares, Costa Rica.

Análisis	Unidades	San Carlos	Nicoya	Abangares
pH	U.pH	5.0	5.5	5,7
Conductividad eléctrica	ms/cm	0.02	0.01	0.04
Acidez	cmol*(+) ^l -1	0.3	0.1	0.8
Calcio	cmol*(+) ^l -1	3.4	20	3.3
Magnesio	cmol*(+) ^l -1	1.9	6.1	0.5
Potasio	cmol*(+) ^l -1	0.11	0.10	0.22
Fósforo	mg*1 ⁻¹	2.4	0.7	0.8
Cobre	mg*1 ⁻¹	6.5	3.7	4
Zinc	mg*1 ⁻¹	1.2	0.77	0.98
Manganeso	mg*1 ⁻¹	17	8.1	2.4
Hierro	mg*1 ⁻¹	112	32	20
CICE	cmol*(+) ^l -1	5.7	26.3	5
Saturación de acidez	%	4.4	0.4	17.3
Saturación de Calcio	%	60.1	76.1	68.8
Textura	-	Arcilloso	Arcilloso arenoso	Franco arenoso

3.2 Manejo silvicultural

Las actividades de manejo silvicultural en el primer año de establecimiento de las plantaciones variaron entre los sitios. San Carlos recibió el manejo más intensivo, mientras que Abangares tuvo un manejo más limitado (**Cuadro 2**), omitiendo actividades importantes como la fertilización en la siembra y el encalado, a pesar de la elevada saturación de acidez del sitio. En Nicoya, se omitieron actividades como el encalado, la poda de formación y el apuntalado. Cabe destacar que el apuntalado se realizó solo en San Carlos debido a la mayor velocidad del viento. En el segundo año, en San Carlos se llevaron a cabo dos chapeas, una rodajea manual y una aplicación completa de herbicida. En Nicoya, se realizó una chapea y una rodajea manual. Finalmente, en Abangares solo se llevó a cabo una chapea con motoguadaña.

Cuadro 2. Prácticas de manejo silvicultural aplicadas en el primer año en San Carlos, Nicoya y Abangares

Table 2. Silvicultural management practices applied in the first year in San Carlos, Nicoya and Abangares.

Actividad silvicultural	San Carlos	Nicoya	Abangares
Chapea inicial	✓	✓	✓
1° Aplicación de herbicida	✓	✓	✓
Fertilización (en la siembra)	✓	✓	
Rodaja Manual	✓	✓	✓
Chapeas de mantenimiento	✓	✓	✓
2° Aplicación de herbicida	✓	✓	
Encalado	✓		
2° Fertilización	✓	✓	✓
Poda	✓		
Apuntalado	✓		

3.3 Desempeño fenotípico

El desempeño de cada clon mostró una alta variabilidad entre los sitios, lo cual sugiere la influencia de las características edáficas y las prácticas de manejo silvicultural. A los 24 meses, en San Carlos, los clones con mayor altura fueron el 20, 25, 18 y 2; en Nicoya destacaron los clones 3, 33, 25 y 49, mientras que en Abangares los más altos fueron los clones 18, 35, 38 y 39, siendo los de menor altura los clones 20, 3 y 2. Estos resultados evidencian cambios en el rendimiento de los clones según el sitio y el tiempo de evaluación, ya que en las mediciones iniciales otros clones tuvieron el mejor desempeño en altura.

En San Carlos (**Cuadro 3**), la altura promedio de los árboles a los 24 meses fue de 8.46 m, posicionándose como el sitio con el mayor crecimiento en altura (H_{prom} Nicoya= 5.55 m y H_{prom} Abangares= 2.24 m). El clon 1 se destacó en rendimiento hasta los doce meses, mostrando diferencias estadísticamente significativas con la mayoría de los clones del grupo de baja productividad; sin embargo, descendió en el ranking a los 24 meses, pasando de la primera a la sexta posición. Por su parte, el clon 20 mostró un comportamiento variable en las primeras evaluaciones, pero ocupó el primer lugar a los 24 meses, alcanzando una altura promedio de 10.29 m.

En Nicoya el clon 1 lideró en las mediciones de 3, 6 y 12 meses, ubicándose en el grupo de alta productividad, con diferencias significativas respecto a los clones 7 y 24 los cuales permanecieron en las últimas posiciones. No obstante, a los 24 meses, el clon 1 cayó a la séptima posición en el grupo de baja productividad, mientras que el clon 3 pasó del grupo de mediano desempeño en las primeras evaluaciones al primer puesto del ranking a los 24 meses (**Cuadro 4**).

En Abangares, los clones fueron notablemente afectados por las condiciones de suelo y el manejo silvicultural, lo que impactó el crecimiento del conjunto clonal. Aun así, los genotipos 35, 38 y 18 mantuvieron un rendimiento constante, ocupando las mejores posiciones en el ranking a lo largo del tiempo. Finalmente, los clones 2, 3 y 20 mostraron el menor crecimiento a los 24 meses en este sitio (**Cuadro 5**).

Cuadro 3. Ranking fenotípico para altura total (m) a la edad de 3, 6, 12 y 24 meses, San Cristóbal, San Carlos, Costa Rica.

Table 3. Phenotypic ranking for the variable total height (m) at the age of 3, 6, 12 and 24 months, San Cristóbal, San Carlos, Costa Rica.

Ranking	Edad en meses			
	3	6	12	24
1	0.81 (1) A	2.62 (1) A	6.67 (2) A	10.29 (20) A
2	0.78 (39) A	2.57 (2) AB	6.62 (1) AB	9.60 (25) AB
3	0.76 (49) AB	2.51 (38) ABC	6.18 (3) ABC	9.37 (18) AB
4	0.76 (18) AB	2.44 (49) ABC	6.06 (31) ABC	9.15 (2) ABC
5	0.74 (2) ABC	2.43 (18) ABCD	5.93 (38) ABC	9.05 (50) ABCD
6	0.73 (38) ABC	2.36 (20) ABCDE	5.88 (49) ABC	8.93 (1) ABCDE
7	0.72 (20) ABCD	2.36 (50) ABCDE	5.78 (48) ABCD	8.77 (7) BCDEF
8	0.67 (3) ABCDE	2.35 (3) ABCDE	5.74 (50) ABCD	8.62 (3) BCDEF
9	0.67 (50) ABCDE	2.28 (39) ABCDE	5.71 (39) ABCDE	8.48 (33) BCDEF
10	0.66 (48) ABCDE	2.18 (48) BCDEF	5.67 (25) ABCDE	8.15 (39) BCDEF
11	0.58 (31) BCDEF	2.18 (31) BCDEF	5.62 (20) BCDE	7.85 (21) CDEF
12	0.58 (21) BCDEF	2.17 (25) BCDEF	5.56 (18) CDE	7.77 (48) CDEF
13	0.56 (25) CDEF	2.09 (35) CDEF	5.54 (35) CDE	7.66 (35) DEF
14	0.55 (35) DEF	2.00 (7) DEFG	5.18 (21) CDEF	7.63 (31) DEF
15	0.52 (7) EF	1.99 (21) EFG	4.82 (33) DEF	7.54 (49) EF
16	0.50 (24) EF	1.84 (33) FG	4.71 (7) EF	7.52 (38) EF
17	0.43 (33) F	1.58 (24) G	4.40 (24) F	7.42 (24) F
Promedio	0.65	2.23	5.67	8.46

Alta productividad media productividad baja productividad . Las letras distintas representan diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$)

Cuadro 4. Ranking fenotípico para la variable altura total (m) a la edad de 3, 6, 12 y 24 meses, Nicoya, Costa Rica.

Table 4. Phenotypic ranking for the variable total height (m) at the age of 3, 6, 12 and 24 months, Nicoya, Costa Rica.

Ranking	Edad en meses			
	3	6	12	24
1	0.61 (1) A	1.07 (1) A	2.45 (1) A	6.09 (3) A
2	0.55 (18) AB	0.94 (38) AB	2.41 (2) A	6.08 (33) A
3	0.53 (38) AB	0.93 (49) AB	2.26 (3) AB	5.97 (25) A
4	0.52 (3) AB	0.91 (3) AB	2.14 (25) AB	5.93 (49) A
5	0.52 (33) AB	0.88 (50) AB	2.14 (33) AB	5.89 (2) A
6	0.49 (49) AB	0.87 (33) AB	2.13 (18) AB	5.76 (50) A
7	0.49 (39) AB	0.87 (18) AB	2.10 (50) AB	5.69 (1) A
8	0.47 (31) AB	0.87 (25) AB	2.07 (48) AB	5.62 (31) A
9	0.45 (21) AB	0.85 (31) AB	2.07 (35) AB	5.51 (18) A
10	0.44 (2) AB	0.82 (21) AB	2.06 (49) AB	5.41 (38) A
11	0.43 (25) AB	0.80 (2) AB	2.03 (38) AB	5.36 (39) A
12	0.42 (35) AB	0.79 (20) AB	1.98 (39) AB	5.36 (35) A
13	0.42 (50) AB	0.78 (39) AB	1.98 (31) AB	5.35 (20) A
14	0.41 (24) AB	0.74 (35) AB	1.87 (21) AB	5.34 (48) A
15	0.41 (20) AB	0.73 (48) AB	1.87 (20) AB	5.14 (21) A
16	0.35 (48) B	0.67 (24) B	1.78 (7) B	4.92 (7) A
17	0.35 (7) B	0.65 (7) B	1.73 (24) B	4.85 (24) A
Promedio	0.46	0.83	2.06	5.55

Alta productividad media productividad baja productividad . Las letras distintas representan diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$)

Cuadro 5. Ranking fenotípico para la variable altura total (m) a la edad de 3, 6, 12 y 24 meses, Coyolar, Abangares, Costa Rica.

Table 5. Phenotypic ranking for the variable total height (m) at the age of 3, 6, 12 and 24 months, Coyolar, Abangares, Costa Rica.

Ranking	Edad en meses			
	3	6	12	24
1	0.24 (35) A	0.64 (38) A	1.74 (38) A	3.02 (18) A
2	0.23 (38) AB	0.58 (35) AB	1.64 (18) AB	2.91 (35) A
3	0.22 (1) ABC	0.55 (1) ABC	1.64 (35) AB	2.87 (38) A
4	0.21 (39) ABC	0.52 (48) ABC	1.34 (31) AB	2.49 (39) A
5	0.21 (18) ABCD	0.51 (31) ABC	1.30 (48) AB	2.41 (31) A
6	0.19 (24) ABCD	0.48 (18) ABC	1.28 (49) AB	2.32 (1) A
7	0.19 (21) ABCD	0.47 (39) ABC	1.28 (39) AB	2.27 (49) A
8	0.18 (48) ABCD	0.42 (50) ABC	1.25 (1) AB	2.24 (48) A
9	0.17 (7) ABCD	0.39 (7) ABC	1.16 (7) AB	2.07 (24) A
10	0.17 (31) ABCD	0.38 (49) ABC	1.13 (50) AB	2.03 (7) A
11	0.16 (49) ABCD	0.38 (3) ABC	1.09 (20) AB	1.91 (21) A
12	0.15 (20) BCD	0.34 (21) BC	1.06 (21) AB	1.89 (50) A
13	0.14 (3) CD	0.31 (20) BC	1.06 (24) AB	1.87 (2) A
14	0.13 (50) D	0.29 (2) C	1.00 (3) AB	1.83 (3) A
15	0.13 (2) D	0.29 (24) C	0.87 (2) B	1.60 (20) A
Promedio	0.18	0.44	1.25	2.24

Alta productividad media productividad baja productividad . Las letras distintas representan diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$)

En el **Cuadro 6** se presentan las ganancias fenotípicas obtenidas sobre y bajo la media poblacional para las variables de diámetro a la altura del pecho (DAP) y altura total del conjunto clonal a los 24 meses. En San Carlos, el análisis de varianza para el DAP permitió identificar que los clones 1 y 2 mostraron diferencias estadísticamente significativas con más de la mitad del conjunto genético, obteniendo ganancias del 14.1 % y 13.3 %, respectivamente. En cuanto a la altura total, el clon 20 destacó al presentar diferencias significativas y alcanzar una ganancia del 21.6 %.

En Nicoya, el clon 2 registró una ganancia del 10.3 % en el DAP, mientras que el clon 3 lideró en altura total con una ganancia del 9.9 %, posicionándose ambos en los primeros lugares de la jerarquización. Además, el clon 24 se identificó como uno de los de menor desempeño en ambos sitios. Finalmente, la prueba de medias determinó que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los genotipos.

Cuadro 6. Ganancia fenotípica para las variables diámetro (cm) y altura total (m) para los conjuntos clonales de San Carlos y Nicoya a los 24 meses.

Table 6. Phenotypic gain for the variables diameter (cm) and total height (m) for the clonal groups of San Carlos and Nicoya at 24 months.

Diámetro (cm)						Altura total (m)					
San Carlos			Nicoya			San Carlos			Nicoya		
Clon	Media	G %	Clon	Media	G %	Clon	Media	G %	Clon	Media	G %
1	9.04 A	14.1	2	6.02 A	10.3	20	10.29 A	21.6	3	6.09 A	9.9
2	8.98 A	13.3	3	6.00 A	10.0	25	9.60 AB	13.5	33	6.08 A	9.6
3	8.69 AB	9.7	20	5.77 A	5.8	18	9.37 AB	10.8	25	5.97 A	7.6
20	8.13 ABC	2.5	50	5.67 A	4.0	2	9.15 ABC	8.2	49	5.93 A	6.9
48	7.96 BCD	0.4	1	5.67 A	3.9	50	9.05 ABCD	6.9	2	5.89 A	6.2
7	7.94 BCD	0.1	18	5.63 A	3.3	1	8.93 ABCDE	5.5	50	5.76 A	3.9
49	7.92 BCD	-0.1	33	5.59 A	2.4	7	8.77 BCDEF	3.7	1	5.69 A	2.6
50	7.92 BCD	-0.2	7	5.58 A	2.3	3	8.62 BCDEF	1.9	31	5.62 A	1.4
39	7.91 BCD	-0.3	25	5.51 A	1.1	33	8.48 BCDEF	0.2	18	5.51 A	-0.7
18	7.90 BCD	-0.4	31	5.44 A	-0.3	39	8.15 BCDEF	-3.6	38	5.41 A	-2.4
31	7.76 BCD	-2.1	49	5.37 A	-1.5	21	7.85 CDEF	-7.2	39	5.36 A	-3.4
38	7.70 CD	-2.8	48	5.16 A	-5.4	48	7.77 CDEF	-8.1	35	5.36 A	-3.4
35	7.62 CD	-3.8	38	5.15 A	-5.7	35	7.66 DEF	-9.5	20	5.35 A	-3.5
25	7.52 CD	-5.1	35	5.14 A	-5.8	31	7.63 DEF	-9.8	48	5.34 A	-3.7
21	7.40 CD	-6.7	21	5.11 A	-6.3	49	7.54 EF	-10.8	21	5.14 A	-7.2
33	7.36 CD	-7.2	39	4.98 A	-8.8	38	7.52 EF	-11.1	7	4.92 A	-11.3
24	7.03 D	-11.3	24	4.94 A	-9.5	24	7.42 F	-12.3	24	4.85 A	-12.5
Prom	7.93	-		5.46	-		8.46	-		5.55	-

G %: ganancia fenotípica porcentual. Letras distintas representan diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$).

El promedio de calidad de los árboles fue de 72 % en San Carlos y 53 % en Nicoya. En Abangares no se determinó debido al menor crecimiento de los clones en este sitio, lo cual resultó en una baja cantidad de árboles con trozas comerciales. El **Cuadro 7** muestra los promedios de calidad y volumen total de calidad en Nicoya y San Carlos, junto con las pruebas de medias y la ganancia fenotípica expresada como porcentaje por encima y por debajo de la media poblacional de cada conjunto clonal.

En cuanto a la calidad, en San Carlos el clon 20 obtuvo el mejor rendimiento, con una calidad promedio de 93 % y una ganancia en calidad de 28 % respecto a los demás clones. En contraste, los clones 48, 38, 31 y 35 presentaron menores porcentajes de calidad y ganancias negativas. En Nicoya, el clon 25 destacó con una calidad promedio de 68 % y una ganancia del 29.6 %, mostrando diferencias estadísticamente significativas ($p=0.0042$) con los clones 48, 49, 24 y 38, que ocuparon las últimas posiciones.

Con respecto al volumen total de calidad, en San Carlos los genotipos 20 y 2 sobresalieron con ganancias de 51.7 % y 47 %, respectivamente, y mostraron diferencias estadísticamente significativas con gran parte de la población clonal. Además, los clones 20, 2, 1, 3, 18, 7, 50 y 25 registraron ganancias por encima del promedio poblacional, lo que sugiere que si estos son utilizados en proyectos de reforestación se obtendrían ganancias significativas en el crecimiento de los árboles, si se plantan en sitios con condiciones similares. En Nicoya, los genotipos 3, 2, 50, 1, 33, 25, 20 y 18 lograron ganancias positivas, sin diferencias estadísticamente significativas entre los clones ($p=0.1461$).

Cuadro 7. Ganancia fenotípica para las variables calidad y volumen total de calidad para los conjuntos clonales de San Carlos y Nicoya a los 24 meses.

Table 7. Phenotypic gain for quality and total quality volume for the San Carlos and Nicoya clonal assemblages at 24 months.

Clon	Calidad %					Volumen con calidad (m ³)					
	San Carlos			Nicoya		San Carlos			Nicoya		
	Media	G %	Clon	Media	G %	Clon	Media	G %	Clon	Media	G %
20	93 A	28.1	25	68 A	29.6	20	0.028 A	51.7	3	0.007 A	35.5
50	88 AB	21.1	50	63 AB	19.3	2	0.027 A	47	2	0.007 A	29.5
18	87 AB	19.9	33	60 AB	13	1	0.025 AB	33.8	50	0.006 A	18.4
7	87 AB	19.9	20	58 AB	9.5	3	0.024 AB	30.7	1	0.006 A	17.4
25	83 ABC	15.4	1	57 AB	9	18	0.023 ABC	24.2	33	0.006 A	17.2
2	82 ABCD	13	3	56 AB	7.2	7	0.022 ABCD	19.1	25	0.006 A	12.4
3	80 ABCD	10.4	18	55 AB	4.7	50	0.022 ABCD	18.5	20	0.006 A	9.3
33	70 BCDE	-2.5	2	55 AB	4.2	25	0.021 ABCDE	14.2	18	0.006 A	3
1	70 BCDE	-2.7	21	51 AB	-2.7	39	0.017 BCDEF	-7	35	0.005 A	-2.2
39	68 BCDE	-5.3	7	51 AB	-3.4	33	0.015 CDEF	-18.8	31	0.005 A	-10.2
21	68 BCDE	-5.7	31	50 AB	-5	21	0.014 DEF	-25.3	7	0.005 A	-11
24	67 CDE	-7.8	39	50 AB	-5.4	49	0.014 DEF	-25.3	48	0.005 A	-11.3
49	62 DE	-14.5	35	48 AB	-8.5	48	0.014 DEF	-27	49	0.005 A	-14.6
48	59 E	-18	48	44 B	-16	24	0.013 EF	-31.5	21	0.004 A	-19.1
38	56 E	-22.1	49	44 B	-16.4	31	0.013 EF	-31.6	38	0.004 A	-22.5
31	56 E	-22.3	24	43 B	-17.8	35	0.012 F	-35.2	39	0.004 A	-23.4
35	53 E	-26.7	38	41 B	-21.3	38	0.012 F	-37.5	24	0.004 A	-28
Prom	72	-	-	53	-	-	0.019	-	-	0.005	-

G %: ganancia fenotípica porcentual. Letras distintas representan diferencias estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$).

3.4 Desempeño genético

Los parámetros genéticos para las diferentes edades y variables evaluadas muestran variaciones significativas entre los sitios, siendo San Carlos donde los clones manifiestan mejor su potencial genético. En este sitio, el conjunto clonal reportó los valores más altos de heredabilidad individual para la variable de altura total, con una h^2_g de 0.213 a los 24 meses (**Cuadro 8**), mientras que en Abangares fue de 0.021 y aún menor en Nicoya con un 0.002. Además, en San Carlos los datos de precisión son superiores al 90 % en todas las variables estudiadas, lo cual respalda la confiabilidad de las heredabilidades obtenidas.

Asimismo, los valores de varianza genética (Vg) y de varianza ambiental entre parcelas (Vparc) indican que, en San Carlos, el efecto genético es mayor que el ambiental. La variable de volumen total de calidad mostró la mayor expresión genética, seguida por el diámetro y, finalmente, la altura. Estos resultados sugieren que el volumen total de calidad es una variable confiable para la selección clonal, debido a que dentro de su cálculo contempla el diámetro, la altura y la calidad, lo que permite una mayor apreciación de los caracteres genéticos. Además, dicha variable fue la que obtuvo el valor más alto de heredabilidad a los 24 meses ($h^2g=0.299$), respaldado por una precisión de 95 %.

Cuadro 8. Parámetros genéticos de *Tectona grandis* en cuatro edades, para las variables altura total, diámetro a la altura del pecho (DAP) y volumen total en San Carlos, Costa Rica.

Table 8. Estimation of genetic parameters of a clonal trial of *Tectona grandis* at four ages, for the variables total height, diameter at breast height (DBH) and total volume quality in San Carlos, Costa Rica.

Altura total (m)								
Edad/meses	Vg	Vparc	h^2g	h^2mc	CVgi %	CVe %	CVr %	Precisión
3	0.01156	0.000135	0.263	0.893	16.6	11.5	1.4	0.95
6	0.06674	0.000862	0.274	0.899	11.6	7.8	1.4	0.95
12	0.32824	0.019406	0.249	0.879	10.1	7.5	1.3	0.94
24	0.58255	0.228970	0.213	0.832	9.0	8.1	1.1	0.91
Diámetro a la altura del pecho DAP (cm)								
Edad/meses	Vg	Vparc	h^2g	h^2mc	CVgi %	CVe %	CVr %	Precisión
12	0.12027	0.006467	0.187	0.839	6.6	5.8	1.1	0.92
24	0.25678	0.009906	0.231	0.898	6.4	4.3	1.5	0.95
Volumen total de calidad (m ³)								
Edad/meses	Vg	Vparc	h^2g	h^2mc	CVgi %	CVe %	CVr %	Precisión
24	0.000029	0.000007	0.299	0.887	29.0	20.7	1.4	0.94

Vg: Varianza genotípica Vparc: Varianza ambiental entre parcelas h^2g : Heredabilidad individual en sentido amplio, h^2mc : Heredabilidad media del clon, CVgi %: Coeficiente de variación genética, CVe %: coeficiente de variación experimental, CVr %: Coeficiente de variación relativa

Por su parte, Nicoya fue el sitio donde se registraron los valores más bajos de heredabilidad individual para la variable de altura total, con una h^2g de 0.002 a los 24 meses y una precisión del 20 %, lo que refleja una baja confiabilidad en la selección (**Cuadro 9**). Esta escasa heredabilidad se debe a la limitada variación en las alturas en este sitio, como se observa en el análisis de varianza (**Cuadro 4**), donde los clones presentaron un comportamiento homogéneo, sin diferencias estadísticamente significativas entre ellos ($p=0.2365$). Por lo tanto, realizar una selección genética a los 24 meses en este sitio no sería factible.

Adicionalmente, los datos de varianza genética (Vg) y de varianza ambiental entre parcelas (Vparc) en Nicoya indican que el efecto del ambiente predomina sobre la expresión genética de los genotipos en todos los caracteres evaluados (**Cuadro 9**). Esto dificulta la selección segura de las variables para llevar a cabo una selección genética.

Cuadro 9. Estimación de parámetros genéticos de un ensayo clonal de *Tectona grandis* en tres edades, para las variables altura total, diámetro a la altura del pecho (DAP) y volumen total calidad en Nicoya, Costa Rica.

Table 9. Estimation of genetic parameters of a clonal trial of *Tectona grandis* at four ages, for the variables total height, diameter at breast height (DBH) and total volume quality in Nicoya, Costa Rica.

Altura total (m)								
Edad/meses	Vg	Vparc	h ² g	h ² mc	CVgi %	CVe %	CVr %	Precisión
3	0.00161	0.005159	0.033	0.345	8.7	23.9	0.4	0.59
6	0.00357	0.012756	0.030	0.322	7.2	20.8	0.3	0.55
12	0.01256	0.046952	0.040	0.340	5.5	15.2	0.4	0.58
24	0.00493	0.247967	0.002	0.038	1.3	12.8	0.1	0.20
Diámetro a la altura del pecho DAP (cm)								
Edad/meses	Vg	Vparc	h ² g	h ² mc	CVgi %	CVe %	CVr %	Precisión
12	0.02634	0.006580	0.089	0.677	6.9	9.5	0.7	0.82
24	0.00654	0.135913	0.003	0.064	1.5	11.4	0.1	0.25
Volumen total de calidad (m ³)								
Edad/meses	Vg	Vparc	h ² g	h ² mc	CVgi %	CVe %	CVr %	Precisión
24	0.00000	0.000002	0.002	0.031	2.8	31.5	0.1	0.18

Vg: Varianza genotípica Vparc: Varianza ambiental entre parcelas h²g: Heredabilidad individual en sentido amplio, h²mc: Heredabilidad media del clon, CVgi %: Coeficiente de variación genética, CVe %: coeficiente de variación experimental, CVr %: Coeficiente de variación relativa

En Abangares, los datos de heredabilidad individual a los 24 meses fueron bajos tanto para la altura total (h²g=0.02) como para el diámetro (h²g=0.003), con precisiones del 53 % y 19 %, respectivamente. Esto refleja la escasa variabilidad en el crecimiento de los clones para ambas variables. Además, se observa que la varianza ambiental entre parcelas (Vparc) es mayor que la varianza genética (Vg) en todas las edades y variables, lo que indica una mayor influencia del ambiente sobre los clones, impidiendo que estos expresen su potencial genético. Es importante mencionar que, para este sitio, no se obtuvieron resultados para el volumen total de calidad debido al bajo desempeño de los clones, lo que imposibilitó su cálculo (**Cuadro 10**).

Cuadro 10. Estimación de parámetros genéticos de un ensayo clonal de *Tectona grandis* en cuatro edades, para las variables altura total diámetro a la altura del pecho (DAP) y volumen total de calidad en Abangares, Costa Rica.

Table 10. Estimation of genetic parameters of a clonal trial of *Tectona grandis* at four ages, for the variables total height, diameter at breast height (DBH) and total volume quality in Abangares, Costa Rica.

Altura total (m)								
Edad/meses	Vg	Vparc	H ² g	h ² mc	CVgi %	CVe %	CVr %	Precisión
3	0.00084	0.0007	0.138	0.693	16.1	21.4	0.8	0.83
6	0.00775	0.0084	0.101	0.627	20.2	31.2	0.7	0.79
12	0.03124	0.0594	0.066	0.538	14.2	26.3	0.5	0.73
24	0.04248	0.1826	0.019	0.283	9.3	29.7	0.3	0.53
Diámetro a la altura del pecho DAP (cm)								
Edad/meses	Vg	Vparc	h ² g	h ² mc	CVgi %	CVe %	CVr %	Precisión
12	0.00068	0.0037	0.001	0.028	1.3	15.9	0.1	0.17
24	0.00649	0.3590	0.003	0.035	2.9	30.7	0.1	0.19
Volumen total de calidad (m ³)								
Edad/meses	Vg	Vparc	h ² g	h ² mc	CVgi %	CVe %	CVr	Precisión
24	-	-	-	-	-	-	-	-

Vg: Varianza genotípica Vparc: Varianza ambiental entre parcelas h²g: Heredabilidad individual en sentido amplio, h²mc: Heredabilidad media del clon, CVgi %: Coeficiente de variación genética, CVe %: coeficiente de variación experimental, CVr %: Coeficiente de variación relativa.

Asimismo, en las **Figuras 3 y 4** se presentan los valores genéticos obtenidos para la variable volumen total de calidad en los sitios de San Carlos y Nicoya, junto con la línea de promedio general del conjunto genético evaluado. En San Carlos, se observa que los valores genéticos de los clones 20, 2, 1 y 3 están por encima del promedio, incluyendo sus límites inferiores. En contraste, los clones 24, 31, 35 y 38 se destacan como los que presentan un menor desempeño en volumen de calidad (**Figura 3**). En general, se concluye que aproximadamente la mitad de los clones (8 clones) en este sitio muestra un comportamiento superior, lo que sugiere que su selección podría generar una mayor productividad en futuros ciclos de reproducción.

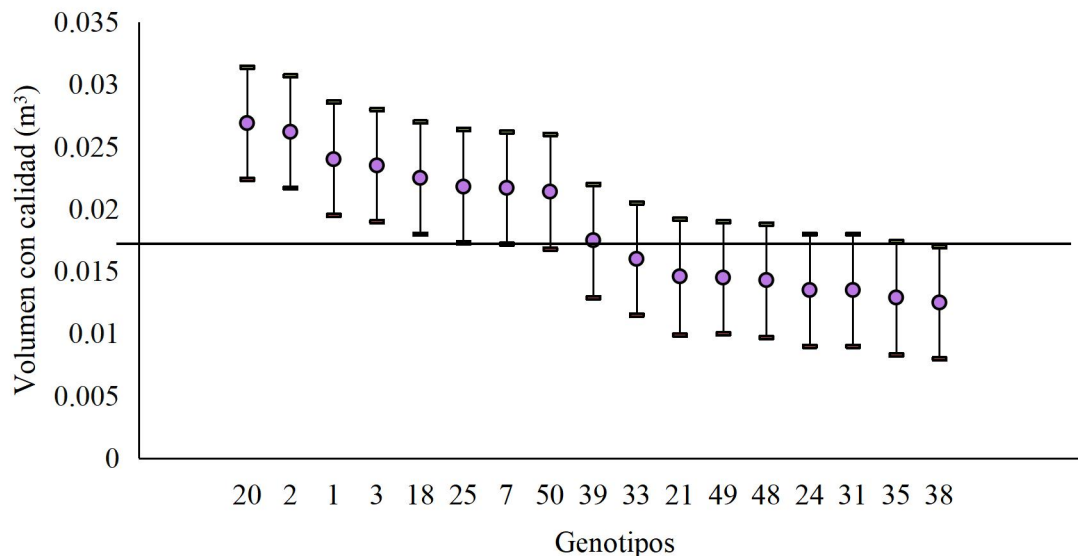


Figura 3. Valores genéticos y límites de confianza para la variable volumen total de calidad del conjunto clonal establecido en San Carlos, Costa Rica.

Figure 3. Genetic values and confidence limits for the variable total volume of quality of the clonal set established in San Carlos, Costa Rica.

Por otra parte, en Nicoya, los clones tienen un comportamiento más homogéneo en comparación con los del sitio anterior. Se identifica al clon 3 como el que muestra una superioridad en relación con todo el conjunto clonal de Nicoya; sin embargo, como se observa en la **Figura 4**, no existen diferencias importantes entre el conjunto clonal. A su vez, los valores genéticos de poco más de la mitad (9 clones) del conjunto genético se encuentran por debajo de la media general, donde los clones 24 y 39 se encuentran en las últimas posiciones.

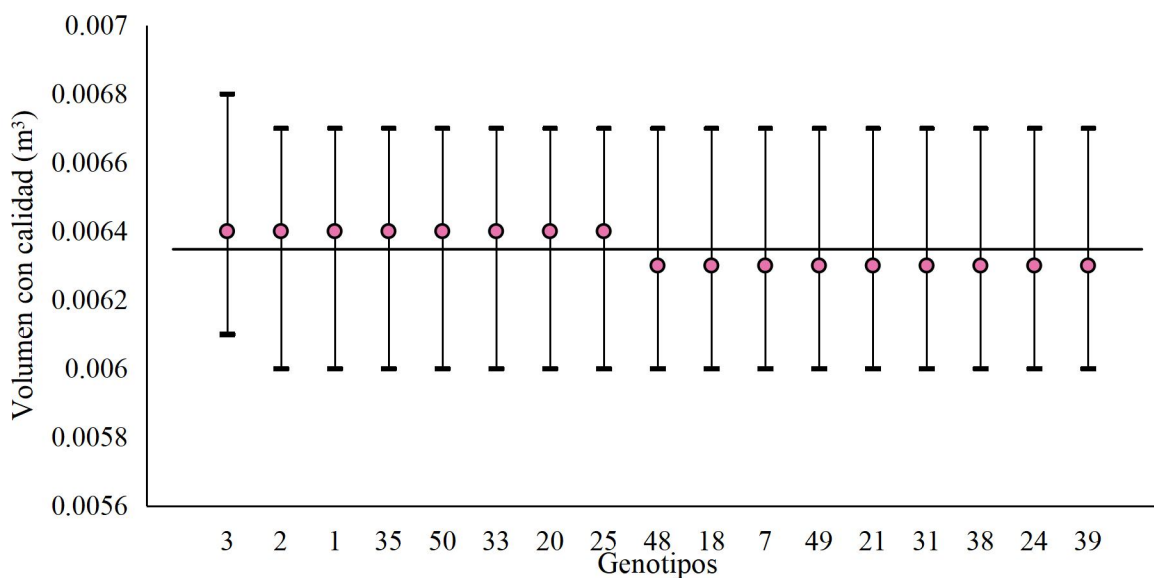


Figura 4. Valores genéticos y límites de confianza para la variable volumen total de calidad del conjunto clonal establecido en Nicoya, Costa Rica.

Figure 4. Genetic values and confidence limits for the variable total volume of quality of the clonal set established in Nicoya, Costa Rica.

4. Discusión

4.1 Edafología y manejo silvicultural

Con respecto a los suelos evaluados, estos tenían saturaciones de acidez elevadas, considerando las condiciones edáficas óptimas de la teca, con 4.4 % y 17.3 % respectivamente para San Carlos y Abangares. Según Alvarado y Fallas (2004), el crecimiento en altura de los árboles de teca se ve afectado cuando la saturación de acidez es mayor a 3 %. En el caso de San Carlos, el experimento se encuentra ubicado en suelos del orden ultisol, los cuales carecen de una alta fertilidad natural, al ser suelos rojos, con baja capacidad de intercambio de cationes, alto contenido de arcilla y tendencia a ser ácidos (Alvarado y Fallas, 2004). Por su parte, el suelo donde se encuentra establecido el ensayo de Abangares fue utilizado anteriormente para la actividad ganadera, lo que genera efectos negativos sobre el suelo afectando las propiedades químicas (disponibilidad de micro y macro nutrientes) y físicas (compactación de las capas superficiales y erosión) (Mora *et al.*, 2017; García, 2011).

Los valores de pH fueron de 5.0 en San Carlos, 5.5 en Nicoya y 5.7 en Abangares, lo que se considera moderadamente ácido. Mollinedo *et al.* (2005) indican que un pH inferior a 5.5 puede perjudicar el crecimiento de *T. grandis*, limitando la disponibilidad de nutrientes esenciales como el fósforo y ciertos cationes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+}), debido a la toxicidad generada por niveles elevados de aluminio y manganeso (Osorio, 2012).

la alta fertilidad natural del sitio Nicoya se vio reflejada en el valor de CICE con $26.3 \text{ cmol}^{+} \text{ l}^{-1}$, caso contrario en San Carlos y Abangares, los cuales reportaron valores de CICE bajos de 5 y $5.7 \text{ cmol}^{+} \text{ l}^{-1}$, respectivamente. De esta forma, se recuerda que Ugalde (2013) expresa que la sumatoria de las bases intercambiables en el suelo debe ser mayor a $10 \text{ cmol}^{+} \text{ l}^{-1}$ para un buen desarrollo de *T. grandis*. A su vez, Murillo (2024) indica que la teca crece bien en suelos con CICE mayores a $8 \text{ cmol}^{+} \text{ l}^{-1}$. La saturación de Ca fue de 76.1 % en Nicoya, 68.8 % en Abangares y 60.1 % en San Carlos; por lo tanto, se evidencia que el crecimiento de los árboles de teca aumenta significativamente cuando la Saturación de Ca es mayor a 68 % (Alvarado y Fallas, 2004).

Los niveles de fósforo fueron deficientes en todos los sitios: (San Carlos $\text{P} = 2.4 \text{ mg l}^{-1}$, Abangares $\text{P} = 0.8 \text{ mg l}^{-1}$ y Nicoya $\text{P} = 0.7 \text{ mg l}^{-1}$). Murillo (2024) indica que los niveles de fósforo deberían ser superiores a $10 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ para un desarrollo adecuado de *T. grandis*. La falta de este nutriente sugiere que la fertilización con fósforo es crucial para el crecimiento óptimo de los genotipos.

El análisis textural mostró un contenido de arcilla del 14.3 % en Abangares, 44.3 % en Nicoya y 53.4 % en San Carlos. La arcilla es importante para la retención de agua y nutrientes, aunque altas concentraciones pueden generar compactación, limitando el crecimiento radicular (Rucks *et*

al., 2004). La teca prospera en suelos con texturas medias y no superiores al 45 % de arcilla (Martínez, 2015; Murillo, 2024). De igual forma, tanto la arena como la arcilla con valores superiores al 50 %, así como valores bajos de arcilla (14.3 % en Abangares), en conjunto con otros factores limitantes como alta saturación de acidez (Sat acidez > 3 %) o baja retención de nutrientes (CICE < 8 cmol+ l⁻¹), afectan el desarrollo adecuado de la teca (Murillo, 2024; Alvarado y Fallas, 2004).

El manejo silvicultural varió entre los sitios. En San Carlos, se realizaron más prácticas como chapea, encalado, fertilización, aplicación de herbicidas y podas. El encalado y la fertilización adecuada son esenciales en suelos con alta saturación de acidez. Un estudio realizado en suelos ultisoles en la Zona Norte de Costa Rica, demostró que la aplicación de 1 kg de CaCO₃ por árbol y fertilización química aumentó el IMA en altura de árboles jóvenes de teca en un 216 % (Alvarado y Fallas, 2004).

El control de arvenses también influyó directamente en el crecimiento de los clones; en San Carlos, se implementó un control más intensivo debido a las lluvias, mientras que en Abangares las prácticas fueron mínimas, lo que resultó en un menor desarrollo de los clones. Las arvenses compiten por recursos, pudiendo reducir el crecimiento de la teca hasta un 50 % durante los primeros dos años (Singh *et al.*, 2012).

Finalmente, la poda de formación temprana es crucial para mejorar la calidad de los árboles (Arteaga, 2023). San Carlos fue el único sitio donde se realizó esta práctica, reflejándose en un crecimiento en altura superior (Hprom = 8.46 m) en comparación con Nicoya (Hprom = 5.55 m) y Abangares (Hprom = 2.24 m).

En síntesis, los resultados del análisis de suelo permitieron identificar que Nicoya es el sitio que presenta las condiciones óptimas para un buen desarrollo de *Tectona grandis*. Sin embargo, el crecimiento en altura y diámetro fue mayor en San Carlos, lo que podría deberse a una mayor incidencia de prácticas de manejo silvicultural. No obstante, esto no significa que en Nicoya los clones estén creciendo del todo mal, sino más bien que el crecimiento se ha dado de forma homogénea sin presentar mayores diferencias en el desarrollo del conjunto genético, lo cual sugiere que es necesario esperar más tiempo para que los árboles expresen su potencial genotípico.

4.2 Desempeño fenotípico

Los rankings fenotípicos en altura total muestran cómo los clones cambian de posición según la edad y el sitio. Este comportamiento se debe a la expresión genética de los clones y a la interacción genotipo × ambiente (Hernández *et al.*, 2021a; Resende *et al.*, 2018). Dividir los rankings en grupos permite identificar clones de alto rendimiento y aquellos estancados en posiciones bajas, lo que es esencial para la selección de genotipos superiores, aportando beneficios a los programas de mejoramiento genético (Hernández *et al.*, 2021a).

El efecto del sitio sobre los genotipos se ha comprobado en este estudio. San Carlos obtuvo los mejores resultados de crecimiento, con algunos genotipos mostrando alta interacción con el ambiente. El clon 20, por ejemplo, destacó en San Carlos (altura promedio de 10.29 m a los 24 meses), pero tuvo un rendimiento bajo en Nicoya (5.35 m) y Abangares (1.60 m). Esto indica que

el clon 20 se desarrolla óptimamente en condiciones específicas, sugiriendo la necesidad de dividir los programas de selección por región (Resende *et al.*, 2018).

El clon 1, en contraste, mostró un rendimiento generalista, siendo uno de los mejores hasta los 12 meses. Sin embargo, su rendimiento disminuyó notablemente a los 24 meses. Según Badilla y Murillo (2022), la evaluación prolongada es esencial para determinar la adaptación real de un clon a diferentes ambientes.

El IMA en altura y en DAP de todos los clones en San Carlos (4.1 m y 3.9 cm respectivamente) fue mayor que el IMA de las mismas variables en Nicoya (IMA HT= 2.8 m, IMA DAP= 2.7 cm) y en Abangares (IMA HT= 1.12 m), debido a una condición de manejo silvicultural y de calidad de sitio, lo cual provocó que los clones se expresaran diferente. En otros estudios relacionados con el crecimiento de clones de teca y material de semilla en Costa Rica, se han encontrado rendimientos similares y diferentes a los obtenidos en el presente estudio (**Cuadro 11**). San Carlos también obtuvo un IMA en altura y diámetro superior a los reportados por Salazar *et al.* (2024); Cortés *et al.* (2024) y Salazar y Carvajal (2022), los cuales evaluaron material clonal de teca en condiciones similares (**Cuadro 11**).

Por su parte, el IMA en DAP y en altura en San Carlos fue mayor a los reportados por Chaves (2017), superando en un 9.2 % el DAP y en un 23.1 % la altura, así como también es superior a lo obtenido por Molina, *et al.*, (2019) superando el IMA en altura en un 75 % (**Cuadro 11**). El estudio realizado por Fallas (2017) en diferentes zonas de Costa Rica, muestra una similitud con el IMA en diámetro encontrado en San Carlos. No obstante, Molina (2017) reportó un IMA en DAP de 4.8 cm, el cual supera al de San Carlos en un 25.8 %. Dichos valores obtenidos en San Carlos ratifican el buen desempeño de los clones en este sitio, lo cual es relevante para la selección.

Cuadro 11. DAP y altura total (HT) a diferentes edades e Incremento Medio Anual (IMA) en DAP y HT reportados por diversos autores para *Tectona grandis* en Costa Rica.

Table 11. DBH and total height (HT) at different ages and mean annual increment (MAI) in DBH and HT reported by various authors for *Tectona grandis* in Costa Rica.

Autor	DAP (cm)	Altura (m)	Edad (meses)	Características del sitio	Lugar	IMA DAP	IMA HT
Salazar <i>et al.</i> (2024)	7.03	7.94	24	Ensayo área óptima de control, con material clonal de teca. Los suelos son ultisoles, con pH de 5.2, CICE de 5 $\text{cmol}^*\text{l}^{-1}$ y saturación de acidez de 6 %	Pocosol, San Carlos	3.5	4.0
Cortés <i>et al.</i> (2024)	6.45	7.24	24	Ensayo de coberturas con teca clonal, Establecido en suelos rojos, con pH de 5.2, CICE de 5 $\text{cmol}^*\text{l}^{-1}$ y saturación de acidez de 6 %	Pocosol, San Carlos	3.2	3.6
Chaves (2017)	13.99	12.65	48	Ensayo experimental de teca clonal, donde se evaluó el comportamiento de 49 genotipos hasta los 4 años, en suelos planos	Costa Rica, Nicoya	3.5	3.2
Salazar y Carvajal (2023)	10.18	8.76	44.4	Plantación de teca (semilla), en suelos ultisoles, CICE de 4.9 $\text{cmol}^*\text{l}^{-1}$, un pH de 5.2 y una	Pocosol, San Carlos	2.8	2.4

				saturación de acidez del 6 %				
Salazar y Carvajal (2023)	ND	0.65	5	Plantación de teca, en suelos ultisoles, CICE de 4.9 cmol*I ⁻¹ , pH de 5.2 y una saturación de acidez del 6 %	Pocosol, San Carlos	ND	1.6	
Molina <i>et al.</i> (2019)	ND	0.68	8	Ensayo de clones de teca, establecido en suelos vertisoles con presencia de arcillas montmorillonitas, caracterizado por inundarse en época lluviosa	Nicoya, Costa Rica	ND	1.0	
Fallas (2017)	3.9	ND	12	Plantaciones clonales de teca, en diferentes condiciones de sitio	Pacífico Norte, Zona Sur y Zona Norte	3.9	ND	
Molina (2017)	12.12	ND	30	Ensayo de teca clonal, se evaluó el comportamiento de los genotipos hasta los 4.5 años de edad, en suelos inceptisoles, ácidos	Upala, San Carlos	4.8	ND	
Presente estudio	7.93	8.46	24	Ensayo clonal de teca, suelos ultisoles, con pH=5, CICE=5.7 cmol*I ⁻¹ y Sat acid=4.4 %	San Cristóbal, San Carlos	3.9	4.1	
Presente estudio	5.46	5.55	24	Ensayo clonal de teca, creciendo en suelos planos, con pH=5.5, CICE=26.3 cmol*I ⁻¹ y Sat acid=0.4 %	Nicoya	2.7	2.8	
Presente estudio	ND	2.24	24	Ensayo clonal de teca, suelos con pH=5.7, CICE=5 cmol*I ⁻¹ y Sat acid=17.3 %	Coyolar, Abangares	ND	1.1	

ND: valores no determinados.

4.3 Desempeño genético

Los resultados de los parámetros genéticos relacionados con el volumen total de calidad, la altura total y el diámetro a la altura del pecho (DAP) indican que en San Carlos existieron condiciones favorables que permitieron la expresión de los caracteres genotípicos. En cambio, en Nicoya y Abangares, las condiciones fueron adversas y variables, lo que impidió la adecuada expresión del potencial genético. Las diferencias entre los sitios se atribuyen a la variabilidad ambiental, la interacción genotipo por ambiente, el error experimental, el manejo del sitio, factores estocásticos y el efecto de microambientes en cada uno de los experimentos realizados (Ávila *et al.*, 2015).

En San Carlos, por ejemplo, los resultados del volumen total de calidad a los 24 meses indican que la variabilidad fenotípica observada está influenciada en gran medida por la variabilidad genética, con una heredabilidad en sentido amplio de 0.299 y una heredabilidad media del clon de 0.887. Esto sugiere que el 29.9 % de la variabilidad fenotípica total y el 88.7 % de la variabilidad en la media de la población se deben a factores genéticos, lo que indica una fuerte capacidad de respuesta a la selección genética. En San Carlos, el coeficiente de variación genética de 29.0 % refleja una buena disponibilidad de variabilidad genética para la mejora; además, la baja variabilidad residual de 1.4 % y la alta precisión del modelo sugieren que las estimaciones de los parámetros genéticos son muy confiables y que las predicciones son precisas (Resende *et al.*, 2018).

Por el contrario, los datos obtenidos en Nicoya a los 24 meses muestran que la variabilidad fenotípica está dominada por factores no genéticos, con una heredabilidad en sentido amplio de 0.002 y una heredabilidad media del clon de 0.031. Esto indica que solo el 0.2 % de la variabilidad fenotípica total y el 3.1 % de la variabilidad en la media de la población se deben a factores genéticos, lo que sugiere una baja capacidad de respuesta a la selección genética. El coeficiente de variación genética de 2.8 % refleja una limitada variabilidad genética, lo que dificulta la mejora mediante selección. Asimismo, el elevado coeficiente de variación experimental de 31.5 % indica una alta variabilidad debida a errores experimentales, afectando negativamente la precisión de las estimaciones. A pesar de la baja variabilidad residual de 0.1 %, la muy baja precisión del modelo (18 %) sugiere que las estimaciones de los parámetros genéticos son poco confiables y las predicciones imprecisas. En conjunto, estos resultados indican que es necesario esperar a que los clones alcancen una mayor edad para que logren expresar adecuadamente el componente genético (Badilla y Murillo, 2022; Hernández *et al.*, 2021b).

Asimismo, los valores de heredabilidad en sentido amplio y la media del clon en San Carlos para la variable volumen total de calidad son superiores a los registrados por Chaves *et al.* (2017) en conjuntos clonales de diferentes procedencias de teca ($h^2g = 0.03$ y $h^2mc = 0.56$) a edades entre 1.76 y 4.04 años en Costa Rica y Nicaragua. También son superiores a los obtenidos en volumen comercial de teca por Badilla y Murillo (2022) en el Pacífico Seco de Costa Rica, quienes registraron una heredabilidad en sentido amplio de 0.024 y una heredabilidad media del clon de 0.51. Estas diferencias sugieren que la variabilidad genética en San Carlos se expresa de manera más significativa en comparación con los demás estudios.

Finalmente, los parámetros genéticos basados en la altura total en San Carlos y Nicoya tienden a mostrar un comportamiento poco consistente en relación con el aumento de la heredabilidad media del clon, la heredabilidad media en sentido amplio y el coeficiente de variación relativa según el aumento de la edad de los árboles. Sin embargo, se observa una disminución del coeficiente de variación genética y del coeficiente de variación experimental a medida que aumenta la edad, lo cual está relacionado con la variabilidad en el desarrollo de los árboles durante las primeras etapas de crecimiento, influenciado por factores ambientales como la disponibilidad de nutrientes, agua, luz, así como la influencia de plagas y enfermedades (Molina *et al.*, 2019). Según Hernández *et al.* (2021b), la heredabilidad en sentido amplio y la media del clon tienden a aumentar conforme aumenta la edad al analizar el DAP, la altura total, la calidad de troza y el volumen comercial; no obstante, este comportamiento no se cumplió en el conjunto clonal de San Carlos y Nicoya, posiblemente debido a la corta edad de evaluación en este estudio. A pesar de esto, los resultados son similares a los registrados por Badilla y Murillo (2019), quienes calcularon parámetros genéticos para la variable calidad del fuste comercial en un ensayo clonal de 31 genotipos de *Tectona grandis* en siete mediciones en Mansión, Nicoya, desde los 3.2 hasta los 12.9 años.

4. Conclusiones

La calidad del sitio y el manejo afectó el desarrollo del diámetro y la altura de los clones, mostrando mayor crecimiento en el sitio San Carlos > Nicoya > Abangares.

Los parámetros genéticos permiten una selección temprana en el sitio San Carlos, ya que el efecto genético es mayor que el ambiental, sin embargo, es preferible esperar a que la plantación tenga mayor edad.

A la edad de 24 meses no es posible hacer una selección genética de los clones plantados en los sitios Nicoya y Abangares, debido a que el efecto ambiental es mayor que el genético.

5. Agradecimientos

Se les agradece a los productores forestales que facilitaron sus fincas para el establecimiento y mantenimiento de los ensayos establecidos en los tres cantones, así como al proyecto de UNA estrategia para el manejo de plantas ARVENSES del INISEFOR quien nos brindó un apoyo económico y logístico para la ejecución del trabajo final de graduación.

6. Ética y conflicto de intereses

Las personas autoras declaran que han cumplido totalmente con todos los requisitos éticos y legales pertinentes, tanto durante el estudio como en la producción del manuscrito; que no hay conflictos de intereses de ningún tipo; que todas las fuentes financieras se mencionan completa y claramente en la sección de agradecimientos; y que están totalmente de acuerdo con la versión final editada del artículo.

7. Contribución de la autoría

Ana Paula Pérez Poveda: diseño del estudio, recolección de datos, análisis estadístico e interpretación de resultados, preparación de manuscrito.

Rafael Ángel Murillo Cruz: diseño del estudio, recolección de datos, análisis estadístico e interpretación de resultados, preparación de manuscrito.

Fernando Ramírez Núñez: análisis estadístico e interpretación de resultados, preparación de manuscrito.

William Hernández Castro: análisis estadístico e interpretación de resultados, preparación de manuscrito.

David Antonio Carvajal Arroyo: diseño del estudio, recolección de datos, análisis estadístico e interpretación de resultados, preparación de manuscrito.

Mónica Lisbeth Cortés Cortés: diseño del estudio, recolección de datos, preparación de manuscrito.

Ana Gabriela Salazar Ruiz: diseño del estudio, recolección de datos, preparación de manuscrito.

8. Referencias

Alvarado, A y Raigosa, J. (2012). *Nutrición y fertilización forestal en regiones tropicales*. 1ed. San José, CR: Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo.

Alvarado, A y Fallas, J. (2004). La saturación de acidez y el encalado sobre el crecimiento de la teca (*Tectona grandis* L.f.) en suelos ácidos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 28, pp. 81-87. [La saturación de acidez y el encalado sobre el crecimiento de la teca \(*Tectona grandis* L.f.\) en suelos ácidos de Costa Rica \(redalyc.org\)](#)

Arteaga, A. (2023). *Manejo agronómico de plantaciones de teca (*Tectona grandis* L.) bajo sistema agroforestal en Ecuador*. [Tesis de grado, Universidad Técnica de Babahoyo]. [E-UTB-FACIAG-ING AGRON-000500.pdf](#)

Armijos, L. (2014). Modelo de negocios y fuente de financiamiento a través de un fideicomiso de inversión en el cultivo de teca. *Qualitas*, 7: pp.4-29. [04_VOLUMEN 7 Sección 3 Artículo Armijos \(researchgate.net\)](#)

- Ávila, C.; Murillo, R.; Murillo, O. y Sandoval, C. (2015). Interacción genotipo sitio para dos conjuntos clonales de *Gmelina arborea* Roxb., en sitios planos del Pacífico Sur de Costa Rica. *Revista forestal Mesoamericana Kurú*, 12(29), pp.2-14. [Vista de Interacción genotipo sitio para dos conjuntos clonales de Gmelina arborea Roxb., en sitios planos del Pacífico Sur de Costa Rica \(tec.ac.cr\)](#)
- Badilla-Valverde, Y., & Murillo-Gamboa, O. (2022). Selección clonal de *Tectona grandis* L. f. para el Pacífico seco de Costa Rica. *Uniciencia*, 36(1), pp.1-15. [Selección clonal de Tectona grandis L. f. para el Pacífico seco de Costa Rica \(scielo.sa.cr\)](#)
- Benavides, R. (2022). *Desempeño de clones de Gmelina arborea Roxb en crecimiento, calidad y susceptibilidad a la pudrición del tronco, región Huetar Norte, Costa Rica*. [Tesis para optar por el grado de Licenciatura, Universidad Nacional de Costa Rica]. [TESIS RODRIGO Firmado.pdf \(una.ac.cr\)](#)
- Barrantes, A y Ugalde, S. (2015). *Balanza comercial y principales tendencias de las exportaciones e importaciones de madera y muebles de madera en Costa Rica*. [balanza-comercial-2015.pdf \(onfcr.org\)](#)
- Camino, R y Pierre, J. (2013). *Las plantaciones de teca en América Latina: Mitos y realidades. Las plantaciones de teca en América Latina: Mitos y realidades – Oficina Nacional Forestal (ONF) (onfcr.org)*
- Chávez, M. (2017). *Comportamiento de clones de teca (Tectona grandis Linn. f.) en Costa Rica y Nicaragua*. [Tesis para optar por el grado de Licenciatura, Instituto Tecnológico de Costa Rica]. [comportamiento clones teca tectona grandis.pdf](#)
- Chavarría, S; Molina, S. (2018). ¿Por qué no incrementa el consumo de madera local? El caso de Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 15(37), pp.02-14. [2215-2504-kuru-15-37-2.pdf \(scielo.sa.cr\)](#)
- Cortés, M; Murillo, R; Carvajal, D; Salazar, A; Ramírez, F; Rigg, P; Pérez, A y Herrera, F. Efecto de las coberturas *Crotalaria juncea* L., *Pueraria phaseoloides* (Roxb.) Benth. Y *Vigna radiata* (L.) R. Wilczek en el manejo de plantas arvenses de una plantación de *Tectona grandis* L.f. en Pocosol de San Carlos, Costa Rica. (*Artículo científico en proceso de publicación*). Universidad Nacional de Costa Rica, Heredia, Costa Rica.
- Fallas, J. (2017). *Funciones alométricas, de volumen y de crecimiento para clones de teca (Tectona grandis L.f) en Costa Rica*. [Tesis para optar por el grado de Maestría, Instituto Tecnológico de Costa Rica]. [funciones-alometricas-volumen-crecimiento-para-clones-teca.pdf](#)
- García, E. (2011). *Evaluación del impacto del uso ganadero sobre suelo y vegetación en el Sistema Agroforestal Quesungual (SAQ) en el sur de Lempira, Honduras*. [Tesis para optar por el grado de maestría, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza]. [5 \(catie.ac.cr\)](#)
- Genes, P. (2017). *Parámetros genéticos de propiedades físicas y mecánicas de la madera de Pinus elliottii var. elliottii Engelmann*. [Tesis para optar por el grado de maestría, Universidad Nacional de Misiones]. [INTA_CRCorrientes_EEABellaVista_Genes_PY_Parámetros_genéticos_madera_Pinus_elliottii.pdf](#)
- Hernández, W; Murillo, O y Badilla, Y. (2021a). Estimación de parámetros genéticos de *Gmelina arborea* Roxb. (melina) en el Caribe de Costa Rica. *Uniciencia*. 35(1). pp. 352-366.

- [Estimación de parámetros genéticos de *Gmelina arborea* Roxb. \(melina\) en el Caribe de Costa Rica \(redalyc.org\)](#)
- Hernández, W; Murillo, O y Badilla, Y. (2021b). Selección temprana de ensayos clonales de melina (*Gmelina arborea* Roxb.) en Costa Rica. *Agronomía mesoamericana*. 32(1):93-106. [Selección temprana en ensayos clonales de melina \(*Gmelina arborea* Robx.\) en Costa Rica I \(redalyc.org\)](#)
- INDER [Instituto de Desarrollo Rural de Costa Rica]. (2015a). *Informe de Caracterización Básica Territorio San Carlos-Peñas Blancas-Río Cuarto. Caracterización-San-Carlos-Penas-Blancas-Rio-Cuarto*. [Caracterizacion-San-Carlos-Penas-Blancas-Rio-Cuarto.pdf \(inder.go.cr\)](#)
- INDER [Instituto de Desarrollo Rural de Costa Rica]. (2015b). *Informe de Caracterización Básica Territorio Abangares-Cañas-Bagaces-Tilarán. Caracterizacion-Abangares-Canas-Bagaces-Tilaran*. [Caracterizacion-Abangares-Canas-Bagaces-Tilaran.pdf \(inder.go.cr\)](#)
- INEC [Instituto Nacional de Estadísticas y Censos]. (2021). *Encuesta Nacional Agropecuaria 2019 resultados generales de la actividad agrícola y forestal*. [reagropecenaagricola2020.pdf \(inec.cr\)](#)
- MAG [Ministerio de Agricultura y Ganadería]. (2020). *Caracterización del área de influencia de la agencia de extensión agropecuaria*. [CARACTERIZACION-AEA-NICOYA.pdf \(mag.go.cr\)](#)
- Martínez, H. (2015). *Teca (*Tectona grandis* L. f.): condiciones para su cultivo “Fomento de la reforestación comercial para la mejora y conservación de las reservas de carbono”*. [ff_5_teca.pdf \(onfcr.org\)](#)
- Meza-Picado, V., Alfaro-Jiménez, K., Bedoya-Arrieta, R., Romero-Mora, M., Valerio-Madrigal, A. y Montenegro-Salas, P. (2019). *Reforestación comercial en costa rica, Regiones Huetar Atlántica, Huetar Norte y Chorotega*. Heredia, Costa Rica: 1a. ed. UNA/INISEFOR. [reforestacion_comercial.pdf \(fonafffo.go.cr\)](#)
- Molina, F. (2017). *Comportamiento de clones de teca (*Tectona grandis* Linn.) a los 4,5 años en Upala, Zona Norte de Costa Rica*. [Tesis para optar por el grado de Licenciatura, Instituto Tecnológico de Costa Rica]. [153541482.pdf \(core.ac.uk\)](#)
- Molina-Quesada, S., Alfaro, C., Murillo, O., Badilla, Y., & Luján, R. (2019). Evaluación del comportamiento de clones de *Tectona grandis* L. f. en suelos vertisoles de la Península de Nicoya, Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 16(38), pp. 24-34. [Evaluación del comportamiento de clones de *Tectona grandis* L. f. en suelos vertisoles de la Península de Nicoya, Costa Rica. \(scielo.sa.cr\)](#)
- Mollinedo García, M. S., Herrera Machuca, M. Ángel, & Muñoz Sáez, F. (2016). Caracterización del crecimiento de plantaciones jóvenes de teca (*Tectona grandis* Linn f.) y estimación de curvas de índice de sitio en el área septentrional de la República de Guatemala. *Madera Y Bosques*, 22(2), pp. 89–103. <https://doi.org/10.21829/myb.2016.2221327>
- Mollinedo, M; Ugalde, L; Alvarado, A; Verjans, J y Carles, L. (2005). Relación suelo-árbol y factores de sitio, en plantaciones jóvenes de teca (*Tectona grandis*), en la zona oeste de la Cuenca del Canal de Panamá. *Agronomía Costarricense*. 29(1). [06-MOLLINEDO-Rel.indd \(mag.go.cr\)](#)

- Mora Marín, M. A., Ríos Pescador, L., Ríos Ramos, L., y Almario Charry, J. L. (2017). Impacto de la actividad ganadera sobre el suelo en Colombia. *Ingeniería Y Región*, 17, pp.1–12. <https://doi.org/10.25054/22161325.1212>
- Murillo, R. (29 de julio del 2024). Comunicación personal.
- Murillo, O. y Badilla, Y. (2010). *Calidad de la plantación forestal* (Información sin publicar). Escuela de Ingeniería Forestal-ITCR. Cartago, Costa Rica.
- Osorio, W. (2012). pH del suelo y disponibilidad de nutrientes. *Manejo Integral del Suelo y Nutrición Vegetal*, 1(4). [1 4 pH del suelo y nutrientes \(bioedafologia.com\)](#)
- Resende, M. (2016). Software Selegen-REML/BLUP: a useful tool for plant breeding. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 16, pp. 330 -339. <https://doi.org/10.1590/1984-70332016v16n4a49>
- Resende, M; Murillo, O y Badilla, Y. (2018). *Genética cuantitativa y selección en el mejoramiento forestal*. 1ed. Cartago Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Rucks, L; García, F; Kaplán, A; Ponce, J y Hill, M. (2004). *Propiedades Físicas del Suelo*. [1 \(pbworks.com\)](#)
- Salazar, A y Carvajal, D. (2023). *Determinación de los flujos de emisión y absorción de gases de efecto invernadero generados en plantaciones de Tectona grandis L.f y Gmelina arborea Roxb en la Región Huetar Norte de Costa Rica* [Tesis para optar por el grado de licenciatura, Universidad Nacional de Costa Rica] [TFG David Carvajal y Ana Salazar.pdf \(una.ac.cr\)](#)
- Salazar, A; Herrera, F; Murillo, R; Cortés, M; Carvajal, D; Ramírez, F Pérez, A. Determinación del área óptima de control de plantas competidoras en plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f., en Pocosol, San Carlos, Costa Rica. (*Artículo científico en proceso de publicación*). Universidad Nacional de Costa Rica, Heredia, Costa Rica.
- Ugalde, L. (2013). *Teak: New trends in silviculture, commercialization and Wood utilization*. 1ed, Cartago, CR: International Forestry and Agroforestry.
- Vaides, E. (2004). *Características de sitio que determinan el crecimiento y productividad de teca (Tectona grandis L. f.), en plantaciones forestales de diferentes regiones en Guatemala*. [Tesis para optar por el grado de maestría, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza]. Turrialba, Costa Rica. [Microsoft Word - TESIS FINAL EDWIN VAIDES.doc \(catie.ac.cr\)](#)
- Ypushima, A; Salcedo, E; Córdova, K; Galvan, O y Velazco, E. (2022). *Nutrición y crecimiento inicial de teca (Tectona grandis) en México*. [PDF visualización del fichero NUTRICIÓN Y CRECIMIENTO INICIAL DE TECA \(Tectona grandis\) EN MÉXICO.pdf \(unat.edu.pe\)](#)

Este preprint fue presentado bajo las siguientes condiciones:

- Los autores declaran que son conscientes de que son los únicos responsables del contenido del preprint y que el depósito en SciELO Preprints no significa ningún compromiso por parte de SciELO, excepto su preservación y difusión.
- Los autores declaran que se obtuvieron los términos necesarios del consentimiento libre e informado de los participantes o pacientes en la investigación y se describen en el manuscrito, cuando corresponde.
- Los autores declaran que la preparación del manuscrito siguió las normas éticas de comunicación científica.
- Los autores declaran que los datos, las aplicaciones y otros contenidos subyacentes al manuscrito están referenciados.
- El manuscrito depositado está en formato PDF.
- Los autores declaran que la investigación que dio origen al manuscrito siguió buenas prácticas éticas y que las aprobaciones necesarias de los comités de ética de investigación, cuando corresponda, se describen en el manuscrito.
- Los autores declaran que una vez que un manuscrito es postado en el servidor SciELO Preprints, sólo puede ser retirado mediante solicitud a la Secretaría Editorial deSciELO Preprints, que publicará un aviso de retracción en su lugar.
- Los autores aceptan que el manuscrito aprobado esté disponible bajo licencia [Creative Commons CC-BY](#).
- El autor que presenta el manuscrito declara que las contribuciones de todos los autores y la declaración de conflicto de intereses se incluyen explícitamente y en secciones específicas del manuscrito.
- Los autores declaran que el manuscrito no fue depositado y/o previamente puesto a disposición en otro servidor de preprints o publicado en una revista.
- Si el manuscrito está siendo evaluado o siendo preparando para su publicación pero aún no ha sido publicado por una revista, los autores declaran que han recibido autorización de la revista para hacer este depósito.
- El autor que envía el manuscrito declara que todos los autores del mismo están de acuerdo con el envío a SciELO Preprints.