



DESARROLLO EN CAMPO DE *SWIETENIA MACROPHYLLA* KING PROPAGADA *IN VITRO*: EVALUACIÓN COMPARATIVA CON PROPAGACIÓN CONVENCIONAL

FIELD DEVELOPMENT OF *IN VITRO* PROPAGATED *SWIETENIA MACROPHYLLA* KING: COMPARATIVE EVALUATION WITH CONVENTIONAL PROPAGATION

OSVALDO C. LUPUPO CALDERIN, RAÚL COLLADO LÓPEZ,
ARMANDO SOLANO CABRERAS, ROBERTO CRUZ MOREJÓN

Unidad Científico Tecnológica de Base Estación Experimental Agro-Forestal Placetas, Villa Clara, Cuba

*Autor para correspondencia: lupupo.calderin@gmail.com

RESUMEN

La conservación de *Swietenia macrophylla*, especie amenazada por la sobreexplotación y la baja germinación de semillas, es crucial para la biodiversidad y la industria maderera. Este estudio evaluó el desarrollo en campo de plantas de *Swietenia* propagadas *in vitro* mediante embriogénesis somática, comparándolas con plantas propagadas convencionalmente. Se utilizaron 498 individuos (31 *in vitro* y 467 convencionales) plantados en la Estación Experimental Agro-Forestal Placetas, Cuba, bajo un diseño de medidas repetidas. Se midieron variables morfológicas (altura, diámetro, número de tallos) y supervivencia durante 14 meses. Los resultados mostraron que las plantas *in vitro* superaron a las convencionales en altura (4,10 vs. 3,85 cm) y diámetro (0,24 vs. 0,01 cm), con una tasa de supervivencia significativamente mayor (81% vs. 66%). Los análisis no paramétricos (Kruskal-Wallis) confirmaron diferencias significativas ($p < 0,05$) en el crecimiento a partir del segundo mes. Se concluyó que la propagación *in vitro* produce plantas más vigorosas y adaptadas, siendo una estrategia viable para la conservación de la especie.

Palabras clave: embriogénesis somática, micropropagación, crecimiento radial, conservación, Meliaceae

ABSTRACT

The conservation of *Swietenia macrophylla*, a species threatened by overexploitation and low seed germination, is crucial for biodiversity and the timber industry. This study evaluated the field development of *Swietenia* plants propagated *in vitro* by somatic embryogenesis, comparing them with conventionally propagated plants. A total of 498 individuals (31 *in vitro* and 467 conventional) were planted at the Placetas Agro-Forestry Experimental Station, Cuba, under a repeated measures design. Morphological variables (height, diameter, number of stems) and survival were measured over 14 months. The results showed that the *in vitro* plants outperformed conventional plants in height (4.10 vs. 3.85 cm) and diameter (0.24 vs. 0.01 cm), with a significantly higher survival rate (81% vs. 66%). Nonparametric analyses (Kruskal-Wallis) confirmed significant differences ($p < 0.05$) in growth from the second month onwards. It was concluded that *in vitro* propagation produces more vigorous and adapted plants, making it a viable strategy for species conservation.

Keywords: somatic embryogenesis, micropropagation, radial growth, conservation, Meliaceae

INTRODUCCIÓN

En Cuba son escasos los estudios que evalúan el comportamiento de plantas de *Swietenia* propagadas *in vitro*, particularmente en condiciones de campo. Según (Collado et al., 2006, 2010), *Swietenia* es un género que pertenece a la

familia Meliaceae y está ampliamente distribuido en los Neotrópicos. Su rango geográfico abarca desde el sur de Florida y el Caribe hasta México, América Central y regiones de Sudamérica, que incluye Bolivia, Brasil y Paraguay. Este género comprende más de cuarenta especies, con árboles que pueden alcanzar alturas entre 20 y 45 metros.

Recibido: 20/2/2025

Aceptado: 01/4/2025

Conflicto de intereses: Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Conceptualización: Osvaldo Celestino Lupupo Calderin y Raúl Collado López. **Conservación de datos:** Roberto Cruz Morejón. **Análisis formal:** Osvaldo Celestino Lupupo Calderin. **Investigación:** Osvaldo Lupupo Calderin. **Metodología:** Osvaldo Celestino Lupupo Calderin y Raúl Collado López. **Administración de proyecto:** Armando Solano Cabreras. **Supervisión:** Armando Solano Cabreras y Raúl Collado López. **Visualización:** Osvaldo Celestino Lupupo Calderin. **Redacción - revisión y edición:** Osvaldo Celestino Lupupo Calderin



Este artículo se encuentra bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial (CC BY-NC 4.0). <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



La explotación intensiva de la madera de caoba (*Swietenia*, Meliaceae) ha provocado una disminución significativa de sus poblaciones naturales. Su madera es altamente valorada por su dureza, resistencia, belleza y calidad, lo que la hace preferida en la industria del mueble (Azad & Matin, 2015). El manejo inadecuado de los recursos naturales durante las últimas décadas ha acelerado la pérdida de estas poblaciones (Maruyama, 2009; Lamb, 1966). Además, la propagación convencional mediante semillas enfrenta limitaciones debido a su baja tasa de germinación (Schottz et al., 2007) y a plagas como el barrenador de los brotes, considerado el insecto más perjudicial para las Meliaceae (Maruyama, 2009).

Debido a su estado de amenaza, *Swietenia* ha sido incluida en el Apéndice II de la Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres (CITES) (Pérez Flores et al., 2012; Maruyama, 2009). Esta clasificación refuerza la necesidad de desarrollar métodos de conservación y propagación más eficientes. Ante esta situación, resulta prioritario explorar alternativas biotecnológicas que permitan su preservación.

En este contexto, técnicas avanzadas como la embriogénesis somática (ES) adquieren relevancia. Esta técnica permite la regeneración de plantas a partir de células somáticas, de forma que genera embriones similares a los cigóticos sin fusión de gametos. La organización bipolar resultante no mantiene conexión vascular con el tejido parental, lo que garantiza una clonación exacta del genotipo donante (Martin, 2017).

La base de la embriogénesis somática radica en la capacidad de células, tejidos u órganos competentes para responder a estímulos químicos y ambientales específicos. Aunque existen diversos protocolos para la ES en caoba, muchos carecen de análisis histológicos o bioquímicos detallados de los callos formados (Collado et al., 2006, 2010). Por ello, es fundamental profundizar en estos aspectos para optimizar los procesos de regeneración.

El presente estudio tiene como objetivo evaluar el desarrollo en condiciones de campo de plantas de *Swietenia macrophylla* King propagadas *in vitro*. Además, se compararán con plantas propagadas mediante métodos convencionales para determinar su viabilidad y adaptación. Este enfoque contribuirá a establecer estrategias más efectivas para la conservación de la especie.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La investigación se desarrolló en la Estación Experimental Agro-Forestal Placetás, situada en la finca Victoria, dentro del poblado de Oliver, al oeste del municipio Placetás, provincia de Villa Clara, Cuba. La zona presenta un clima tropical húmedo de sabana, con un régimen de lluvias más intenso entre mayo y agosto, aunque en años recientes se han

registrado variaciones climáticas significativas. La topografía es predominantemente llana, con una precipitación media anual de 1200 mm, una temperatura promedio de 25,1 °C, una humedad relativa del 82 % y una pendiente promedio del 5 %.

El suelo predominante corresponde al tipo Pardo sialítico mullido. El horizonte A exhibe una estructura nuciforme granular, con una saturación por bases igual o superior al 50 % y un espesor de 10 cm. Por su parte, el horizonte B presenta un contenido de arcilla igual o inferior al del horizonte A, una capacidad de intercambio catiónico mayor a 30 cmol⁺ Kg⁻¹ de arcilla y un contenido de hierro libre menor al 3 %. Además, la relación hierro libre/hierro total es inferior al 40 %, con predominio de minerales tipo 2:1 en la fracción arcillosa, lo que genera agregados gruesos y estables.

Procedimiento experimental

Las plantas de *Swietenia macrophylla* King utilizadas en el estudio provinieron de semillas extraídas de frutos de un árbol identificado en la Estación Experimental Agro-Forestal Placetás, según consta en el expediente botánico correspondiente. Se trabajó con dos tipos de material vegetal: plantas propagadas *in vitro* mediante embriogénesis somática a partir de embriones cigóticos inmaduros, según el protocolo de Collado et al. (2024), y plantas propagadas de forma convencional a partir de semillas germinadas directamente.

Los clones de plantas propagadas *in vitro* se distribuyeron aleatoriamente en el terreno. Cada clon estuvo representado por 25 individuos, los cuales se sembraron con un espaciamiento de 3 × 3 metros. Se evaluaron descriptores morfológicos como la altura de la planta (medida desde el cuello de la raíz hasta la yema apical con cinta métrica), el diámetro del tallo (registrado a 15 cm del cuello de la raíz mediante un pie de rey), el número de tallos y la cantidad de plantas supervivientes.

Las plantas propagadas *in vitro* se identificaron con etiquetas plásticas amarillas. En total, se plantaron 467 individuos de propagación convencional y 31 de propagación *in vitro*, cubriendo un área de 0,65 ha, lo que sumó un total de 498 plantas evaluadas.

Actividades de manejo

Antes y después de la plantación, se realizaron diversas labores de preparación y mantenimiento. Estas incluyeron la instalación de un cerco perimetral con piña, la limpieza y chapea del área, y la recepción de las posturas. Además, se efectuó la roturación y surcado del terreno, junto con el marcaje y preparación de los hoyos de plantación.

Posteriormente, se aplicó materia orgánica en dos etapas distintas para enriquecer el suelo. Finalmente, se llevó a cabo la plantación de los individuos, seguida de actividades de mantenimiento como ruedos y guataqueo para asegurar el establecimiento adecuado de las plantas.

Diseño experimental

Se empleó un diseño de medidas repetidas con dos grupos experimentales: plantas propagadas *in vitro* y plantas propagadas de manera convencional. Para cada grupo se seleccionaron aleatoriamente 25 individuos, lo que resultó en una muestra total de 50 plantas, equivalente al 7 % de la población total. Las evaluaciones se llevaron a cabo en cinco momentos distintos durante el estudio.

A los 3 meses se realizó la identificación de las plantas, el conteo de supervivencia y el cálculo del área plantada. A los 4 meses se repitió el conteo de supervivencia y se midieron la altura, el diámetro y el número de tallos. Estas mismas mediciones se repitieron a los 8 meses.

A los 12 meses se registró nuevamente la supervivencia y se evaluaron las características morfológicas. Finalmente, a los 14 meses se contabilizaron las plantas muertas y se determinó el área lograda.

Análisis estadístico

En primer lugar, se verificaron los supuestos de normalidad de los residuos mediante la prueba de Shapiro & Wilk (1965) y la homogeneidad de varianzas con el test de Levene (1960). Dado que no se cumplieron estos supuestos, se optó por utilizar análisis no paramétricos. Para las variables de altura y diámetro del tallo, se aplicó la metodología descrita por Gómez et al. (2019).

La correlación de Pearson permitió confirmar la asociación entre las mediciones realizadas en diferentes tiempos dentro de la misma unidad experimental. Además, se evaluó el supuesto de esfericidad mediante el estadístico de Mauchly (Pérez & Medrano, 2010; Acosta-Amaya & Sánchez Escudero, 2015). Cuando este supuesto no se cumplió, se realizaron ajustes con los métodos de Greenhouse & Geisser (1959) y de Huynh & Feldt (1976).

Para optimizar la estimación de los parámetros del modelo, se compararon distintas estructuras de varianza-covarianza: no estructurada (UN), Toeplitz (TOEP), autorregresiva de primer orden (AR(1)), simetría compuesta (CS) y componentes de varianza (CV). La selección de la estructura más adecuada se basó en los criterios de información de Akaike (AIC), Akaike corregido (AICC) y Bayesiano (BIC).

Se utilizaron modelos lineales generalizados mixtos (GLMM), cuya expresión fue:

$$v_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + b_k + e_{ijk}$$

Donde:

y_{ijk} = variable respuesta (altura y diámetro de la planta)

μ = media común o intercepto

α_i = efecto fijo del i -ésimo tratamiento (tipos de siembra *in vitro* y natural ($i=1, 2$))

β_j = efecto fijo del j -ésimo mes ($j= 1, \dots, 4$)

b_k = efecto aleatorio de la k -ésima unidad experimental planta ($k= 1, \dots, n$)

e_{ijk} = error aleatorio asociado a todas las observaciones

La estimación de parámetros se realizó mediante el método de Máxima Verosimilitud Restringida (REML). Para la comparación de medias se aplicó la dócima de Bonferroni (1936), con un nivel de significancia establecido en $p < 0,05$. El ajuste de los modelos se llevó a cabo mediante la aproximación de Laplace, incluida en el procedimiento GLIMMIX del software SAS (Gualdrón, 2009; Vallejo et al., 2014).

El procesamiento estadístico se ejecutó con los siguientes paquetes informáticos: SAS versión 9.3 (SAS, 2013), IBM SPSS Statistics versión 26 (2019) e InfoStat versión 0.1 (2012). Estos programas permitieron realizar los análisis con precisión y eficiencia. Cada uno de ellos se seleccionó por su capacidad para manejar los requerimientos específicos del estudio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Dado que se compararon dos grupos en distintos momentos y se midieron múltiples variables, se recomendó emplear un análisis de varianza de medidas repetidas (ANOVA-RM), siempre que los datos siguieran una distribución normal. En caso de que no se cumpliera el supuesto de normalidad, se utilizaría una prueba no paramétrica alternativa (Field, 2024). Esta decisión metodológica permitió garantizar la validez de los resultados obtenidos.

Para evaluar la normalidad de los datos, se aplicó la prueba de Shapiro-Wilk en el programa SPSS, analizando cada variable por separado según el grupo (*in vitro* y natural) y la medición (Medición 1, 2 y 3). Dado que el tamaño de la muestra en cada combinación de variable y grupo fue menor a 50, esta prueba resultó la más adecuada (Razali & Wah, 2011). Los resultados de este análisis se presentan detalladamente en la Tabla 1.

En la variable altura, varios subconjuntos mostraron valores de $p < 0.05$, lo que indicó una distribución no normal. Este patrón fue especialmente evidente en la segunda y tercera medición de las plantas *in vitro*, así como en todas las mediciones de las plantas de propagación convencional. Estos hallazgos justificaron la necesidad de considerar métodos alternativos de análisis.

Respecto al diámetro, la mayoría de los datos siguieron una distribución normal, excepto en la segunda medición de ambos grupos, donde se obtuvo $p < 0.05$. Esta excepción sugirió que, para este momento específico, los datos no cumplieran con el supuesto de normalidad. Sin embargo, el resto de las mediciones sí fueron adecuadas para análisis paramétricos.

En el caso de la variable número de tallos, el grupo natural presentó valores constantes, lo que imposibilitó realizar una prueba de normalidad confiable. Por el contrario, en el grupo *in vitro*, la prueba de Shapiro-Wilk arrojó un valor de $p = 0.0$, lo que confirmó una distribución no normal. Esta discrepancia entre grupos reforzó la necesidad de adoptar un enfoque no paramétrico.

Tabla 1. Prueba de Normalidad

Parámetro	Grupo	Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.
Altura1	<i>in vitro</i>	,948	25	,227
	Natural	,909	25	,029
Diametro1	<i>in vitro</i>	,933	25	,100
	Natural	,950	25	,249
Altura2	<i>in vitro</i>	,818	25	,000
	Natural	,912	25	,033
Diametro2	<i>in vitro</i>	,894	25	,014
	Natural	,893	25	,013
Altura3	<i>in vitro</i>	,818	25	,000
	Natural	,880	25	,007
Diametro3	<i>in vitro</i>	,922	25	,058
	Natural	,939	25	,137
Tallos	<i>in vitro</i>	,445	25	,000
	Natural		25	

Debido a que varios subconjuntos de datos violaron el supuesto de normalidad (Tabla 1), se optó por emplear un método no paramétrico para el análisis de medidas repetidas, en lugar del ANOVA-RM (Gibbons & Chakraborti, 2014). Esta decisión aseguró que el análisis estadístico fuera robusto y adecuado para las características de los datos obtenidos.

En las Tablas 2 y 3 se presentan los coeficientes de correlación de Pearson correspondientes a las variables evaluadas. Los valores obtenidos oscilaron entre 0.88 y 1.00, lo que demuestra la presencia de un efecto residual tanto en la altura como en el diámetro durante los meses analizados. Estos resultados indican que el desarrollo de los individuos se mantuvo relativamente estable entre las mediciones realizadas.

Para el caso de la altura (Tabla 2), la primera medición no mostró correlación significativa. A partir de la segunda evaluación, se detectaron correlaciones cercanas a la perfección. Este comportamiento sugiere que, con el tiempo, la altura de las plantas alcanza un estado de estabilidad y presenta un crecimiento uniforme entre los individuos.

Respecto al diámetro (Tabla 3), se identificó una correlación significativa desde la primera medición. Esto implica que la variabilidad en dicha variable fue mínima desde el inicio del experimento. Además, esta tendencia se mantuvo constante a lo largo del periodo de estudio.

Comportamiento de las medias

Al analizar las medias por tratamiento para cada variable (Tabla 4), se determinó que las plantas propagadas *in vitro* tuvieron un desarrollo superior en comparación con las propagadas de forma convencional. Estos resultados concuerdan con investigaciones previas que reportan mejoras en el vigor y la calidad fisiológica de las plantas mediante técnicas de micropropagación (George et al., 2008). La superioridad observada en este grupo se mantuvo durante todo el periodo de evaluación.

Para evaluar la relación entre las variables dentro de cada medición y por grupo, se utilizó el coeficiente de correlación de Spearman. Esta prueba no paramétrica resultó adecuada para el tipo de datos analizados.

Tabla 2. Coeficiente de correlación de Pearson para las variables altura de la planta

	Tiempo 1	Tiempo 2	Tiempo 3
Tiempo 1	1,00		
Tiempo 2	0,04	1,00	
Tiempo 3	-0,01	1,00	1,00

Tabla 3. Coeficiente de correlación de Pearson para la variable diámetro de la planta

	Tiempo 1	Tiempo 2	Tiempo 3
Tiempo 1	1,00		
Tiempo 2	0,90	1,00	
Tiempo 3	0,88	0,98	1,00

Tabla 4. Resultados de las medias de los tratamientos de las variables altura y diámetro de la planta en los diferentes meses.

Tratamiento Variables	Vías de propagación		EE (±) Signif.
	<i>in vitro</i>	Vías de Natural	
Altura	4,10 (60,20)	3,85 (47,29)	0,08 p=0,0039
Diámetro	0,24 (1,27)	0,01 (0,79)	0,06 p<0,0001

Los resultados permitieron identificar patrones de asociación entre las variables en estudio.

En la primera medición, se observó una asociación débil entre las variables. El diámetro y la altura mostraron la relación más notable en esta etapa inicial. Sin embargo, otras variables no presentaron una correlación significativa.

Durante la segunda medición, el nivel de dependencia entre las variables aumentó de manera significativa. En el grupo *in vitro*, se registró una asociación casi perfecta, mientras que en el grupo natural este incremento no fue evidente. Estos resultados indican diferencias en el comportamiento de las variables según el grupo analizado.

En la tercera medición, la tendencia al aumento en la asociación entre variables se mantuvo. La correlación fue más fuerte en el grupo *in vitro* en comparación con el grupo natural. Este patrón sugiere que, en etapas tempranas, cuando las plantas son más pequeñas, la asociación entre el crecimiento radial y longitudinal es menor, pero se fortalece a medida que las plantas crecen.

Los resultados detallados se presentan en las Tablas 5 a la 10, junto con sus respectivas descripciones. Estas tablas proporcionan información adicional sobre las correlaciones identificadas en cada medición. El análisis confirma la variabilidad en la relación entre las variables según el grupo y la etapa de crecimiento.

Según los resultados de la primera correlación (Tabla 5), se observa que la dependencia entre las variables es muy pobre. Entre todas, las que presentan mayor relación son el diámetro y el número de tallos. Esta asociación, aunque débil, destaca frente a las demás combinaciones de variables analizadas.

En la Tabla 6, los resultados reflejan que la primera correlación muestra una dependencia muy baja entre las variables. El número de tallos no presenta relación con las demás variables, ya que permanece constante en todas las mediciones. Este comportamiento contrasta con lo observado en las plantas propagadas *in vitro*, donde se detectan variaciones significativas.

Tabla 5. Correlaciones *in vitro* Medición 1

Rho de Spearman	Altura 1	Coeficiente de correlación Sig. (bilateral) N	Altura 1	Diametro 1	Tallos
			1.000	.088 .674 25	.069 .744 25
	Diametro 1	Coeficiente de correlación Sig. (bilateral) N	.088 .674 25	1.000	.144 .491 25
			.069 .744 25	.144 .491 25	1.000 .491 25
			.069 .744 25	.144 .491 25	1.000 .491 25

Tabla 6. Correlaciones Natural Medición 1

Rho de Spearman	Altura 1	Coeficiente de correlación Sig. (bilateral) N	Altura 1	Diametro 1	Tallos
			1.000	.054 .798 25	.054 .798 25
	Diametro 1	Coeficiente de correlación Sig. (bilateral) N	.054 .798 25	1.000	.054 .798 25
			.054 .798 25	.054 .798 25	1.000 .491 25
			.054 .798 25	.054 .798 25	1.000 .491 25

En la segunda correlación (Tabla 7), el nivel de dependencia entre las variables aumenta de manera significativa. La asociación alcanza un nivel casi perfecto, lo que indica una fuerte relación entre los parámetros evaluados. Este cambio sugiere un patrón de comportamiento distinto al registrado previamente.

En este caso (Tabla 8), el nivel de asociación de las variables aumentó, aunque no alcanzó la misma intensidad que en las plantas del grupo *in vitro*. La dependencia observada fue menor, lo que refleja diferencias en la dinámica de crecimiento entre ambos grupos. Estos resultados permiten establecer comparaciones más precisas entre las condiciones experimentales.

La Tabla 9 muestra que el nivel de relación entre las variables del grupo *in vitro* continuó en aumento. La asociación alcanzó un nivel casi perfecto, lo que confirma la consistencia en el comportamiento de estas plantas. Este incremento refuerza la hipótesis de un desarrollo altamente coordinado en condiciones controladas.

De manera similar al grupo *in vitro*, la relación entre las variables del grupo natural también aumentó (Tabla 10). Sin embargo, esta incrementó en menor cuantía, lo que indica una asociación menos intensa en comparación. Estos hallazgos resaltan las diferencias en los patrones de crecimiento entre ambos grupos.

Tabla 7. Correlaciones *in vitro* Medición 2

Rho de Spearman	Altura 2	Coeficiente de correlación Sig. (bilateral) N	Altura 2	Diametro 2
			1.000	.936** .000 25
	Diametro 2	Coeficiente de correlación Sig. (bilateral) N	.936**	1.000
			.000	
			25	25

Tabla 8. Correlaciones Natural Medición 2

Rho de Spearman	Altura 2	Coeficiente de correlación Sig. (bilateral) N	Altura 2	Diametro 2
			1.000	.774** .000 25
	Diametro 2	Coeficiente de correlación Sig. (bilateral) N	.774**	1.000
			.000	
			25	25

Tabla 9. Correlaciones *in vitro* Medición 3

Rho de Spearman	Altura 3	Coeficiente de correlación Sig. (bilateral) N	Altura 3	Diametro 3
			1.000	.955** .000 25
	Diametro 3	Coeficiente de correlación Sig. (bilateral) N	.955**	1.000
			.000	
			25	25

Tabla 10. Correlaciones Natural Medición 3

Rho de Spearman	Altura 3	Coeficiente de correlación Sig. (bilateral) N	Altura 3	Diametro 3
			1.000	.829** .000 25
	Diametro 3	Coeficiente de correlación Sig. (bilateral) N	.829**	1.000
			.000	
			25	25

Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes

Dado que se compararon dos grupos en varios momentos y no se cumplió el supuesto de normalidad, se aplicó la prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes. Esta prueba permitió comparar los tres tiempos de medición dentro de cada grupo (Gibbons & Chakraborti, 2014). Los resultados mostraron variaciones significativas en algunos de los periodos evaluados.

En la Figura 1 se observa que los rangos de las mediciones varían entre los grupos. Sin embargo, las medias de los valores para la altura son similares en ambos grupos, lo que indica que la diferencia no es estadísticamente significativa. Este patrón contrasta con los resultados obtenidos en otras variables.

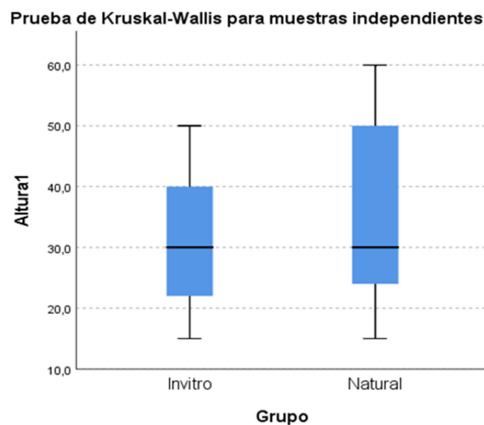


Figura 1. Prueba de Kruskal-Wallis para altura de la primera medición

La Figura 2 presenta el comportamiento de los valores de diámetro en el primer periodo. Los rangos de las mediciones y las medias difieren entre los grupos, lo que sugiere la presencia de diferencias significativas. Este hallazgo marca un contraste con los resultados de la altura en el mismo periodo.

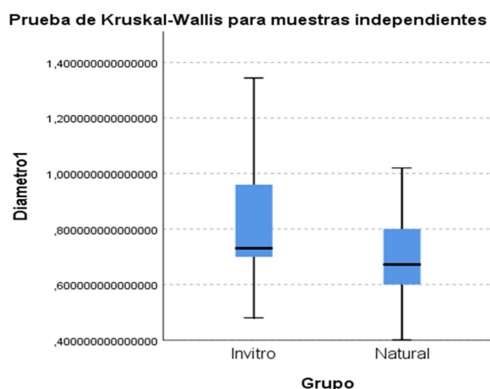


Figura 2. Prueba de Kruskal-Wallis para el diámetro de la primera medición

La Figura 3 muestra los valores de altura en el segundo periodo de medición. A diferencia del comportamiento inicial, los rangos y las medias varían notablemente entre los grupos, lo que indica la aparición de diferencias significativas en esta fase. Este cambio sugiere una evolución en la variable a lo largo del tiempo.

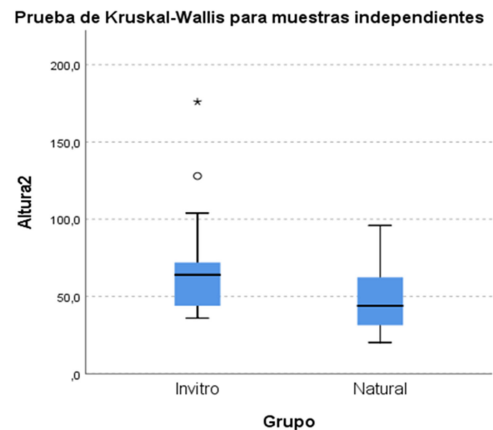


Figura 3. Prueba de Kruskal-Wallis para la altura de la segunda medición

En la Figura 4 se presenta el comportamiento del diámetro en el segundo periodo. Los rangos y las medias continúan mostrando variaciones entre los grupos, lo que confirma que persisten las diferencias significativas. Estos resultados refuerzan la tendencia observada en la primera medición.

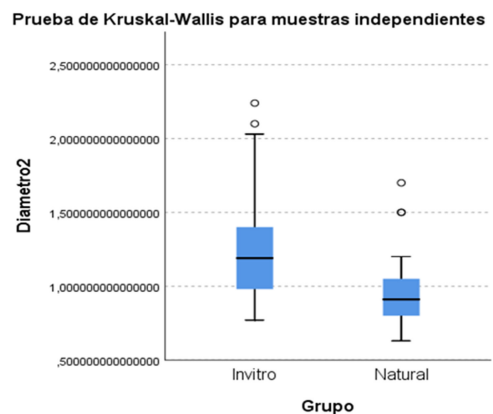


Figura 4. Prueba de Kruskal-Wallis para el diámetro de la segunda medición

La Figura 5 ilustra los valores de altura en el tercer periodo. Los rangos y las medias siguen variando entre los grupos, lo que demuestra que las diferencias significativas se mantienen. Este patrón coincide con lo observado en el segundo periodo.

Finalmente, la Figura 6 muestra los valores de diámetro en el tercer periodo. Los rangos y las medias presentan variaciones entre los grupos, lo que indica que las diferencias significativas persisten. Estos resultados consolidan las tendencias identificadas en las mediciones anteriores.

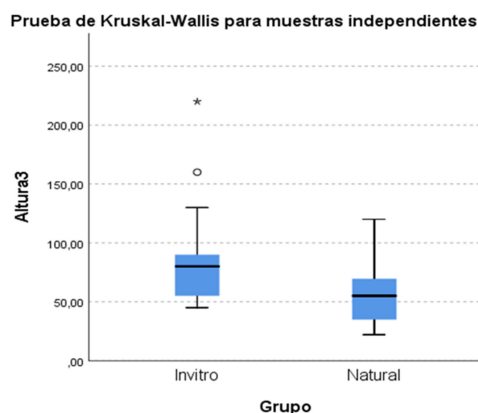


Figura 5. Prueba de Kruskal-Wallis para la altura de la tercera medición.

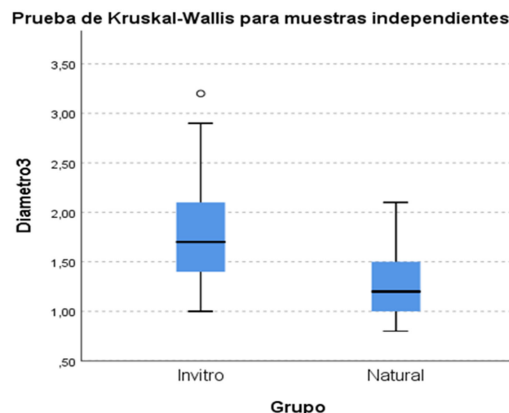


Figura 6. Prueba de Kruskal-Wallis para el diámetro de la tercera medición.

Tabla 11. Resumen de contrastes de hipótesis.

	Hipótesis nula	Prueba	Sig.	Decisión
T1	La distribución de Altura1 es la misma entre categorías de Grupo.	Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes	,482	Conserve la hipótesis nula.
T2	La distribución de Diametro1 es la misma entre categorías de Grupo.	Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes	,019	Rechace la hipótesis nula.
T3	La distribución de Altura2 es la misma entre categorías de Grupo.	Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes	,039	Rechace la hipótesis nula.
T4	La distribución de Diametro2 es la misma entre categorías de Grupo.	Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes	,009	Rechace la hipótesis nula.
T5	La distribución de Altura3 es la misma entre categorías de Grupo.	Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes	,010	Rechace la hipótesis nula.
T6	La distribución de Diametro3 es la misma entre categorías de Grupo.	Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes	,001	Rechace la hipótesis nula.
T7	La distribución de Tallos es la misma entre categorías de Grupo.	Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes	,039	Rechace la hipótesis nula.

En la **Tabla 11** se muestra un resumen de contrastes de hipótesis. En la primera medición (T1) no se observaron diferencias significativas entre los grupos en cuanto a la altura. Sin embargo, en la segunda (T2) y tercera medición (T3) sí se detectaron variaciones estadísticamente relevantes. Respecto al diámetro, las diferencias significativas aparecieron desde la primera evaluación y persistieron durante todo el experimento.

Las gráficas (**Figuras 1-6**) evidencian que los rangos de medición y las medias varían entre los grupos, especialmente a partir de la segunda medición. Estos datos confirman que las plantas cultivadas *in vitro* presentaron un mejor desempeño en términos de crecimiento en altura y diámetro. Además, la diferencia entre los grupos se incrementó conforme avanzó el estudio.

Análisis de supervivencia

Se llevó a cabo un conteo total de plantas en campo, clasificándolas según su método de propagación (*in vitro* vs. convencional). De un total de 498 plantas (467 convencionales y 31 *in vitro*), sobrevivieron 309 plantas convencionales y 25 plantas *in vitro*, lo que corresponde a tasas de supervivencia del 66% y 81%, respectivamente. En la **Figura 7**, los espacios marcados con una (X) indican las plantas que no lograron sobrevivir en ambos grupos.

Estos hallazgos indican que las plantas propagadas *in vitro* presentan una mayor resistencia a las condiciones ambientales del sitio. Esta ventaja podría atribuirse a una mejor calidad fisiológica adquirida durante el proceso de micropropagación (George et al., 2008).

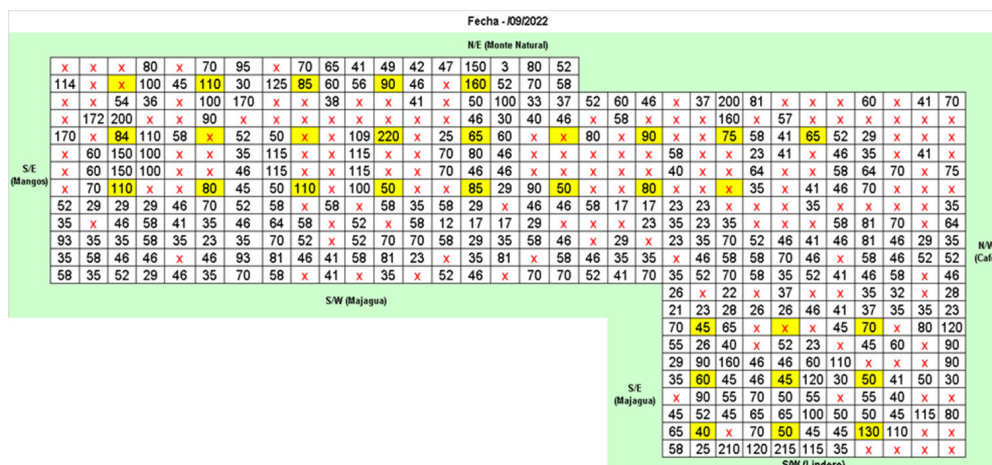


Figura 7. Análisis de supervivencia.

CONCLUSIONES

El estudio demuestra que las plantas de *Swietenia macrophylla* King propagadas *in vitro* tienen un mejor desempeño en condiciones de campo en comparación con las propagadas de manera convencional. Durante los 14 meses de evaluación, las plantas provenientes de cultivo *in vitro* exhibieron ventajas significativas en varios parámetros de crecimiento. Estos resultados resaltan la eficacia de la técnica para la producción de material vegetal de calidad.

En cada período de medición, las plantas propagadas *in vitro* registraron mayores valores promedio de altura y diámetro del tallo. Además, mostraron un porcentaje de supervivencia más alto, lo que refleja una mejor adaptación a las condiciones ambientales. Su crecimiento fue más estable y sostenido, como lo evidencian las correlaciones positivas entre las mediciones realizadas.

En las primeras etapas de evaluación, se observó un mayor número de tallos en las plantas provenientes de cultivo *in vitro*, lo que indica una mayor capacidad de desarrollo estructural. Aunque este rasgo no es deseable en la especie, no afectó negativamente su desempeño general. Los resultados confirman que la propagación *in vitro* es una alternativa viable para la producción de caoba.

Esta técnica representa una opción prometedora para la recuperación de poblaciones naturales y el establecimiento de plantaciones comerciales. Asimismo, los hallazgos sientan bases para futuras investigaciones sobre la adaptación y rendimiento de plantas forestales propagadas mediante biotecnología. Especialmente, estos estudios podrían enfocarse en especies del género *Swietenia* para optimizar su manejo y conservación.

BIBLIOGRAFÍA

Acosta-Amaya, M. M., & Sánchez Escudero, J. P. (2015). Desempeño psicométrico de dos escalas de autoeficacia e

intereses profesionales en una muestra de estudiantes de secundaria. *CES Psicología*, 8(2), 156-170.

Azad, Md. S., & Matin, Md. A. (2015). Effect of Indole-3-Butyric Acid on Clonal Propagation of *Swietenia macrophylla* through Branch Cutting. *Journal of Botany*, 2015, 1-7. <https://doi.org/10.1155/2015/249308>

Bonferroni, C. (1936). Teoria statistica delle classi e calcolo delle probabilita. *Pubblicazioni del R istituto superiore di scienze economiche e commerciali di firenze*, 8, 3-62.

Collado, R., Barbón, R., Agramonte, D., Jiménez-Terry, F., Pérez, M., & Gutiérrez, O. (2006). Embriogénesis somática directa en *Swietenia macrophylla* King. *Bioteología Vegetal*, 6(2). <https://revista.ibp.co.cu/index.php/BV/article/view/405>

Collado, R., Barbón, R., Agramonte, D., Jiménez-Terry, F., Pérez, M., & Gutiérrez, O. (2010). Embriogénesis somática indirecta de *Swietenia macrophylla* King en medios de cultivo semisólidos. *Bioteología Vegetal*, 10(3). https://revista.ibp.co.cu/index.php/BV/article/view/285/html?locale=en_US

Collado, R., González, S., León, Y., & Menéndez, S. (2024). Embriogénesis somática directa en *Swietenia macrophylla* King. *Bioteología Vegetal*, 24(1), 67-75.

Field, A. (2024). *Discovering statistics using IBM SPSS statistics*. Sage publications limited.

George, E. F., Hall, M. A., & De Klerk, G.-J. (2008). Plant propagation by tissue culture 3rd Edition. *The Netherland, The Back Ground Springer*, 65-175.

Gibbons, J. D., & Chakraborti, S. (2014). *Nonparametric statistical inference: Revised and expanded*. CRC press. <https://api.taylorfrancis.com/content/books/mono/download?identifierName=doi&identifierValue=10.4324/9780203911563&type=googlepdf>

Gómez, S., Torres, V., García, Y., Herrera, M., Medina, Y., & Rodríguez, R. (2019). Statistical procedure for the analysis of experiments with repeated measures over time

- in the agricultural and livestock field. *Cuban Journal of Agricultural Science*, 53(4), 353-360.
- Greenhouse, S. W., & Geisser, S. (1959). On methods in the analysis of profile data. *Psychometrika*, 24(2), 95-112.
- Gualdrón, J. C. (2009). Influencia de los criterios de selección AIC Y BIC para la selección del modelo de evolución y la reconstrucción del análisis bayesiano. Available: <http://tux.uis.edu.co/labsist/docencia/finales/final2009-I/2050158-20070.pdf> . [Consulted: June 20, 2018].
- Huynh, H., & Feldt, L. S. (1976). Estimation of the Box Correction for Degrees of Freedom from Sample Data in Randomized Block and Split-Plot Designs. *Journal of Educational Statistics*, 1(1), 69-82. <https://doi.org/10.3102/10769986001001069>
- Lamb, F. B. (1966). Mahogany of tropical America: Its ecology and management. *University of Michigan Press*. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/19660601881>
- Levene, H. (1960). Robust Tests of Homogeneity of Variance. *Contributions to Probability and Statistics; Stanford University Press: Stanford, CA, USA*, 278-292.
- Martin, D. (2017). Embriogénesis somática: Una herramienta biotecnológica para la propagación in vitro de guayaba. *Biotecnología Vegetal*, 17(4). <https://revista.ibp.co.cu/index.php/BV/article/view/563>
- Maruyama, T. E. (2009). Polyethylene glycol improves somatic embryo maturation in big-leaf mahogany (*Swietenia macrophylla* King, Meliaceae). *Bulletin of FFPRI*, 8, 167-173.
- Pérez, E. R., & Medrano, L. A. (2010). Análisis factorial exploratorio: Bases conceptuales y metodológicas. *Revista Argentina de Ciencias del Comportamiento (RACC)*, 2(1), 58-66.
- Pérez Flores, J., Aguilar Vega, M. E., & Roca Tripepi, R. (2012). Assays for the in vitro establishment of *Swietenia macrophylla* and *Cedrela odorata*. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 14(1), 20-30.
- Razali, N. M., & Wah, Y. B. (2011). Power comparisons of shapiro-wilk, kolmogorov-smirnov, lilliefors and anderson-darling tests. *Journal of statistical modeling and analytics*, 2(1), 21-33.
- SAS. (2013). *Sistema de análisis estadístico*. Universidad de Nebraska USA.
- Schottz, E. de S., Kalil Filho, A. N., Tracz, A. L., Koehler, H., Ribas, L. L., & Quoirin, M. (2007). In vitro multiplication of *Swietenia macrophylla* King (Meliaceae) from juvenile shoots. *Ciência Florestal*, 17(2), 109-117.
- Shapiro, S. S., & Wilk, M. B. (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 52(3-4), 591-611.
- Vallejo, G., Tuero-Herrero, E., Núñez, J. C., & Rosário, P. (2014). Performance evaluation of recent information criteria for selecting multilevel models in behavioral and social sciences. *International Journal of Clinical and Health Psychology*, 14(1), 48-57.