



RESEARCH ARTICLE



Correlations, genetic and phenotypic parameters in quantitative and qualitative traits of *Swietenia macrophylla* in Ucayali, Peru

Correlaciones, parámetros genéticos y fenotípicos en rasgos cuantitativos y cualitativos de *Swietenia macrophylla* en Ucayali, Perú

Jorge M. Revilla-Chávez^{1, 2 *} ; Marcela A. de Moraes² ; Jorge J., Revilla-Macedo⁴ ; William F. Vergaray Rengifo⁴ ; Jesús A. Mego-Pérez⁴ ; Henry S. Saldaña-Dominguez⁴ ; Emily S. Vigo-Ampuero⁴ ; Antony C. Gonzales-Alvarado⁵ ; Rubén D. Manturano-Perez⁴ ; Rubén Casas-Reátegui⁶ ; Jorge A. Mori-Vasquez⁴ ; Alexandre M. Sebbenn^{2, 3} 

¹ Instituto de Investigaciones de la Amazonia Peruana-IIAP, Dirección Regional de Ucayali, Carretera Federico Basadre Km. 12,400, Yarina Cocha Ucayali, Perú.

² Programa de Pós-graduação em Agronomia, Doctorado em Agronomia, Universidad Estadual Paulista (UNESP), Facultad de Ingeniería, Ilha Solteira, CP 31, CEP 15385-000, Ilha Solteira, Estado de São Paulo, Brasil.

³ Instituto Florestal de São Paulo, São Paulo, Estado de São Paulo, Brasil. CP 1322, CEP 01059-970.

⁴ Universidad Nacional de Ucayali, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Escuela Profesional de Ingeniería Forestal, Carretera Federico Basadre km 6,200, Pucallpa, Ucayali, Perú.

⁵ Programa de Pós-Graduação em Biotecnociência (PPGBTC), Doctorado em Biotecnociência de la Universidade Federal do ABC, Centro de Ciências Naturais e Humanas, São Bernardo do Campo, Estado de São Paulo, Brasil.

* Corresponding author: jrevilla@iiap.gob.pe (J. M. Revilla-Chávez).

Received: 26 May 2024. Accepted: 17 June 2024. Published: 16 July 2024.

Abstract

The speed of growth in height of *Swietenia macrophylla* stands out in terms of resistance to attack by the *Hypsipyla grandella* borer and the selection of fast-growing families can make commercial plantings viable. The characters height, diameter, number of leaves and stem form of trees from 4 families of *S. macrophylla*, aged 47.5 months, planted in Ucayali, Peru, were used to investigate the possibility of selecting fast-growing genotypes. The average heritability (h^2m) and selective accuracy (Acprog) between families were moderate for total height (Ht: h^2m : 0.407; Acprog: 0.638) and commercial height (Hc: h^2m : 0.472; Acprog: 0.687), in addition to Hc positively correlating with susceptibility to the drill attack. The stem form showed statistical differences between families and great h^2m (0.984) and Acprog (0.921). The genetic (r_g) and phenotypic (r_f) correlations between traits showed that a selection of individuals with greater heights will generally result in greater growth in diameter, number of leaves and better stem form. The study highlights the importance of selecting families with fast growth in height and straight stems to enable, improve the quality and increase the productivity of commercial plantations with the species.

Keywords: familias; mahogany; amazon; heritability; genetic correlations.

Resumen

La velocidad de crecimiento en altura de *Swietenia macrophylla* destaca en términos de resistencia al ataque del barrenador *Hypsipyla grandella* y la selección de familias de rápido crecimiento puede viabilizar las plantaciones comerciales. Los caracteres altura, diámetro, número de hojas y forma del tronco de árboles de 4 familias de *S. macrophylla*, de 47,5 meses de edad, plantados en Ucayali, Perú, se utilizaron para investigar la posibilidad de seleccionar genotipos de rápido crecimiento. La heredabilidad promedio (h^2m) y la precisión selectiva (Acprog) entre familias fueron moderadas para la altura total (Ht: h^2m : 0,407; Acprog: 0,638) y la altura comercial (Hc: h^2m : 0,472; Acprog: 0,687), además de que Hc correlacionó positivamente con la susceptibilidad a el ataque del taladro. La forma del fuste mostró diferencias importantes entre las familias y alta h^2m (0,984) y Acprog (0,921). Las correlaciones genéticas (r_g) y fenotípicas (r_f) entre rasgos mostraron que una selección de individuos con mayores alturas generalmente resultará en un mayor crecimiento en diámetro, número de hojas y mejor forma del tallo. El estudio destaca la importancia de seleccionar familias con rápido crecimiento en altura y tallos rectos para posibilitar, mejorar la calidad y aumentar la productividad de las plantaciones comerciales con la especie.

Palabras clave: familias; caoba; amazonia; heredabilidad; correlaciones genéticas.

DOI: <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2024.030>

Cite this article:

Revilla-Chávez, J. M., de Morales, M. A., Revilla-Macedo, J. J., Vergaray Rengifo, W. F., Mego-Pérez, J. A., Saldaña-Dominguez, H. S., Vigo-Ampuero, E. S., Gonzales-Alvarado, A. C., Manturano-Perez, R. D., Casas-Reátegui, R., Mori-Vasquez, J. A., & Sebbenn, A. M. (2024). Correlaciones, parámetros genéticos y fenotípicos en rasgos cuantitativos y cualitativos de *Swietenia macrophylla* en Ucayali, Perú. *Scientia Agropecuaria*, 15(3), 409-417.

1. Introducción

La Caoba, *Swietenia macrophylla* King (Meliaceae), es la especie arbórea neotropical de mayor valor en el mercado global (Degen et al., 2012; Sebbenn et al., 2012). Su madera es apreciada por su excelente estética, propiedades físicas y mecánicas, con notable trabajabilidad; por lo que se la utiliza en la fabricación de muebles finos, decoración de interiores, la construcción civil e instrumentos musicales (Carvalho, 2006). Su distribución geográfica se extiende desde el sur de Florida y México, el Caribe hasta el sur de la cuenca amazónica en Bolivia, Brasil, Perú, hasta el norte de Argentina (Pastorino & Corley, 2009). A lo largo de estas regiones, la demanda de su madera ha superado la oferta disponible debido su sobre explotación en las poblaciones silvestre en toda su área de distribución (Castro et al., 2019; Andrade et al., 2022; Arlacon-Méndez et al., 2023). El resultado es el aislamiento de las poblaciones naturales, lo que provoca la pérdida de su diversidad genética (Degen et al., 2012; Sebbenn et al., 2012; Alcalá et al., 2015; Oliveira et al., 2020; Andrade et al., 2022). Por lo que el futuro comercial de la especie está en riesgo debido a su sobreexplotación, la deforestación de su hábitat y la dificultad para el desarrollo de plantaciones comerciales rentables en América Latina (Sanches et al., 2019; Chinchilla-Mora et al., 2021). Sin embargo, la causa por la cual especie no está siendo aprovechada de manera sostenible es por el efecto arrasador que tiene la principal plaga de las Meliáceas, como es la *Hypsipylla grandella* o “barrenador de Meliáceas” (Romo-Lozano et al., 2017; Sanches et al., 2019). Una sola larva puede atacar el brote principal de un árbol, provocando deformaciones y ramificación de su tronco, originando un fuste poco deseado con daños irreversibles, por lo que la distribución geográfica de la *Hypsipylla* spp., así como la presencia, continuidad y severidad de sus ataques, han impedido que plantaciones comerciales de caobas y cedros puedan establecerse y prosperar (Cornelius, 2009; Hilje, 2020).

Por lo que una forma de abordar este problema es establecer plantaciones comerciales con plántulas resistentes a los ataques de *H. grandella* (Cornelius, 2009). Para desarrollar una estrategia de selección, se deben considerar los aspectos de coexistencia, prevención y sostenibilidad, junto con el uso de árboles resistentes o tolerantes basados en la antixenosis de *H. grandella* a la familia Meliaceae en toda América (Jiménez, 2007). Las pruebas de procedencia y familia pueden ser usadas para identificar la variación genética en características como la resistencia a *Hypsipylla* spp. se han realizado en diferentes lugares, con diversos grados

de éxito (Cornelius & Watt, 2003; Navarro & Hernández, 2004; Navarro et al., 2004; Ward et al., 2008; Wightman et al., 2008). La identificación de cepas genéticas de árboles resistentes y tolerantes, del mismo modo se comprobó la existencia de altos niveles de diversidad genética entre poblaciones nativas de *S. macrophylla* distantes entre sí en la Amazonia brasileña, incluyendo diferenciación a escala local entre poblaciones (Lemes et al., 2007; Sampayo-Maldonado et al., 2019).

A pesar de las evidencias, no existe material de caoba seleccionado para resistencia a *H. grandella*, por lo que el mejoramiento genético en la selección de materiales tolerantes es de suma importancia para la gestión de la *S. macrophylla*; siendo incluso niveles bajos de resistencia pueden ser importantes cuando se integran con el control biológico y otros métodos. Por lo que evaluar buscar genotipos resilientes, que promueven el rápido crecimiento, es importante para ayudar a superar rápidamente la fase crítica del ataque (Cornelius, 2009) por lo que el control de los rasgos ayuda a mejorar la calidad y productividad de la plantación, siendo el objetivo del presente estudio el control genético de rasgos cuantitativos y cualitativos de la *S. macrophylla* a los 47,5 meses de edad, como estrategia de selección y mejoramiento de la especie para incrementar la productividad de la plantación.

2. Metodología

2.1. Ubicación del estudio

El estudio se estableció en un área colindante al vivero forestal de la Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales de la Universidad Nacional de Ucayali, ubicado en las Coordenadas de Zona 18L 547030 E; 9070259 S, y ubicado en el distrito de Manantay, Provincia de Coronel Portillo y Región Ucayali en Perú. En la zona de vida, bosque húmedo – Premontano Tropical transicional a bosque húmedo-tropical (bh-PT/bh-T) (GRU, 2017).

2.2. Descripción del ensayo

El ensayo se estableció con plantas producidas de semillas de cuatro familias de tres localidades (Tabla 1), estas semillas fueron sembradas el 29/12/2018, se mantuvieron en vivero por 114 días, donde el 06/09/2018, cuando las plantas alcanzaron una altura promedio de 30 cm se decapitaron a media copa para simular el ataque de la *H. grandella* King, las cuales fueron evaluadas en vivero hasta el 30/03/2019, momento en el que se cortaron todos los rebrotes excepto el más largo y vigoroso. El 11/07/2019 se estableció una plantación con 77 plantas, donde 22 fueron de Juanjui, 11 de Sisa, 22 de Primavera y 22 de Unión.

Tabla 1

Procedencia de las familias de *Swietenia macrophylla* para ensayo de control genético de rasgos en una plantación de Ucayali, Perú

Cod	Familia	Región	Provincia	Distrito	Localidad	Coordenadas UTM		msnm
						X	Y	
1	Juanjui	San Martín	Mariscal Cáceres	Juanjui	Juanjui	326823	9055066	283
2	Sisa	San Martín	San José de Sisa	San Martín de Alao	Alto Roque de Sisa	326878	8767893	430
3	Primavera	Ucayali	Coronel Portillo	Callería	Primavera	558797	8779586	164
4	Unión	Ucayali	Coronel Portillo	Callería	Unión	559748	8801935	164

Plantación se estableció a un distanciamiento de 2,5 x 2,5 m entre plantas para una densidad de 400 plantas/ha, el área fue un suelo degradado y sometido a sobrepastoreo, por lo que se sembraron en pozos de 60 x 60 x 60 cm, al momento de la siembra se agregó fertilizantes, con 45 g de Urea (CH₄N₂O), 36 g de Fosfato diamónico ((NH₄)₂HPO₄), 36 g de Cloruro de potasio (K₂O) y 152 g de roca fosfórica (P₂O₅, CaO, SiO₂).

2.3. Diseño, colecta y procesamiento de datos

El diseño experimental fue en bloques completos aleatorizados (Figura 1), con una única observación realizada (30/03/2023) a los 47,5 meses de edad. Se aplicó el modelo estadístico 95 del programa informático SELEGEN (Resende, 2007a, b, 2016). Las variables evaluadas fueron: Ht: altura total (dm); Hc: altura comercial (dm); dab: diámetro a la altura de la base (mm); dap: diámetro a la altura del pecho (mm); L: número de hojas; forma del fuste: recto: 100%, recto ligeramente sinuado: 95%, sinuado: 90% y bifurcado: 80% (Revilla-Chávez et al., 2024).

2.4. Parámetros genéticos y análisis estadísticos

En los análisis individuales se utilizó el procedimiento REML/BLUP (restricted maximum likelihood/best linear unbiased prediction), mediante la metodología de modelos lineales mixtos, modelo 95 del software Selegen REML/BLUP (Resende, 2007b), para estimar los componentes de varianza y los parámetros genéticos de cada uno de los caracteres evaluados en el experimento: $y = X_t + Z_b + e$, donde: y: variable dependiente, r: efectos de repetición (que se suponen fijos) añadidos a la media global, g: efectos genotípicos (que se suponen aleatorios) añadidos a la media global, e: errores o residuos (aleatorios) e, X y Z: Representan las matrices de incidencia de estos efectos. Para evaluar los componentes de la varianza de los genotipos: Va: variación genética aditiva; Ve: varianza residual; Vf: variación fenotípica; h²a: heredabilidad individual en sentido estricto, es decir, de efectos aditivos; h²m: heredabilidad media entre familias, suponiendo supervivencia completa; Acprog: precisión selectiva, suponiendo una supervivencia completa; CVgi(%): coeficiente de variación genética aditiva

individual; CVgp(%): coeficiente de variación genética entre familias; CVe(%): coeficiente de variación residual; CVr = CVgp(%)/CVe(%) = coeficiente de variación relativa. Del resultado de Análisis de Varianza (ANOVA), de los rasgos evaluados se calcularon las correlaciones genéticas y correlaciones fenotípicas entre rasgos para determinar la asociatividad entre pares, el que se determinó utilizando el Paquete Excel del Software de Microsoft Office Profesional Plus 2021. Para determinar la contribución de los rasgos a los resultados, se aplicó el Análisis de Componentes Principales en RStudio (RStudio Team, 2020).

B	B	B	B	B	B	B	B
B	1-11	1-22	1-14	3-4	1-4	2-10	B
B	2-3	4-17	3-1	3-21	2-1	2-8	B
B	1-17	1-15	4-21	4-1	4-15	4-10	B
B	1-6	4-3	1-7	3-7	4-22	1-10	B
B	3-10	2-5	3-11	3-22	4-4	2-7	B
B	2-6	3-17	1-3	1-13	1-2	4-8	B
B	2-2	1-16	4-20	1-9	4-11	4-19	B
B	3-6	4-2	3-13	1-20	3-20	1-8	B
B	1-12	1-19	4-6	3-19	1-1	3-3	B
B	3-15	4-7	1-18	4-9	3-16	4-13	B
B	2-9	3-12	4-5	4-14	2-4	3-9	B
B	2-11	3-14	1-5	3-8	3-18	3-5	B
B	1-21	4-12	4-18	4-16	3-2	B	B
B	B	B	B	B	B	B	

Figura 1. Croquis de plantación en un diseño completamente aleatorizados de caoba (*Swietenia macrophylla*) en Ucayali, Perú (Donde: 1-x= Juanjui; 2-x =Sisa; 3-x= Primavera; 4-x= Unión; B= plantas de borde no evaluables).

Tabla 2
Estadísticas de muestra de 4 familias de *Swietenia macrophylla* en un ensayo en Ucayali, Perú

Rasgo	Familia	Observaciones			Min.	Máx.	Media (x̄)	σ	CV (%)
		Total	datos perdidos	Con datos perdidos					
Ht (dm)	1	22	13	9	10,9	33,8	23,8	6,8	45,6
	2	11	7	4	17,2	30,5	24,1	4,6	20,8
	3	22	19	3	12,6	32,5	22,8	5,2	26,5
	4	22	18	4	12,7	39,5	23	7,6	57,6
Hc (dm)	1	22	13	9	14,9	29	21,2	5	24,7
	2	11	7	4	15	24,9	20,4	3,9	15,2
	3	22	19	3	15	26,8	19,3	3,5	12,1
	4	22	18	4	15,4	31,2	22,2	4,2	17,7
dab (mm)	1	22	13	9	26,6	59,4	48,3	9,8	95
	2	11	7	4	38,4	62,9	50,4	8,7	75
	3	22	19	3	29,9	58,7	46,8	8,2	68
	4	22	18	4	27,8	70	48,4	11,2	125
dap (mm)	1	22	12	10	16,9	33,2	25,1	5,5	31
	2	11	7	4	15,4	34,9	24,8	6,8	46
	3	22	19	3	13,4	34,2	24,2	6,1	38
	4	22	13	9	16,4	42,1	25,8	7,1	50
Hojas	1	22	13	9	7	55	24,6	12,7	160,9
	2	11	6	5	17	34	24,2	7,8	61
	3	22	19	3	8	50	25,5	9,5	89,9
	4	22	17	5	13	50	27,1	11,04	121,8
Forma	1	22	13	9	80	100	90,4	6,92	47,9
	2	11	7	4	80	100	95	8,6	70
	3	22	19	3	80	100	92,4	8,6	73,3
	4	22	18	4	80	100	85	6,2	38,2

Donde: Ht: altura total del árbol; Hc: altura comercial del árbol; dab: diámetro a la altura de la base; dap: diámetro a la altura del pecho; Hojas: número de hojas por árbol; Forma: forma del fuste del árbol; σ: desviación estándar; CV(%): coeficiente de variación.

Tabla 3
Parametros genéticos de 6 rasgos de 4 familias de *Swietenia macrophylla* en una plantación de 47,5 meses en Ucayali, Perú

	Ht (dm)	Hc (dm)	dab (mm)	dap (mm)	Hojas	Forma
h ² a	0,155	0,2	0,002	0,003	0,003	0,995
± DP	± 0,318	± 0,361	± 0,037	± 0,044	± 0,041	± 0,761
h ² m	0,407	0,472	0,01	0,012	0,012	0,849
Acprog	0,638	0,687	0,099	0,111	0,11	0,921
CVgi(%)	8,5	9,2	0,9	1,4	2,2	9,1
CVgp(%)	4,3	4,6	0,5	0,7	1,1	4,6
CVe(%)	21,2	20,0	18,6	25,6	41,6	7,9
CVr	0,2	0,23	0,02	0,03	0,03	0,57
Mé dia (x̄)	24,71	20,74	48,24	24,65	24,92	90,3*

* $p < 0,05$; Ht: altura total del árbol; Hc: altura comercial del árbol; dab: diámetro a la altura de la base; dap: diámetro a la altura del pecho; Hojas: número de hojas por árbol; Forma: forma del fuste del árbol; h²a: heredabilidad individual en sentido restricto; h²m: heredabilidad media de las familias; Acprog: precisión selectiva; CVgi(%): coeficiente de variación genética aditiva individual; CVgp(%): coeficiente de variación genética entre familias; CVe(%): coeficiente de variación residual; CVr: coeficiente de variación relativa.

3. Resultados y discusión

Los resultados (Tabla 2) muestran las estadísticas de la muestra de 4 familias de *S. macrophylla* en una plantación en Ucayali, Perú. Los análisis de varianza (ANOVA) aplicados a los 6 rasgos evaluados, muestran que no existen diferencias significativas en ninguno de los rasgos en las familias a excepción de la Forma de fuste (Tabla 3). De acuerdo a lo referido por Pérez-González et al. (2012), los resultados mostraron un bajo crecimiento medio (x̄) en altura total y comercial (Ht: 24,71 dm; Hc: 20,74 dm), y crecimiento medio de los diámetros (dab: 48,24 mm; dap: 24,65 mm), estos rasgos son importantes, puesto que considerando el ataque recurrente del barrenador de brotes (*H. grandella*) y la recuperación que viene inmediatamente

después, el rápido crecimiento en altura, es determinante para desarrollar segmentos sanos hasta el siguiente ataque, mejorando así la calidad de la madera hasta superar rápidamente la fase crítica de ataque (6 m de altura; Cornelius, 2009), por lo que el control de este rasgo ayuda a mejorar la calidad y productividad de la plantación.

3.1. Parámetros genéticos

Los resultados mostraron que la altura total (Ht) y altura comercial (Hc) tuvieron una baja heredabilidad individual en sentido estricto (h²a: 0,155 y 0,2), y moderada heredabilidad media entre familias (h²m: 0,407 y 0,427) alta precisión selectiva (Acprog: 0,638 y 0,687), bajos coeficientes de variación genética aditiva individual (CVgi(%): 8,5 y 9,2%) y

baja variación genética entre familias (CVgp(%): 4,3% y 4,6%) (Table 3). Del mismo modo se reportaron bajos coeficientes para el diámetro a la altura de la base (dab) y diámetro a la altura del pecho (dap), en heredabilidad individual (h^2 a: 0,002 y 0,003), precisión selectiva (Acprog: 0,099-0,111), variación genética aditiva individual (CVgi(%): 0,9% y 1,4%) y coeficiente de variabilidad genética entre familias (CVgp(%): 0,5% y 0,7%). Estos resultados guardan correspondencia a los obtenidos por Newton et al. (1996) que encontró heredabilidades de 0,38 y 0,11 para la altura con un menor número de familias, mientras que se pueden obtener heredabilidades en sentido estricto de 0,81 y 0,47 para altura y diámetro respectivamente (Navarro & Hernández, 2004), lo que indica la necesidad de incrementar el número de familias en futuro ensayos. Del mismo modo los resultados obtenidos guardan relación con los resultados de Cornelius (1999), quien reportó que del análisis de 67 estudios en especies leñosas, la heredabilidad en altura son mayores que del diámetro, siendo ambos más inestables en edades juveniles, los resultados guardan relación a los obtenidos por Revilla-Chávez et al. (2022), quien determinó que los componentes de variabilidad genética en una especie tropical de rápido crecimiento a los 36 meses de edad, en la misma cuenca en Ucayali, tuvieron similares resultados (h^2 a: 0,045-0,041; precisión selectiva r_a : 0,583-0,608; CVgi(%): 3,4%-3,7%) para la altura total y diámetro a la altura de la base respectivamente.

El número medio (\bar{x}) de hojas registrado fue de 24,9 unidades por árbol, con bajos coeficientes de heredabilidad individual en sentido restringido (h^2 a: 0,003), bajos coeficientes de variación genética aditiva individual (CVgi(%): 2,2%) y de variación genética entre familias (CVgp(%): 1,1%), además de una baja precisión (Acprog: 0,11), los mismo que difieren de lo obtenido por Navarro & Hernández (2004) quien con un estudio con 168 familias de 10 poblaciones de Costa Rica y Bolivia obtuvo heredabilidades con alto control genético para el número de hojas para la misma especie (h^2 a: 0,51), lo que corrobora la necesidad de ampliar la base genética para mejor control de rasgos. La forma del fuste, por el ANOVA fue reportado como único rasgo con diferencias significativas respecto a la familias (Tabla 3), con una media (\bar{x}) de 90,3%, alta heredabilidad media entre la familias (h^2 m: 0,99) y precisión (Acprog: 0,921), con bajos coeficientes de variación genética aditiva individual (CVgi(%): 9,1%) y bajo coeficiente de variación genética entre familias (CVgp(%): 4,6%), correspondiente a la reportado por Navarro & Hernández (2004), quienes refieren que existe asociación en la incidencia de ataques de *H. grandella*, a los árboles de *S. macrophylla*, que da origen a bifurcaciones con heredabilidades individua-

les en sentido estricto de entre 0,56 y 0,42 en Costa Rica y Trinidad y Tobago respectivamente (Navarro et al., 2004). Por lo tanto, existe variación genética significativa en la forma del árbol, producto de la susceptibilidad de la *S. macrophylla* al ataque del barrenador de brotes, que determina la forma el árbol, lo que se muestra en el subcapítulo de análisis de componentes principales.

3.2. Correlaciones genéticas (r_g) y fenotípica (r_f)

Los coeficientes de las correlaciones genéticas (r_g) y fenotípicas (r_f) entre pares de rasgos oscilaron entre -0,33 y 0,97 (Tabla 4). Las correlaciones r_g y r_f entre Ht-Hc, Ht-dab, Ht-dap, Ht-Hojas, Ht-Forma, Hc-dab, Hc-dap, Hc-Hojas, Hc-Forma, dab-dap, dap-Hojas, dap-Forma y Hojas-Forma fueron superiores a cero, y oscilaron de moderadas a altas (entre 0,27 y 0,97), donde entre dab-Hojas y dab-Forma fueron próximos o inferiores a cero (entre -0,33 y -0,17). Estas correlaciones entre pares de rasgos indican que la variación en uno de ellos da como resultado en la variación del otro, especialmente para los rasgos por pares que muestran altas correlaciones genéticas. Por lo que para nuestro estudio la altura comercial (Hc) es un rasgo importante puesto que guarda relación con la forma del árbol (Hc-Forma) que es una respuesta a la recuperación de plantas después del ataque de la *H. grandella* (Ríos-Saucedo et al., 2017), teniendo una r_g : 0,66 y r_f : 0,58. Debido a que los ataques ocurren en episodios periódicos y recurrentes, la selección de individuos con mayor crecimiento vegetativo puede conducir a un mejor crecimiento con secciones intactas y tallos relativamente largos (Cornelius, 2009), congruentes a índices más elevados de formas en *Acacia*, siendo que la calidad de árbol estaría determinada en gran medida por la bifurcación, por lo que una mayor altura de bifurcación, es equivalente a una mayor altura comercial (Hc) resultando en la mejor la calidad del árbol (Pavlotzky & Murillo, 2014). La correlación genética (r_g) generalmente moderada a alta encontrada entre los rasgos Ht, Hc, dab, dap y Hojas (0,45 - 0,97) indica que la selección de plantas con un Ht más alta dará como resultado una selección indirecta de otros rasgos. Estas correlaciones pueden cuantificarse a partir de correlaciones fenotípicas (r_f) de las asociaciones entre sus pares correspondientes Ht-Hc, Ht-dab, Ht-Hojas y Hc-dab, Hc-dap, Hc-Hojas, Hc-Forma (0,52 y 0,95), rasgos de fácil medición. Es común que las correlaciones genéticas estimadas sean más elevadas que las respectivas correlaciones fenotípicas para los rasgos que tienen una mayor precisión (Acprog), como Ht, Hc, dab y Forma, lo cual es consistente con otras especies leñosas (Farfán et al., 2002; Revilla-Chávez et al., 2024; Revilla-Chávez & Sebbenn, 2024).

3.3. Análisis de componentes principales

El análisis de los rasgos evaluados, arrojaron que la Ht, dap, Forma y Hojas de los árboles, fueron los rasgos de mayor contribución a la característica de las progenies evaluadas, las mismas que basado en el principio de Kaiser (1960) y el criterio de proporción mínima del 70% de la variación, se determinaron los primeros dos componentes como base del análisis, el mismo que representan el 84,4% de la representatividad de rasgos (Tabla 5). Donde la altura total (Ht),

el diámetro a la altura del pecho (dap), la altura comercial (Hc) y el diámetro a la altura de la base (dab), tuvieron una mayor correlación positiva entre si (Tabla 4, Figura 2), los mismos determinaron que el Componente 1 acumule el 53,4% de la variación; mientras que la Forma y las hojas de los árboles son los rasgos que más aportan al Componente 2, alcanzando el 30,1%, permitiendo que conjunto los componentes alcancen el 84,5% de la variabilidad de los genotipos evaluados.

Tabla 4

Correlación genética (r_g , diagonal superior) y fenotípica (r_f , diagonal inferior) entre 6 rasgos por pares de 4 familias de *Swietenia macrophylla* en una plantación de 47,5 meses en Ucayali, Perú

$r_f \backslash r_g$	Ht	Hc	dab	dap	Hojas	Forma
Ht		0,97	0,73	0,51	0,65	0,76
Hc	0,95		0,96	0,45	0,71	0,66
dab	0,63	0,88		0,48	0,06	-0,33
dap	0,68	0,62	0,59		0,97	0,36
Hojas	0,52	0,89	0,17	0,78		0,27
Forma	0,075	0,58	-0,26	0,35	0,29	

Ht: altura total del árbol; Hc: altura comercial del árbol; dab: diámetro a la altura de la base; dap: diámetro a la altura del pecho; Hojas: número de hojas por árbol; Forma: forma del fuste del árbol.

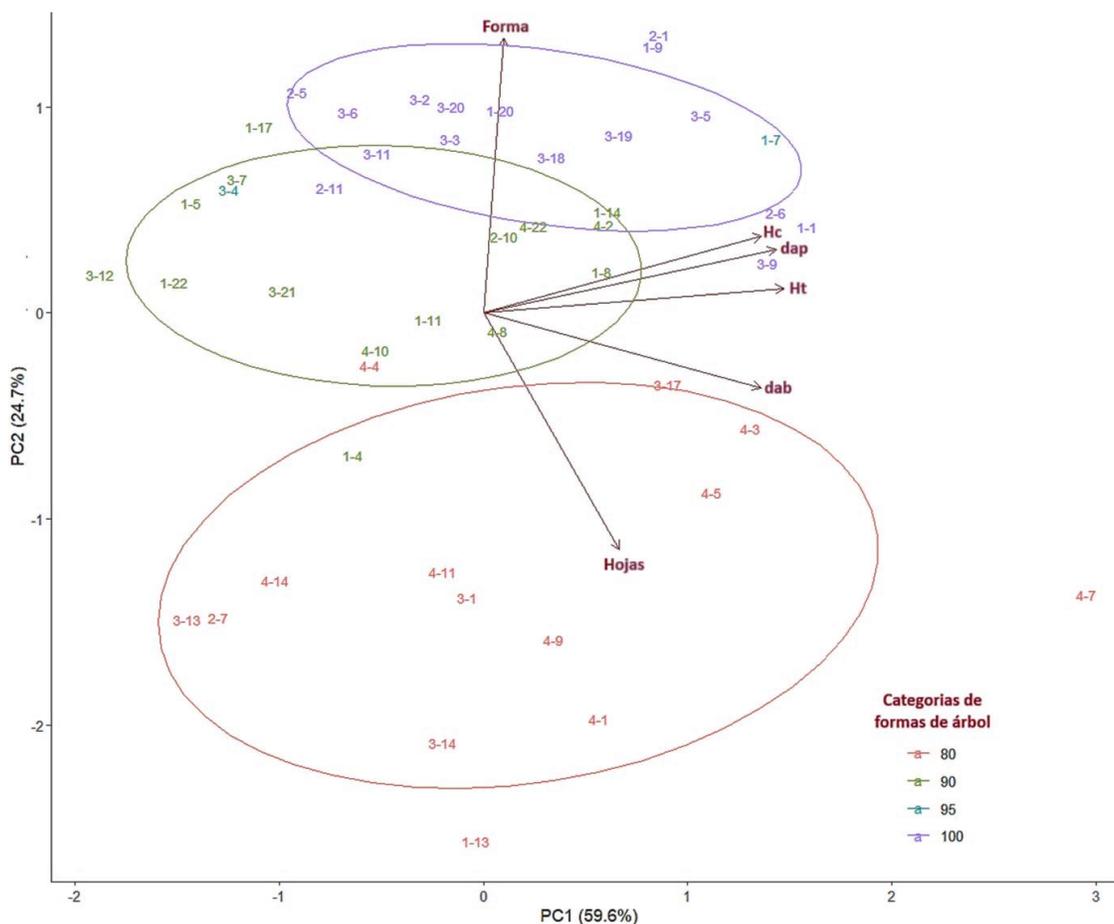


Figura 2. Análisis de componentes principales de los rasgos de 4 familias de *Swietenia macrophylla* en una plantación de 47,5 meses en Ucayali, Perú a grupados por la forma de los árboles (Ht: Altura total del árbol, Hc: Altura comercial del árbol, dab: Diámetro a la altura de la base, dap: Diámetro a la altura del pecho, Hojas: Número de hojas por árbol, Forma: Forma del fuste del árbol y CP: Componentes).

Tabla 5

Análisis de componentes principales de 4 familias de *Swietenia macrophylla* en una plantación de 47,5 meses en Ucayali, Perú

Rasgos	Contribución de rasgos a los componentes					
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6
dab	0,470	0,195	0,069	0,682	0,520	0,002
dap	0,495	-0,165	0,095	0,298	-0,788	-0,090
Forma	0,035	-0,715	0,653	-0,063	0,233	-0,054
Hc	0,470	-0,200	-0,408	-0,386	0,212	-0,615
Hojas	0,230	0,616	0,619	-0,375	-0,028	-0,209
Ht	0,508	-0,064	-0,103	-0,390	0,087	0,753
Variaciones	3,577	1,485	0,542	0,276	0,083	0,037
Importancia de componentes						
Desviación estándar	1,891	1,218	0,736	0,526	0,289	0,193
Proporción por componente	0,596	0,247	0,090	0,046	0,014	0,006
Proporción acumulativa	0,596	0,844	0,934	0,980	0,994	1,000

Ht: altura total del árbol; Hc: altura comercial del árbol; dab: diámetro a la altura de la base; dap: diámetro a la altura del pecho; Hojas: número de hojas por árbol; Forma: forma del fuste del árbol; CP: componentes.

De los resultados podemos deducir que el Ht, es el rasgo representativo del Componente 1, al contar con altas correlaciones con los rasgos del mismo componente (Tabla 4), mientras que el Componente 2, mantendría su representatividad con ambos rasgos puesto que ambos se encuentran correlacionados de manera negativas (Figura 2, Tabla 4). Estos resultados contribuyen al conocimiento de los genotipos estudiados de *S. macrophylla*, basado en la morfología de sus rasgos, heredabilidad y correlaciones genéticas observadas entre las variables los mismos que son necesarios para el manejo de las especies de interés (Campos-Musquis et al., 2023).

4. Conclusiones

La muestra de 4 familias de *S. macrophylla* en una plantación en Ucayali, Perú, solo la forma tiene diferencias significativas respecto a las familias. De los rasgos de altura y diámetro, obtenidos de la plantación de *S. macrophylla* en Ucayali, Perú, se concluye que la plantación tuvo bajo crecimiento lo que limita el control genético de los rasgos evaluados. Los componentes de varianza de 4 familias para los rasgos de altura, diámetro y número de hojas para *S. macrophylla* en Ucayali, Perú, tuvieron bajos coeficientes de heredabilidad atribuibles al bajo número de familias estudiadas, por lo que en futuros ensayos se debe ampliar el número de familias e individuos por familia.

La forma del fuste tuvo alta heredabilidad individual entre familias, precisión, con bajos coeficientes de variabilidad y altos coeficientes correlación genética y fenotípica con la altura comercial del árbol. Existe una alta asociación genética y fenotípica entre variables cuantitativas, por lo que se puede conocer la correlación genética de los rasgos a partir de variables fenotípicas de fácil medición. Del análisis de componentes principales se concluye que los rasgos pueden representarse en dos componentes

basados en la altura total en el componente 1 y la Forma y número de hojas del árbol en el componente 2.

Conflictos de intereses

La totalidad de los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional de Ucayali por el financiamiento del presente proyecto y al Instituto de Investigaciones de la Amazonia Peruana por su apoyo técnico. A CAPES por el financiamiento a través de la Beca de Doctorado Jorge M. Revilla-Chávez y al CNPq, por el otorgamiento de la Beca de Investigación a Alexandre M. Sebbenn.

Contribución de autores

J. M. Revilla-Chávez: Escritura – borrador original; **M. Aparecida de Moraes:** Análisis formal; **J. J. Revilla-Macedo:** Investigación, Colecta de datos y Curación de Datos; **W. F. Vergaray-Rengifo:** Investigación, Colecta de datos; **J. A. Mego-Pérez:** Investigación, Colecta de datos; **H. S. Saldaña-Dominguez:** Investigación, Colecta de datos; **E. S. Vigo-Ampuero:** Investigación, Colecta de datos; **A. C. Gonzales-Alvarado:** Curación de datos; **R. D. Manturano-Pérez:** Adquisición de financiación; **R. Casas-Reátegui:** Conceptualización, formulación o evolución de metas y objetivos generales de Investigación; **J. A. Mori-Vasquez:** Metodología, Desarrollo o diseño de metodología, creación de modelos; **A. M. Sebbenn:** Revisión y edición, Análisis formal.

ORCID

J. M. Revilla-Chávez [ID](https://orcid.org/0000-0001-5978-5146) <https://orcid.org/0000-0001-5978-5146>
M. Aparecida de Moraes [ID](https://orcid.org/0000-0003-3572-9291) <https://orcid.org/0000-0003-3572-9291>
J. J. Revilla-Macedo [ID](https://orcid.org/0009-0004-3088-529X) <https://orcid.org/0009-0004-3088-529X>
W. F. Vergaray-Rengifo [ID](https://orcid.org/0009-0006-6296-5758) <https://orcid.org/0009-0006-6296-5758>
J. A. Mego-Pérez [ID](https://orcid.org/0009-0002-6553-636X) <https://orcid.org/0009-0002-6553-636X>
H. S. Saldaña-Dominguez [ID](https://orcid.org/0009-0004-6628-6432) <https://orcid.org/0009-0004-6628-6432>
E. S. Vigo-Ampuero [ID](https://orcid.org/0009-0004-1578-7181) <https://orcid.org/0009-0004-1578-7181>
A. C. Gonzales-Alvarado [ID](https://orcid.org/0000-0003-3793-0271) <https://orcid.org/0000-0003-3793-0271>
R. D. Manturano-Pérez [ID](https://orcid.org/0000-0002-5063-8593) <https://orcid.org/0000-0002-5063-8593>
R. Casas-Reátegui [ID](https://orcid.org/0000-0003-3781-166X) <https://orcid.org/0000-0003-3781-166X>
J. A. Mori-Vasquez [ID](https://orcid.org/0000-0003-0570-8369) <https://orcid.org/0000-0003-0570-8369>
A. M. Sebbenn [ID](https://orcid.org/0000-0003-2352-0941) <https://orcid.org/0000-0003-2352-0941>

Referencias bibliográficas

Alcalá, R. E., De La Cruz, S., & Gutiérrez-Granados, G. (2015). Genetic structure and genetic diversity of *Swietenia macrophylla* in areas subjected to selective logging in Quintana Roo, Mexico. *Botanical Sciences*, 93, 819–828. <https://doi.org/10.17129/botsci.256>

- Andrade, R. L., Pico-Mendoza, J., Morillo, E., Buitrón, J., Meneses, S., Navarrete, B., Pinoargote, M., & Carrasco, B. (2022). Molecular characterization of mahogany tree (*Swietenia macrophylla* King, Meliaceae) in the remnant natural forest of Ecuador. *Neotropical Biodiversity*, 18, 222–228. <https://doi.org/10.1080/23766808.2022.2080334>
- Arlacon-Méndez, M., Maselli, S., van Zonneveld, M., Loo, J., Snook, L., Oliva, A., Franco, A., & Dumnil, J. (2023). Implications of community forest management for the conservation of the genetic diversity of big-leaf mahogany (*Swietenia macrophylla* King, Meliaceae) in the Maya Biosphere Reserve, Petén, Guatemala. *Trees, Forests and People*, 11, 100362. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2022.100362>
- Campos-Múzquiz, L., García, P., Flores-Gallegos, A., Castillo-Godina, R., & Rodríguez, R. (2023). Caracterización morfológica y determinación de la diversidad genética de aguacate criollo *Persea americana* Mill de Parras, Coahuila. *Biotecnia*, 25, 8–54. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v25i3.1919>
- Carvalho, P.E.R. (2006). Espécies arbóreas brasileiras. Embrapa Informação Tecnológica, Brasília, Brazil. 629 p.
- Castro, M. T., Montalvão, S. C. L., Peronti, A. L. B. G., & Monnerat, R. G. (2019). Ocorrência da cochonilha *Phenacoccus solenopsis* Tinsley (Hemiptera: Pseudococcidae) em mudas de mogno (*Swietenia macrophylla* King). *Entomologia Brasilis*, 12, 41–43. <http://dx.doi.org/10.12741/embrasilis.v12i1.791>
- Chinchilla-Mora, O., Corea-Arias, E., Meza-Picado, V., & Avila-Arias, C. (2021). Crecimiento, rendimiento y costos durante los primeros tres años de la caoba (*Swietenia macrophylla* King) establecida en sistemas agroforestales. *Kurú*, 18, 62–73. <http://dx.doi.org/10.18845/rfmk.v16i42.5540>
- Cornelius, J. P. (2009). The utility of the predictive decapitation test as a tool for early genetic selection for *Hypsipyla* tolerance in big-leaf mahogany (*Swietenia macrophylla* King). *Forest Ecology and Management*, 257, 1815–1821. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.02.003>
- Cornelius, J. P., & Watt, A. D. (2003). Genetic variation in a *Hypsipyla*-attacked clonal trial of *Cedrela odorata* under two pruning regimes. *Forest Ecology and Management*, 183, 341–349. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(03\)00142-7](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(03)00142-7)
- Degen, B., Ward, S. E., Lemes, M.R., Navarro, C., Cavers, S., & Sebbenn, A. M. (2012). Verifying the geographic origin of mahogany (*Swietenia macrophylla* King) with DNA-fingerprints. *Forensic Science International: Genetics*, 7, 55–62. <https://doi.org/10.1016/j.fsigen.2012.06.003>
- Farfán, V. E. G., Jasso, M., López, U., Vargas, H., & Ramírez, H. (2002). Parámetros genéticos y eficiencia de la selección temprana en *Pinus ayacahuite* Ehren. var. *ayacahuite*. *Revista Fitotecnia Mexico*, 25, 239–246. <http://dx.doi.org/10.35196/rfm.2002.3.239>
- GRU, Gobierno Regional de Ucayali. (2017). Zonificación ecológica económica base para el ordenamiento territorial de la región Ucayali. Pucallpa. 227 p.
- Hilje, L. (2020). En busca de un enfoque preventivo para el manejo del barrenador de las meliáceas (*Hypsipyla grandella*). *Revista de Ciencias Ambientales*, 54, 211–229. <https://doi.org/10.15359/rca.54-2.13>
- Jiménez, Q. (2007). Monografía de la familia Meliaceae. En Hammel, B.E., Grayum, M.H., Herrera, C., & Zamora, N. (Eds.). *Manual de las plantas de Costa Rica*, 6, 575–614, v. VI. Missouri Botanical Garden, Instituto Nacional de Biodiversidad, Museo Nacional de Costa Rica. 938 p.
- Kaiser, H. F. (1960). The application of electronic computers to factor analysis. *Educational and Psychological Measurement*, 20, 141–151.
- Lemes, M. R., Grattapaglia, D., Grogan, J., Proctor, J., & Gribel, R. (2007). Flexible mating system in a logged population of *Swietenia macrophylla* King (Meliaceae): implications for the management of a threatened neotropical tree species. *Plant Ecology*, 192, 169–179. <http://dx.doi.org/10.1007/s11258-007-9322-9>
- Navarro, C., & Hernández, G. (2004). Progeny test analysis and population differentiation of mesoamerican mahogany (*Swietenia macrophylla*). *Agronomía Costarricense*, 28, 37–51.
- Navarro, C., Montagnini, F., & Hernández, G. (2004). Genetic variability of *Cedrela odorata* Linnaeus: results of early performance of provenances and families from Mesoamerica grown in association with coffee. *Forest Ecology and Management*, 192, 217–227. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2004.01.037>
- Newton, A. C., Cornelius, J. P., Baker, P., Gillies, A. C. M., Hernandez, M., Ramnarine, S., Mese, J. F., & Watt, A. D. (1996). Mahogany as a genetic resource. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 122, 61–73. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8339.1996.tb02063.x>
- Oliveira, S. S., Campos, T., Sebbenn, A. M., & d'Oliveira, M. V. V. (2020). Using spatial genetic structure of a population of *Swietenia macrophylla* King to integrate genetic diversity into management strategies in Southwestern Amazon. *Forest Ecology and Management*, 464, 118040. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118040>
- Pastorino, R. M., & Corley, J. (2009). Bases genéticas de la resistencia de los árboles a las plagas. Serie Técnica: Manejo Integrado de Plagas Forestales. Cuadernillo N° 4, INTA, Bariloche, La Plata, Argentina, 14 p.
- Pérez-González, G., Domínguez-Domínguez, M., Martínez-Zurimendi, P., & Etchevers-Barra, J.D. (2012). Caracterización dasométrica e índice de sitio en plantaciones de caoba en Tabasco, México. *Madera y Bosques*, 18, 7–24. <https://doi.org/10.21829/myb.2012.181511>
- Pavlotzky, B., & Murillo, O. (2014). Ganancia genética esperada e interacción genotipo-ambiente en *Acacia mangium* en la Zona Norte de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 38, 8–17. <http://dx.doi.org/10.15517/rac.v38i2.17270>
- RStudio Team (2020). RStudio: Integrated Development for R. RStudio, PBC, Boston, MA URL <http://www.rstudio.com>.
- Resende, M. D. V. (2007a). Matemática e estatística na análise de experimentos e no melhoramento genético. Embrapa Florestas: Colombo, Brasil, 561 p.
- Resende, M. D. V. (2007b). SELEGEN-REML/BLUP: sistema estatístico e seleção genética computadorizada via modelos lineares mistos. Embrapa Florestas: Colombo, Brasil, 359 p.
- Resende, M. D. V. (2016). Software Selegen – REML/BLUP: a useful tool for plant breeding. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 16, 330–339. <https://doi.org/10.1590/1984-70332016v16n4a49>
- Revilla-Chávez, J. M., López-Galán, E. E., Gonzales-Alvarado, A. C., Sáenz-Ramírez, L. H., Mori-Vásquez, J. A., Rojas-Mego, K. C., Abanto-Rodríguez, C., & Sebbenn, A. M. (2024). Methodology for the phenotypic evaluation in *Guazuma crinita* trees in Ucayali, Peru. *Ciência Florestal*, 34, e71675. <https://doi.org/10.5902/1980509871675>
- Revilla-Chávez, J. M., & Sebbenn, A. (2024). Genetic control of quantitative and qualitative traits of *Calycophyllum spruceanum* in the Peruvian Amazon. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 24, e47262419. <https://doi.org/10.1590/1984-70332024v24n1a09>
- Revilla-Chávez, J. M., de Moraes, M. A., Pinchi-Ramírez, M. H., & Sebbenn, A. M. (2022). Productivity, adaptability, and stability in progeny tests across three environments in the Aguaytía River Basin, Ucayali, Perú. *Silvae Genetica*, 71, 72–80. <http://dx.doi.org/10.2478/sg-2022-0009>
- Ríos-Saucedo, J. C. C., Acuña-Carmona, E., Cancino-Cancino, J., Rubilar-Pons, R., Corral-Rivas, J. J., & Rosales-Serna, R. (2017). Dinámica de brotación y densidad básica de la madera en rebrotes de tres especies dendroenergéticas. *Agrociencia*, 51, 215–227. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i47.157>
- Romo-Lozano, J. L., Vargas-Hernández, J. J., López-Upton, J., & Ávila-Angulo, M. L. (2017). Estimación del valor financiero de

- las existencias maderables de cedro rojo (*Cedrela odorata* L.) en México. *Madera y Bosques*, 23, 111–120. <https://doi.org/10.21829/myb.2017.231473>
- Sampayo-Maldonado, S., Lopez-Upton, J., Sanchez-Monsalvo, V., & Jimenez-Casas, M. (2019). Genetic parameters of growth, and resistance to the shoot borer, in young clones of the tree *Cedrela odorata* (Meliaceae). *Revista de Biología Tropical*, 67, 554–561. <http://dx.doi.org/10.15517/rbt.v67i3.32053>
- Sanches, J. H. M., Mendizábal-Hernández, L. D. C., & Alba-Landa, J. (2019). Crecimiento de *Swietenia macrophylla* King en una plantación de cinco años de establecida en Emiliano Zapata, Veracruz, México. *Foresta Veracruzana*, 21, 17–22.
- Sebbenn, A. M., Licona, J. C., Mostacedo, B., & Degen, B. (2012). Gene flow in an overexploited population of *Swietenia macrophylla* King (Meliaceae) in the Bolivian Amazon. *Silvae Genetica*, 61, 212–220. <http://dx.doi.org/10.1515/sg-2012-0027>
- Ward, S. E., Wightman, K. E., & Santiago, B. R. (2008). Early results from genetic trials on the growth of Spanish cedar and its susceptibility to the shoot borer moth in the Yucatan Peninsula, Mexico. Amsterdam. *Forest Ecology and Management*, 255, 356–364. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.09.057>
- Wightman, K. E., Ward, S. E., Hagggar, J. P., Santiago, B. R., & Cornelius, J. P. (2008). Performance and genetic variation of big-leaf mahogany (*Swietenia macrophylla* King) in provenance and progeny trials in the Yucatan Peninsula of Mexico. *Forest Ecology and Management*, 255, 346–355. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2007.09.056>