

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE INGENIERIA FORESTAL

TESIS DE LICENCIATURA

**EVALUACIÓN DE ENSAYOS CLONALES DE *Hieronyma*
alchorneoides,
EN LA ZONA NORTE DE COSTA RICA.**

DIEGO ALBERTO ALVARADO CERDAS

CARTAGO, 2016.

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE INGENIERIA FORESTAL



**EVALUACIÓN DE ENSAYOS CLONALES DE *Hieronyma*
alchorneoides,
EN LA ZONA NORTE DE COSTA RICA.**

DIEGO ALBERTO ALVARADO CERDAS

CARTAGO, 2016.



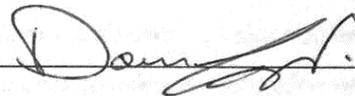
**EVALUACIÓN DE ENSAYOS CLONALES DE *Hieronyma*
alchorneoides,
EN LA ZONA NORTE DE COSTA RICA.**

Tesis presentada a la Escuela de Ingeniería Forestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica
como requisito parcial para optar al título de Licenciatura en Ingeniería Forestal.



Ing. Olman Murillo Gamboa, Ph.D.

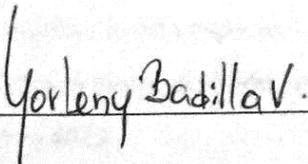
Profesor Guía



Ing. Dorian Carvajal Vanegas, Lic.

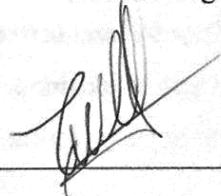
Coordinador de Trabajos

Finales de graduación



Ing. Yorlenny Badilla, M.Sc.

Lector



Ing. William Hernández, M.Sc.

Lector

**EVALUACIÓN DE ENSAYOS CLONALES DE *Hieronyma alchorneoides*,
EN LA ZONA NORTE DE COSTA RICA.**

Diego Alberto Alvarado Cerdas¹

RESUMEN

El pilón (*Hieronyma alchorneoides*) es una de las especies nativas que presenta mayor adaptación a plantaciones (Delgado, Marcelino, Murillo & Castillo; 2003), por sus características de crecimiento, múltiples usos, alto valor ecológico, está dentro de las especies nativas estratégicas del país (Piotto, 2001; Chowdhury & Chang, 2005; Gause, 2005). La propagación vegetativa se convierte en un método eficiente de reproducción del pilón dado sus limitaciones para su reproducción sexual; debido a las dificultades en la localización de fuentes semilleras, no se diferencia de manera evidente el sexo del árbol, la producción de frutos es muy variable en el tiempo y entre árboles, al ser semillas recalcitrantes se pierde su capacidad de germinación en pocos días después de la cosecha (Abdelnour, Aguilar & Valverde, 2011). En este documento se evaluó genéticamente el crecimiento en diámetro, valor comercial y volumen comercial de 2 ensayos clonales de *Hieronyma alchorneoides*, establecidos en Setiembre de 2012 de la zona norte de Costa Rica, con el objetivo de certificar la primera fuente semillera de Costa Rica. Se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa que establece la existencia de diferencias significativas en entre los genotipos evaluados. Los valores genéticos muestran una población élite conformada por los 10 mejores clones, cuya utilización generará una ganancia genética de 3,2% en diámetro que significa una reducción potencial de 0,7 años en el cultivo de esta especie. La interacción genotipo ambiente es baja ($c2int \leq 0,01$), por lo que la colección clonal de pilón presenta un comportamiento en crecimiento similar en la zona norte de Costa Rica.

Palabras clave: ensayo clonal, mejoramiento genético, silvicultura, especies nativas, reforestación.

¹ Estudiante de Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica.



**EVALUATION OF A *Hieronyma alchorneoides* CLONAL TESTS,
IN THE NORTH OF COSTA RICA**

Diego Alberto Alvarado Cerdas²

ABSTRACT

Pilón (*Hieronyma alchorneoides*) is one of the native species that presents greater adaptation to plantations (Delgado, Marcelino, Murillo & Castillo, 2003), due to its growth characteristics, multiple uses, high ecological value, is a strategic native species of the country (Piotto, 2001; Chowdhury & Chang, 2005; Gause, 2005). The vegetative propagation becomes an efficient method of reproduction of the pylon given its limitations for its sexual reproduction; Due to the difficulties in locating seed sources, the sex of the tree is not clearly differentiated, fruit production is very variable over time and among trees, being recalcitrant seeds, their germination capacity is lost in a few days After harvest (Abdelnour, Aguilar & Valverde, 2011). This paper evaluated the growth in diameter, commercial value and commercial volume of 2 clonal tests of *Hieronyma alchorneoides*, established in September 2012 in the northern zone of Costa Rica, with the objective of certifying the first seed source in Costa Rica. We reject the null hypothesis and accept the alternative hypothesis that establishes the existence of significant differences among the evaluated genotypes. The genetic values show an elite population conformed by the 10 best clones, whose use will generate a genetic gain of 3.2% in diameter that means a potential reduction of 0.7 years in the cultivation of this species. The environmental genotype interaction is low ($c2int \leq 0.01$), so the clonal collection of “pilón” presents a similar growth behavior in the northern zone of Costa Rica.

Keywords: clonal test, tree improvement, silviculture, native tree species, reforestation

² Estudiante de Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica.



AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Olman Murillo por la formación profesional mi carrera y la Msc. Yorleny Badilla por el apoyo en este proyecto.

A la profesora Cynthia Salas por su aporte en mi proceso formativo



DEDICATORIA

A Dios quien me da la vida y la fuerza para seguir adelante

A mis padres Óscar Alvarado Rodríguez y Guiselle Cerdas Chaves y a toda mi familia.

A todos mis amigos que a pesar de las circunstancias me apoyaron con consejo en situaciones buenas y no tan buenas.



ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	iv
ABSTRACT	v
DEDICATORIA	vii
INTRODUCCION GENERAL	1
OBJETIVO GENERAL	2
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
PLANTEAMIENTO DE HIPÓTEIS	2
CAPÍTULO I	3
GANANCIA GENÉTICA A LOS 4 AÑOS DE EDAD EN EL PROGRAMA CLONAL DE PILÓN (<i>Hieronyma alchorneoides</i>) EN SAN CARLOS, ZONA NORTE DE COSTA RICA.	3
Resumen	4
Introducción	5
Materiales y métodos	7
Diseño experimental	7
Análisis de datos	9
Resultados	10
Discusión	16
Conclusiones	18
Recomendaciones	19
Referencias	19
CAPÍTULO II	24
GANANCIA GENÉTICA A LOS 4 AÑOS DE EDAD EN EL PROGRAMA CLONAL DE PILÓN (<i>Hieronyma alchorneoides</i>) EN UPALA, ZONA NORTE DE COSTA RICA.	24
Resumen	25
Introducción	26
Materiales y métodos	28
Diseño experimental	28
Análisis de datos	30
Resultados	31
Discusión	38
Conclusiones	41
Recomendaciones	41
Referencias	42
CAPÍTULO III	46
INTERACCIÓN GENOTIPO-AMBIENTE Y GANANCIA GENÉTICA A LOS 4 AÑOS DE EDAD EN PLANTACIONES CLONALES DE PILÓN (<i>Hieronyma alchorneoides</i>) EN LA ZONA NORTE DE COSTA RICA	46
Resumen	47
Introducción	48
Metodología	50
Diseño experimental	50



Análisis de datos	52
Resultados	53
Discusión	61
Conclusiones	62
Referencias.....	63



ÍNDICE DE FIGURAS Y CUADROS

Cuadro 1. Parámetros genéticos de 19 clones y un testigo evaluado en un ensayo clonal de <i>H. alchorneoides</i> de 4 años de edad en la zona norte Costa Rica.	54
Cuadro 1. Parámetros genéticos de la población clonal de <i>H. alchorneoides</i> a los 4 años de edad, Santa Clara de San Carlos zona norte Costa Rica.	11
Cuadro 2. Matriz de correlaciones genéticas de los caracteres medidos pre raleo en 19 clones y un testigo evaluados en un ensayo clonal de <i>H. alchorneoides</i> de 4 años de edad, zona norte Costa Rica.	55
Cuadro 2. Matriz de correlaciones genéticas de los caracteres medidos pre raleo en 19 clones y un testigo evaluados en un ensayo clonal de <i>H. alchorneoides</i> de 4 años de edad. Santa Clara de San Carlos, zona norte de Costa Rica.	13
Cuadro 2. Matriz de correlaciones genéticas de los caracteres medidos pre raleo en 19 clones y un testigo evaluados en un ensayo clonal de <i>H. alchorneoides</i> de 4 años de edad. Upala, zona norte de Costa Rica.	34
Cuadro 3. Ranking genético de los caracteres volumen (m ³) y valor (\$) con su respectivo valor en los 10 mejores clones ensayo clonal de <i>H. alchorneoides</i> de 4 años de edad, zona norte Costa Rica.	56
Cuadro 3. Ranking, efectos genéticos aditivos de los caracteres volumen (m ³) y valor (\$) con sus respectiva media para los 10 ensayo clonal de <i>H. alchorneoides</i> de 4 años de edad. Santa Clara, zona norte Costa Rica.	15
Cuadro 3. Ranking, efectos genéticos aditivos de los caracteres volumen (m ³) y valor (\$) con sus respectiva media para los 10 mejores clones, ensayo clonal de <i>H. alchorneoides</i> de 4 años de edad. Upala, zona norte de Costa Rica.	35
Figura 1. Distribución de los 17 clones en los 6 bloques, con tres parejas de clones y una pareja testigo en cada bloque del ensayo de pilón en Upala, zona norte de Costa Rica.	29
Figura 1. <i>Ensayo genético para la evaluación de 19 clones de pilón (Hieronyma alchorneoides) en un diseño de seis bloques completos al azar, con tres parejas de rametos por clon, distribuidas aleatoriamente dentro de cada bloque, establecido en San Carlos, zona norte de Costa Rica.</i>	8
Figura 1. Valores genéticos y límites de confianza de (a) volumen comercial (m ³) y (b) valor (USD \$); en un ensayo clonal de <i>H. alchorneoides</i> de 4 años de edad, zona norte de Costa Rica.	58
Figura 2. <i>Ranking genético para el caracter volumen comercial (m³), las flechas muestran cambios importantes en la posición del ranking en ambos sitios (Santa Clara y Upala) para la colección clonal de H. alchorneoides a los 4 años de edad, zona norte de Costa Rica. ...</i>	60
Figura 2. <i>Valores genéticos y límites de confianza del: (a) volumen comercial (m³) y (b) valor (USD \$); en un ensayo clonal de H. alchorneoides de 4 años de edad Upala, zona norte de Costa Rica.</i>	37
Figura 2. <i>Valores genéticos y límites de confianza del: (a) volumen comercial (m³/ha) y (b) valor (USD \$/ha); en un ensayo clonal de H. alchorneoides de 4 años de edad. Santa Clara de San Carlos, zona norte de Costa Rica.</i>	14
Figura 3. <i>Ranking genético de los 10 mejores clones de para los caracteres volumen (m³) y valor comercial (USD \$); en un ensayo clonal de H. alchorneoides de 4 años de edad. Santa Clara de San Carlos zona norte, Costa Rica.</i>	16

Figura 3. *Ranking genético de los 10 mejores clones de para los caracteres volumen (m3) y valor comercial (USD \$); en un ensayo clonal de H. alchorneoides de 4 años de edad. Upala, zona norte de Costa Rica. 38*



INTRODUCCION GENERAL

Si se analiza el potencial de competitividad de Costa Rica ante el mercado internacional de maderas, es evidente que Costa Rica posee una escala de producción pequeña con altos costos de: producción, tierra y mano de obra; razón por la cual, pone a los productores nacionales en desventaja con los grandes productores suramericanos. Es por tanto que, la estrategia productiva de Costa Rica se debe basar en una silvicultura intensiva de alta productividad y de alta calidad con maderas del mayor valor posible de mercado. El *Hieronyma alchorneoides* (pilón) se convierte en una alternativa importante para la reforestación nacional, por su importancia económica, debido al uso que se la ha dado a la madera (Nehra & Becwar, 2005; Rottmann & Pearson, 2005; Chowdhury & Chang, 2005; Gause, 2005); es una de las especies que mayor adaptación en plantaciones posee por su alta productividad (Delgado, Montero, Murillo & Castillo; 2003).

Las plantaciones forestales actuales con el objetivo de suministrar productos industriales en su mayoría se establecen a partir de un germoplasma genéticamente mejorado (Evans & Turnbull, 2004; Johnson & Kirby, 2004; Nehra, 2005). Costa Rica posee una gran ventaja en el estudio de especies nativas dado que desde los años 40 ha publicado valiosos aportes) para la región en especies como cedro (*Cedrela odorata*) y el laurel (*Cordia alliodora*) (Boshier y Lamb, 1997). De manera que en los años 70 la Dirección General Forestal dentro del Ministerio de Agricultura estableció la primera red de ensayos para evaluar el comportamiento con más de 50 especies (Camacho, 1981). En respuesta al enorme esfuerzo realizado en los años 90 el programa de mejoramiento del pilón inició con un ensayo de procedencia-progenie, a partir de amplias colectas de árboles naturales sin criterios de selección estricta, realizados en las zonas del Pacífico sur y norte del país (Calvo et al, 1995; Calvo et al, 1997; Acuña 1999). Ante los positivos resultados se clonaron los mejores 19 individuos procedentes de las mejores familias de manera que se continuó con un desarrollo clonal para el pilón (Badilla, Murillo y Obando, 2002).

OBJETIVO GENERAL

- Evaluar dos ensayos clonales de pilón establecidos en la zona norte del país.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar las diferencias genéticas entre los 19 clones de pilón para cada sitio.
- Crear un ranking clonal para determinar cuáles son los mejores clones para cada ensayo.
- Calcular la ganancia genética obtenida para los caracteres DAP, volumen comercial y valor comercial.
- Proceder con el manejo del ensayo para convertirlo en un huerto semillero clonal de la especie en el país.
- Crear un ranking clonal para determinar cuáles son los mejores clones en general analizando los dos ensayos.
- Realizar un análisis de interacción genotipo por ambiente para determinar si son los mejores clones en ambos sitios.

PLANTEAMIENTO DE HIPÓTEIS

- No existen diferencias significativas en el crecimiento en diámetro, altura comercial y volumen entre los 19 genotipos evaluados.

CAPÍTULO I.
**GANANCIA GENÉTICA A LOS 4 AÑOS DE EDAD EN EL PROGRAMA CLONAL
DE PILÓN (*Hieronyma alchorneoides*) EN SAN CARLOS, ZONA NORTE DE COSTA
RICA.**

Resumen

Se evaluó los parámetros poblacionales de un ensayo clonal de 19 clones y un testigo de *Hieronyma alchorneoides* (pilón) en San Carlos, zona norte de Costa Rica. El ensayo forma parte del programa de mejoramiento genético de la especie dentro de la cooperativa de mejoramiento genético GENFORES. El diseño experimental corresponde a bloques completos al azar, donde cada parcela consiste en 6 rametos, distribuidos aleatoriamente en tres parejas dentro de cada bloque. Se utilizó el procedimiento REML/BLUP del software SELEGEN para el análisis de los datos. Se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa que establece la existencia de diferencias significativas en el crecimiento en diámetro, altura comercial y volumen entre los genotipos evaluados. Los valores genéticos muestran una población élite conformada por los mejores 10 clones, cuya utilización generará una ganancia genética de 3,6% en diámetro que significa una reducción potencial de 0,7 años en el cultivo de esta especie. El volumen comercial obtuvo una ganancia genética de 10,8 %, mientras que el valor de la plantación aumentará en un 13,1% si se utilizan los mejores 10 genotipos. El coeficiente de variación genético fue de 5,5%, lo cual implica la necesidad de aumentar la base genética del programa. Los valores de heredabilidad individual y heredabilidad media clonal fueron de 0,094 +- 0,036 cm y 70%; 0,082+-0,34m³ y 0,78; 74%+-0,032 USD\$ y 77% para los caracteres DAP, volumen comercial y valor comercial respectivamente.

Introducción

En Costa Rica la reforestación con plantaciones forestales ha generado una gran expectativa por sus beneficios económicos y ambientales (Piotto & Montagnini, 2004; Kanninen & Ugalde, 2004; Viquez, 2004). Las plantaciones con especies forestales nativas contribuyen a acelerar procesos de recuperación de la biodiversidad de sitios degradados (Montagnini y Rheingans, 1995; Guariguata et al., 1995). Costa Rica ha dedicado un importante esfuerzo al estudio y promoción de plantaciones con especies nativas con fines productivos y de venta de servicios (Rojas y Torres, 1990; Arnáez et al. 1992; Müller, 1993; Butterfield, 1990; Calvo et al. 1995; Murillo, Badilla y Obando, 2002; Delgado, Marcelino, Murillo & Castillo; 2003).

Entre las especies forestales nativas prioritarias para reforestación resalta el *Hieronyma alchorneoides* (pilón). En el año 1994 el proyecto “TRIALS III” (Especies nativas de la Zona Sur) determinó el alto potencial silvicultural de *H. alchorneoides* en reforestación (Calvo-Alvarado, Aria-Aguilar & Sibaja-Villegas, 1995). Es una especie nativa de crecimiento moderado, con una importancia económica potencial por el uso que se le ha dado a su madera en la construcción de viviendas, además de su alto valor ecológico. (Nehra & Becwar, 2005; Rottmann & Pearson, 2005; Chowdhury & Chang, 2005; Gause, 2005). El pilón ha mostrado una adaptación sobresaliente a condiciones de suelos pobres, ácidos ($\text{pH} < 5,0$), arcillosos y mal drenados (Delgado et al. 2003). Esta especie está dentro de las especies nativas consideradas como estratégicas del país, (Müller, 1993; Acuña, 1999; Badilla y Murillo, 2003).

El género *Hieronima* pertenece a la familia *Phyllanthaceae*, las poblaciones naturales de pilón se distribuyen naturalmente desde el sur de México y Belice continuando por todo el litoral caribe centroamericano hasta Panamá. Se encuentran también poblaciones de pilón en las Islas del Caribe y en Suramérica, así como desde Colombia hasta Brasil y Perú (Montero, 2007).

La especie pilón es dioica y los árboles alcanzan un tamaño mediano a grande, con dimensiones hasta los 45 m de altura y 1,2 m de diámetro a la altura del pecho con un fuste un cilíndrico (COSEFORMA, 1998; CATIE, 1997). En el país no existen fuentes semilleras registradas, su semilla es recalcitrante y no permite su almacenamiento por más de 3 meses (Müller 1997). De ahí la importancia del desarrollo de una tecnología clonal con esta especie; por lo que su propagación vegetativa basada en mini estaquillas es hoy día sumamente eficiente, con tasas altas de enraizamiento (> 95%) (Nuñez-Blanco, 1997).

Para una adecuada selección de árboles superiores genéticamente de esta especie, es necesario su valoración a través de ensayos genéticos, debidamente establecidos para estos fines (Pavlotzky y Murillo, 2012). Los esfuerzos de mejorar genéticamente la especie iniciaron en los años 90, como parte del proyecto de especies nativas de la zona sur y norte de Costa Rica (Calvo et al 1995). Los primeros trabajos correspondieron con ensayos de procedencia-progenie, a partir de colectas amplias de árboles naturales sin criterios de selección estricta, realizados en las zonas del Pacífico sur y norte del país (Calvo et al, 1995; Calvo et al, 1997; Acuña 1999). A los cuatro años de edad, el ensayo genético establecido en Santa Clara de San Carlos (zona norte) registró una ganancia genética en volumen total de aproximadamente un 7% (Acuña 1999). De este ensayo se seleccionaron y clonaron los mejores 19 individuos procedentes de las mejores familias, con los que se continuó con un desarrollo clonal (Badilla, Murillo y Obando, 2002).

El objetivo de esta investigación fue determinar la existencia de diferencias genéticas entre los 19 clones de pilón evaluados en un ensayo genético establecido en Santa Clara de San Carlos. Así como proceder con el manejo del ensayo para convertirlo en un huerto semillero clonal de la especie en el país.

Materiales y métodos.

Diseño experimental

El ensayo clonal de *Hieronyma alchorneoides* está ubicado en el cantón de Santa Clara (10°21'22" de longitud norte, 85°17'10" de latitud oeste) de la provincia de Alajuela, Costa Rica. En setiembre del año 2012 se estableció el ensayo con 19 tratamientos cada uno, en donde cada clon es un tratamiento y se incluyó un testigo de material de un vivero comercial de la zona norte de Costa Rica. Los árboles fueron plantados con un distanciamiento de 3m x 3m. (figura 1).

El diseño experimental del ensayo genético fue el propuesto y empleado por GENFORES (Murillo, Obando, Badilla & Araya, 2001). El cual consiste en un diseño de bloques completos al azar, con seis bloques o repeticiones. La parcela o unidad experimental consistió de seis rametos por cada clon, distribuidos aleatoriamente dentro de cada bloque en tres parejas independientes y físicamente separadas entre sí. Los clones proceden de una selección de los mejores genotipos de la evaluación de un ensayo de progenie establecido en la misma zona de Santa Clara de San Carlos (Acuña, 1999). En esa oportunidad se seleccionaron los mejores individuos dentro de las mejores familias: 405, 450, 401, 363, 410, 277, 58, 332 y 159 del estudio realizado en Santa Clara de San Carlos.

La distribución de los rametos en parejas independientes dentro de cada bloque, permite posteriormente realizar un primer raleo de una intensidad de un de 50%, donde se selecciona al mejor individuo de cada pareja, basado en sus atributos de adaptación, crecimiento y calidad de tronco (Murillo y Badilla 2004, Murillo 2011). Una vez ejecutado este primer raleo, el ensayo se convierte en un huerto semillero clonal.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	1	8	8	5	5	19	19	12	12	10	10	6	6	18	18	4	4	9	9	21	21
	2	13	13	15	15	9	9	13	13	16	16	20	20	2	2	19	19	15	15	12	12
	3	10	10	16	16	18	18	6	6	7	7	10	10	13	13	18	18	17	17	19	19
	4	T	T	7	7	2	2	17	17	5	5	12	12	T	T	16	16	6	6	7	7
I	5	17	17	19	19	T	T	20	20	13	13	17	17	3	3	10	10	3	3	9	9
	6	4	4	3	3	16	16	3	3	18	18	15	15	4	4	2	2	5	5	20	20
	7	18	18	9	9	11	11	21	21	19	19	16	16	7	7	21	21	11	11	T	T
	8	2	2	20	20	4	4	20	20	8	8	11	11	9	9	12	12	5	5	3	3
	9	6	6	17	17	10	10	11	11	12	12	21	21	18	18	20	20	16	16	8	8
	10	11	11	T	T	5	5	15	15	6	6	5	5	15	15	13	13	4	4	10	10
	11	12	12	3	3	7	7	4	4	21	21	8	8	T	T	2	2	17	17	6	6
	12	21	21	15	15	9	9	8	8	2	2	19	19	7	7	8	8	13	13	11	11
	1	4	4	16	16	7	7	17	17	18	18	10	10	2	2	T	T	7	7	5	5
	2	15	15	13	13	18	18	12	12	16	16	11	11	17	17	5	5	9	9	T	T
	3	6	6	12	12	9	9	19	19	2	2	6	6	7	7	10	10	4	4	21	21
	4	20	20	17	17	13	13	8	8	5	5	13	13	8	8	17	17	19	19	10	10
III	5	5	5	11	11	21	21	3	3	9	9	12	12	15	15	6	6	20	20	2	2
	6	19	19	3	3	15	15	6	6	7	7	5	5	4	4	11	11	15	15	3	3
	7	8	8	7	7	11	11	20	20	13	13	3	3	16	16	3	3	12	12	18	18
	8	10	10	20	20	17	17	10	10	T	T	19	19	9	9	13	13	21	21	8	8
	9	2	2	9	9	T	T	11	11	21	21	18	18	6	6	16	16	11	11	19	19
	10	T	T	8	8	16	16	4	4	12	12	20	20	15	15	18	18	12	12	20	20
	11	3	3	2	2	5	5	15	15	19	19	T	T	16	16	2	2	17	17	4	4
	12	18	18	6	6	10	10	21	21	4	4	21	21	7	7	8	8	13	13	9	9
	1	12	12	19	19	20	20	11	11	9	9	T	T	19	19	9	9	3	3	12	12
	2	5	5	3	3	2	2	7	7	2	2	6	6	3	3	12	12	2	2	5	5
	3	10	10	7	7	6	6	17	17	11	11	19	19	18	18	7	7	6	6	7	7
	4	4	4	8	8	13	13	4	4	10	10	20	20	9	9	15	15	T	T	10	10
V	5	T	T	6	6	5	5	18	18	16	16	21	21	16	16	8	8	21	21	3	3
	6	15	15	2	2	19	19	10	10	3	3	11	11	15	15	4	4	10	10	20	20
	7	17	17	21	21	8	8	9	9	19	19	2	2	17	17	18	18	13	13	12	12
	8	18	18	16	16	15	15	T	T	16	16	13	13	10	10	16	16	19	19	6	6
	9	21	21	4	4	12	12	5	5	9	9	7	7	18	18	17	17	T	T	9	9
	10	20	20	8	8	20	20	18	18	T	T	4	4	8	8	11	11	2	2	21	21
	11	11	11	15	15	6	6	21	21	13	13	5	5	17	17	5	5	16	16	4	4
	12	13	13	12	12	3	3	7	7	17	17	8	8	11	11	20	20	13	13	15	15

Figura 1. Ensayo genético para la evaluación de 19 clones de pilón (*Hieronyma alchorneoides*) en un diseño de seis bloques completos al azar, con tres parejas de rametos por clon, distribuidas aleatoriamente dentro de cada bloque, establecido en San Carlos, zona norte de Costa Rica.

El sitio de investigación corresponde a la zona de vida Bosque Muy Húmedo Premontano transición a Basal (Holdridge, 1987), con un promedio de precipitación de poco menos de 4000 mm, distribuidos en todo el año (marzo-abril con baja precipitación). Los suelos son del orden de los Inceptisoles, profundos, bien drenados y con alto contenido de materia orgánica (Ortiz y Cordero 2014). El ensayo clonal se plantó en el 2011; sin embargo, presentó una alta mortalidad por lo que se volvió a plantar nuevamente un año después con el uso de un hoyador portátil.



Se evaluó el DAP en centímetros (1,3 m de altura) la altura total en metros (h), altura comercial definida hasta la pérdida de la dominancia apical, calidad de las primeras cuatro trozas de 2,5 m de longitud según la metodología propuesta por Murillo y Badilla (2004).

Cada troza se calificó individualmente en una escala de 1 a 4; donde 1 equivale a la mejor calidad y 4 a la peor. Con base en la calificación de las primeras cuatro trozas (10 metros de fuste) se obtuvo posteriormente un valor de la calidad del árbol mediante el siguiente algoritmo:

$$\text{Calidad del árbol} = \text{Troza1} * 0,4 + \text{Troza2} * 0,3 + \text{Troza3} * 0,2 + \text{Troza4} * 0,1 \quad (1)$$

Los coeficientes de cada troza corresponden a su peso económico acorde con su posición dentro del tronco del árbol. Para una mejor comprensión de estos valores, la calidad se transformó a una escala de 1 a 100, donde 100 es la mejor calidad posible y 1 la peor. La transformación se obtuvo de la siguiente forma:

$$\text{Cal\%} = (1 - ((\text{Cal} - 1)/3)) * 100 \quad (2)$$

Análisis de datos.

Los datos fueron procesados por el software Avalúos Forestales (Murillo & Badilla, 2011), que realiza un despiece del árbol troza por troza y asocia su respectivo volumen con su calidad. Este programa permitió generar las variables: volumen comercial/árbol, calidad/árbol, valor comercial de árbol, volumen comercial/hectárea y valor comercial/hectárea. Finalmente, todos estos caracteres fueron analizados con el software SELEGEN (Resende, 2007)

El análisis genético se realizó utilizando el Modelo 2 de SELEGEN, que corresponde con el diseño Bloques Completos al Azar, ensayo clonal, varias plantas por parcela: $y = Xr + Za + Wp + e$. El software realiza el procedimiento REML/BLUP (Resende, 2007); donde “Y” es el vector de datos, “r” es el vector de los efectos de repetición (asumidos como fijos) y sumados a la media general, “a” es el vector de los efectos genéticos aditivos individuales (asumidos como aleatorios); “p” es el vector de los efectos de parcela (asumidos como aleatorios) y “e” es el vector del término del error o residuos (aleatorio).

Resultados

En el cuadro 1 se muestra los valores de los parámetros genéticos obtenidos de la población clonal de *H. alchorroides* a los 4 años de edad. La heredabilidad individual (h^2g) registra un valor aceptable para el diámetro al año 4 (9,4%), diámetro pos raleo y para el volumen comercial (8,2%). Puede también observarse en contraste, que el diámetro al año 2 registró valores sumamente bajos. El parámetro heredabilidad media clonal (h^2mc) para el carácter diámetro al año 4 registró un valor alto ($h^2mc = 0,8$; cuadro 2) Estos valores de heredabilidad media del clon reportados evidencian un alto control genético del carácter diámetro, con coeficientes de variación genético mayores al 5,5%, que indica un potencial de mejoramiento genético para el ensayo; donde el valor de heredabilidad registra un aumento sumamente significativo con respecto al registro del diámetro al año 2.

En el mismo cuadro 1 se puede observar también valores altos para la heredabilidad media clonal, en los caracteres calidad; volumen comercial; valor comercial por árbol El carácter volumen comercial registra valores similares al del diámetro, como se espera, dado que el diámetro forma parte integral para su estimación, con la ventaja de que se integró variables de tipo cuantitativas (diámetro, altura total y altura comercial) y de tipo cualitativas (calidad) para obtener resultados de los parámetros genéticos en dólares (Cuadro 1, Figura 2). Los parámetros poblacionales para el carácter valor (\$) arrojan una exactitud de selección alta (0,87); y un coeficiente de variación genotípica sumamente alto (27.98%), la heredabilidad para cada clon

en sentido amplio fue de: 0,0742+- 0,0324 dólares USD. Con estos valores se evidenció el éxito del progreso en el mejoramiento genético.

El parámetro genético exactitud (Acclon) al año 4 osciló en el ámbito de 63% al 90%, esto para los caracteres altura comercial e IMA (Cuadro 1). De manera que a mayor porcentaje Acclon, mayor será la confianza de la evaluación de los parámetros genéticos estimados.

Cuadro 1. Parámetros genéticos de la población clonal de *H. alchorneoides* a los 4 años de edad, Santa Clara de San Carlos zona norte Costa Rica.

Parámetros	d año 4 (<i>cm</i>)	d año 4 después del raleo (<i>cm</i>)	Altura comercial (<i>m</i>)	Calidad (%)	Volumen comercial (<i>m</i> ³)	Valor Comercial (\$/ <i>árbol</i>)
Vg	0,36	0,42	0,02	7,71	0,00006	0,44
Vparc	0,04	0,05	0,01	1,03	0,000005	0,03
Ve	3,48	3,16	1,55	201,01	0,00067	5,49
Vf	3,88	3,63	1,58	209,75	0,00074	5,96
h ² g	0,094 +- 0,036	0,115 +- 0,052	0,016 +- 0,015	0,037 +- 0,023	0,0826 +- 0,0338	0,0742 +- 0,0324
c ² parc	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00745	0,004
h ² mc	0,80	0,75	0,40	0,61	0,78	0,76
Acclon	0,90	0,87	0,63	0,78	0,88	0,87
CVgi%	5,51	5,77	1,95	3,62	17,23	20,64
SEP	0,27	0,32	0,12	1,74	17,23	0,3218
Media general	10,94	11,22	8,10	76,60	0,04524	3,22

Dónde: **Vg**: varianza genotípica; **Vparc**: varianza ambiental entre parcelas; **Ve**: varianza residual; **Vf**: varianza fenotípica individual; **h²g h²**: heredabilidad individual en el sentido amplio de los efectos genotípicos totales; **c²parc**: coeficiente de determinación de los efectos de parcela; **h²mc**: heredabilidad de la media de genotipo, asumiendo ausencia de pérdida de parcelas; **Acclon**: exactitud de la selección de genotipos, asumiendo ausencia de pérdida de parcelas; **CVgi%**: coeficiente de variación genotípica; **SEP**: desviación estándar del valor genotípico estimado, asumiendo sobrevivencia completa; **Media general del experimento**: Estimado de la media poblacional para el carácter.

Se analizó el carácter diámetro luego de realizar un raleo silvicultural del 50% dentro de cada parcela (Cuadro 1), como resultado la varianza genética después del raleo aumenta, pasando de 0,36 en el pre raleo a 0,42 en el post raleo; de manera que, la heredabilidad individual en sentido amplio (h^2g) aumenta pasando de 0,0938+- 0,0363 en el pre raleo a 0,1153+- 0,0518 en el post raleo; sin embargo, el coeficiente de variación genotípica aumenta (Cuadro 1),

El cuadro 2 muestra la matriz de correlaciones genéticas para los caracteres evaluados en el pre raleo al año 3 y 4, se resalta una correlación muy alta para el carácter diámetro entre el año 3 y 4 con un valor de 0,91, esto quiere decir que el comportamiento o tendencia entre ambos años es similar en un 91%. La matriz de correlaciones relaciona el valor comercial en 0,97 con el diámetro al año 4, la altura total la correlación genética entre el valor comercial es baja (0,20) y no existe correlación genética significativa para la calidad con los otros caracteres. El volumen comercial presentó una alta correlación con el diámetro al año 4 (0,98), mientras que con la altura total al mismo año se reflejó una baja correlación con un valor de 0,18, por lo tanto, la variable diámetro permite relacionar genéticamente de manera muy alta tanto el carácter volumen comercial como al valor comercial (Cuadro 2). Lo que indica que el diámetro es la variable de mayor interés para la selección de árboles superiores de pilón.

Cuadro 2. Matriz de correlaciones genéticas de los caracteres medidos pre raleo en 19 clones y un testigo evaluados en un ensayo clonal de *H. alchorneoides* de 4 años de edad. Santa Clara de San Carlos, zona norte de Costa Rica.

Variab	d año3	Altura total año3	Calidad año3	d año 4	Altura total año4	Altura comerci al año4	Calidad año4	Volumen comercial año 4	Valor comercial año 4
d año3	1,00	0,23	0,09	0,91	0,15	-0,04	-0,09	0,92	0,87
Altura total año3		1,00	0,23	0,24	0,60	0,50	0,57	0,28	0,31
Calidad en el año3			1,00	0,27	0,22	0,28	0,71	0,27	0,32
d año 4				1,00	0,20	-0,04	0,08	0,98	0,97
Altura total año4					1,00	0,87	0,40	0,18	0,20
Altura comercial año4						1,00	0,42	-0,04	-0,04
Calidad año4							1,00	0,06	0,12
Volumen comercial año 4								1,00	0,99
Valor comercial año 4									1,00

La figura 2 muestra el valor genético del volumen ($m^3 ha^{-1}$) y el valor (USD \$/ha) con sus respectivos límites de confianza. Los clones muestran diferencias con respecto a la media general; donde la colección clonal se diferencia claramente en tres partes: los clones que se encuentran por encima de la media general (21, 19, 9, 2 y 6); los clones que presentan valores genéticos cercana a la media fenotípica (20, 17, T, 3, 10, 7, 11 y 12) y el segmento que se encuentra por debajo de media general del experimento (18, 4, 13, 5, 15, 16, 8 y 16) (figura 2); existen diferencias significativas en la varianza genética de la población clonal de *H. alchornoides* tanto para el carácter volumen y el carácter valor. Esto se explica gráficamente con los intervalos de confianza (límite superior e inferior); dado que los intervalos no se traslapan para los clones: 21,19, 9 y los clones: 5 y 16 se demuestra que entre ellos hay

diferencias en el volumen comercial y el valor comercial y los clones de menor rendimiento son el clon 5 y el clon 16 (Figura 2).

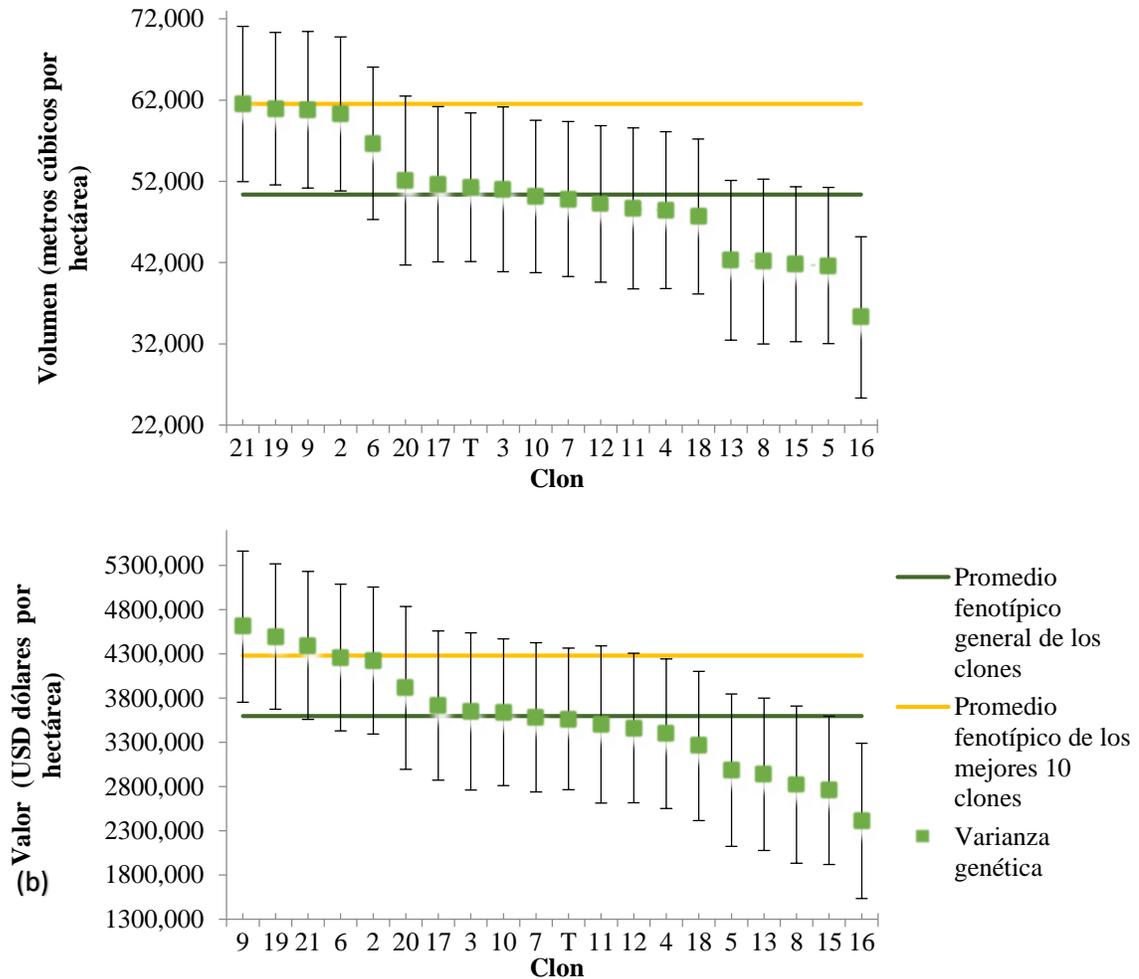


Figura 2. Valores genéticos y límites de confianza del: (a) volumen comercial (m^3/ha) y (b) valor (USD \$/ha); en un ensayo clonal de *H. alchorneoides* de 4 años de edad. Santa Clara de San Carlos, zona norte de Costa Rica.

Los mejores 10 clones de *H. alchorneoides* en volumen y valor comercial no registran diferencias significativas entre ellos, el promedio genotipo obtenido fue de $0,0502m^3$ para el volumen comercial, con una ganancia genética de 10,8 % (cuadro 3). En cuanto al valor los 10 mejores clones mostraron un promedio genotipo en dólares de 0,4225 USD\$; siendo su ganancia genética de 13,1% (Cuadro 3). El valor comercial es un carácter que integra las variables cualitativas (diámetro y alturas) y la variable cuantitativa (calidad), en el análisis genético según el cuadro 2 es el que mayor exactitud de análisis posee (87%), por lo que la confianza del análisis

usando este caracter es sumamente alta, el avaluó permitió crear un criterio de comparación muy bueno, presentando diferencias en el precio del mercado importantes; a pesar de que el valor obtenido corresponde a productos del primer raleo silvicultural.

Cuadro 3. Ranking, efectos genéticos aditivos de los caracteres volumen (m^3) y valor (\$) con sus respectiva media para los 10 ensayo clonal de *H. alchorneoides* de 4 años de edad. Santa Clara, zona norte Costa Rica.

Posición	Ganancia genética				Nueva media (USD\$)
	Clon	m^3 /clon	Clon	\$/clon	
1	21	0,0102	9	0,9266	4,1
2	19	0,0099	19	0,8762	4,0
3	9	0,0098	21	0,829	4,0
4	2	0,0096	6	0,7745	3,9
5	6	0,0089	2	0,7359	3,9
6	20	0,0077	20	0,6637	3,8
7	17	0,0068	17	0,5863	3,8
8	T	0,0061	3	0,5209	3,7
9	3	0,0055	10	0,469	3,6
10	10	0,0049	7	0,4225	3,6

En la figura 3 podemos observar un ranking clonal para los 10 mejores clones, donde los 7 mejores clones en volumen y valor comercial son: 21, 19, 9, 2, 6, 20 y 17. La posición en cada clon tanto en volumen como en valor comercial es similar, no hay cambios en más de tres posiciones (Figura 3). Lo que denota que los 10 mejores clones son altamente productivos y de alto valor comercial. La ganancia genética a partir de los diferenciales de selección es expresada en porcentaje relativo a la media general de los clones; lo cual permite estimar el tiempo real que gana el *H. alchorneoides* en llegar al año de cosecha, el carácter que permite transformar la ganancia genética de porcentaje a años es el diámetro.

Posición	Volumen	Valor Comercial
1	21	9
2	19	19
3	9	21
4	2	6
5	6	2
6	20	20
7	17	17
8	T	3
9	3	10
10	10	7

Figura 3. Ranking genético de los 10 mejores clones de para los caracteres volumen (m^3) y valor comercial (USD \$); en un ensayo clonal de *H. alchorneoides* de 4 años de edad. Santa Clara de San Carlos zona norte, Costa Rica.

Discusión

La selección clonal en el pilón para este experimento es eficiente ya que; la población estudiada muestra medias generales de crecimiento superiores a lo reportado en la zona norte de Costa Rica (Delgado, Marcelino, Murillo & Castillo; 2003). El éxito de continuar con el programa de mejoramiento genético requiere una amplitud en la variación genética, con coeficientes de variación superiores al 5%. En Costa Rica programas de mejoramiento exitosos en otras especies como *Tectona grandis* (Chacón, 2012) y *Gmelina arborea* en Siquirres, Limón (Salas, 2012) reportan coeficientes de variación en los parámetros genéticos superiores al 5%, con colecciones clonales de mayor número de clones que el presente experimento lo que explica el acervo genético tan reducido en este ensayo de pilón. Es por tanto el coeficiente de variación genotípico bajo para los 17 clones con un valor de 5,5% (Cuadro 1). La heredabilidad del experimento para el diámetro, volumen comercial y valor comercial mostró que la colección del pilón posee un alto control genético. Para otras especies: (1) *Dipteryx panamensis* en San Carlos, Alajuela (Martínez-Albán, Fallas-Valverde, Murillo-Gamboa, Badilla-Valverde; 2015); (2) *Acacia mangium* en zona norte de Costa Rica (Pavlotzky-Blank, Murillo-Gamboa, 2014); (3)

Tectona grandis (Chacón, 2012) en zona sur y zona norte de Costa Rica y (4) *Gmelina arborea* en Siquirres, Limón (Salas 2012); presentaron valores poblacionales en la heredabilidad del diámetro (h^2_{mc}) de: 0,8, 0,76, 0,97 y 0,69 respectivamente, lo cual confirma el alto potencial de mejoramiento que el programa con *H. alchorneoides* presenta.

El efecto positivo del raleo en la heredabilidad del diámetro al año 4, se debe a la eliminación del 50% de los árboles de menor crecimiento dentro de cada parcela (clon en cada bloque), esto se debe a que el objetivo del raleo está enfocado en reducir la expresión de los caracteres de inferior dimensión; por tanto, al disminuir el número de individuos defectuosos las diferencias entre los clones son más notorias por lo que la variabilidad genética aumenta y la heredabilidad media del genotipo baja dado que la población es más homogénea (Pavlotzky-Blank, Murillo-Gamboa, 2014); lo que permite que el error ambiental disminuya considerablemente y se exprese en mayor medida la heredabilidad dado que la varianza genética aumenta.

La variable de mejor comparación entre ensayos clonales de la misma especie es la variable diámetro, es la que presenta menor sesgo humano en su medición. Sin embargo, la variable valor comercial posee la gran ventaja que permite la comparación entre diferentes especies. Constituye una variable compuesta y en este caso presentó una alta correlación genética con el diámetro de 87% (Cuadro 2). Para términos de manejo el diámetro es la variable de mayor exactitud que permite definir el turno de cosecha, los efectos ambientales y el verdadero potencial genético que posee la colección clonal; el volumen comercial y el valor comercial son variables que permiten describir el rendimiento de los clones, pero no así su verdadero manejo. Para efectos de selección temprana y determinar en qué momento se puede evaluar genéticamente los clones, en términos de crecimiento, la matriz de correlación resulta práctica. En este experimento se encuentra una relación fuerte entre los años 3 y 4 para la variable diámetro, lo que permite una selección temprana para determinar el rendimiento de los clones.

La ganancia genética a partir del diámetro no establece un acortamiento del tiempo en el turno de cosecha importante, sin embargo, la calidad del volumen a cosechar que estos clones produce

es muy homogénea. La evaluación genética en relación al testigo no muestra diferencias significativas en crecimiento tanto para las variables: diámetro, volumen comercial y valor comercial, dado que el testigo se encuentra dentro de los mejores tratamientos del experimento. Según lo reportado por COSEFORMA en 1998 el turno de cosecha es a los 20 años, por lo que al utilizar los 10 mejores clones permite ganar de 0,7 años, dado la ganancia genética (%) para el diámetro es del 3,6 %.

La selección clonal de los mejores individuos es limitada, a pesar de que existen diferencias significativas en el crecimiento y el valor comercial. Solamente 3 clones son superiores (21, 19 y 9) con respecto a un clon (16). Por tanto, el ranking genético no mostró diferencias significativas entre los mejores 10 individuos. Un diferencial de selección sumamente estrecho y heredabilidades bajas evidencian que es necesaria la necesidad de ampliar la base genética. Es de suma importancia convertir el experimento en un jardín clonal de pilón, esto por medio un raleo al 50%, con el objetivo de garantizar una fuente de producción de semilla mejorada con valores potenciales en incrementos medios anuales de 2,7 cm/año en diámetro y 2,4 m/año en la altura total.

Conclusiones

Existen diferencias genéticas significativas en la variación del crecimiento para los clones de *H. alchorroides* en Santa Clara de San Carlos. Los valores genéticos muestran una población élite conformada por los mejores 10 clones, cuya utilización generará una ganancia genética en 3,6% en diámetro que significa una reducción potencial de 0,7 años en el cultivo de esta especie. El volumen comercial obtuvo una ganancia genética de 10,8 %, mientras que el valor de la plantación aumentará en un 13,1% si se utilizan los mejores 10 genotipos. El coeficiente de variación genético fue de 5,5%, lo cual implica la necesidad de aumentar la base genética del programa. Los valores de heredabilidad individual fueron de 0,094 +- 0,036 cm, 0,082+-0,34 m³ y 0,074+-0,032 USD\$ para los caracteres DAP, volumen comercial y valor comercial respectivamente. La heredabilidad media clonal fue de 80% para el DAP, 0,78% para el volumen comercial y 77% para el valor comercial.

Recomendaciones

Es conveniente seguir midiendo el ensayo para analizar cómo se comportan los clones a lo largo del ciclo, ya que es de suma importancia determinar la respuesta de los caracteres posterior al raleo silvicultural del 50%

Es necesario validar la superioridad de los clones en otros sitios para así determinar la interacción genotipo-ambiente, esto porque los parámetros analizados se basan en la expresión fenotípica en un ambiente seleccionado (Zobel & Talbert, 1988).

Referencias

- Acuña P. 1999. Evaluación de 2 ensayos de progenie en Santa Clara, San Carlos. Práctica de especialidad. B.Sc. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal. Cartago, Costa Rica. 58 p.
- Arnáez, E.; Moreira, I.; Rojas, F. & Torres, G. 1992. Especies forestales nativas: una estrategia para las zonas altas de Costa Rica. En: II Congreso Forestal Nacional. 25-27 noviembre. San José, Costa Rica: 26-27.
- Badilla, Y.; Murillo, O.; & Obando, G. 2002. Reforestación con especies nativas en la zona norte del país. En: Seminario Nacional sobre Especies Nativas. 3-5 de abril, 2002. Universidad Nacional, INISEFOR. Heredia, Costa Rica.
- Burger, W. (1995). Flora costaricensis: Euphorbiaceae. Fieldiana, Field Museum of Natural History. Chicago, USA.
- Butterfield, R. 1990. Native species for reforestation and land restoration: a case study from Costa Rica. Proceedings of the Fourteenth IUFRO World Congress. Volumen 2. Montreal, Canadá. 3-14 p.
- Calvo-Alvarado, J. C., Arias-Aguilar, D., & Sibaja-Villegas, A. (1995). Especies nativas para la reforestación en la zona sur de Costa Rica. En: Avances en la producción de semillas

forestales en América Latina. Memorias del Simposio, Managua, NI, 16-20 Oct. 1995, 1995-10-16.

Calvo-Alvarado, J.C., Arias, D., Sibaja, A. 1997. Evaluación de un ensayo de procedencia-progenie de *Hieronyma alchorneoides* a los doce meses de edad en la zona norte de Costa Rica. En: III Congreso Forestal Nacional. 27-29 agosto. San José, Costa Rica: 87-90p.

COSEFORMA 1998. Pílon en la Zona Norte de Costa Rica. MINAE/GTZ/ITCR/CCF. San José, Costa Rica.

Chacón P. 1999. Evaluación de ensayos clonales (GENFORES) de *Tectona grandis*, en la zona norte y zona sur de Costa Rica. Tesis de licenciatura. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal. Cartago, Costa Rica. 93 p.

Delgado, A., Montero, M., Murillo, O., & Castillo, M. (2003). Crecimiento de especies forestales nativas en la zona norte de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 27(1), 63-78.

Evans, J. (2009). *Planted forests: uses, impacts and sustainability*. Viale delle Terme di Caracalla, Rome: CABI.

Guariguata, M. R., Rheingans, R., & Montagnini, F. (1995). Early woody invasion under tree plantations in Costa Rica: Implications for forest restoration. *Restoration Ecology*, 3(4), 252-260.

Holdridge, L.R. 1987. *Ecología basada en zonas de vida*. San José, CR, IICA.

Martínez-Albán, V., Fallas-Valverde, L., Murillo-Gamboa, O., & Badilla-Valverde, Y. (2015). Potencial de mejoramiento genético en *Dipteryx panamensis* a los 33 meses de edad en San Carlos, Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 13(30), 03-12.

Montero, M., De los Santos Posadas, H., Kanninen, M. *Hyeronima alchorneoides*: Ecología y silvicultura en Costa Rica. Turrialba, Cartago: CATIE.



- Müller, E. 1993. Estado actual del conocimiento sobre especies forestales para la reforestación en Costa Rica. Documento del proyecto COSEFORMA/ITCR. Costa Rica. 29 p.
- Müller, Eva. 1997. Investigaciones en frutos y semillas de árboles individuales de cinco especies forestales de la región Huetar Norte de Costa Rica, con especial consideración en el almacenamiento. COSEFORMA. Documento del Proyecto No. 51. San José, Costa Rica. 237 p.
- Murillo, O; Obando, G; Badilla, Y; Araya, E. (2001). Estrategia de mejoramiento genético para el Programa de Conservación y Mejoramiento Genético de especies forestales del ITCR/FUNDECOR, Costa Rica. *Revista Forestal Latinoamericana* 16(30):273-285.
- Murillo, O.; Badilla, Y. & Obando, G. 2002. Posibilidades de reforestación con especies nativas en las zonas altas de Costa Rica. En: Seminario Nacional sobre Especies Nativas. 3-5 de abril, 2002. Universidad Nacional, INISEFOR. Heredia, Costa Rica.
- Murillo, O., & Badilla, Y. (2004). Calidad y valoración de plantaciones forestales. Manual. Taller de Publicaciones del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Forestal. Cartago, Costa Rica. 51p.
- Murillo, O; Badilla, Y. 2011. Avalúos forestales (software). Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica.
- Murillo, O; Espitia, M. & Castillo, C. (2012). Fuentes Semilleras para la Producción Forestal. 1ª ed. Editorial Domar S.A.S. Bogotá, Colombia.
- Nehra, N. S., Becwar, M. R., Rottmann, W. H., Pearson, L., Chowdhury, K., Chang, S., Gause, K. C. (2005). Forest biotechnology: Innovative methods, emerging opportunities. *In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant*,41(6), 701-717.

- Núñez Blanco, Y. (1997). Propagación vegetativa del cristóbal (*Platymiscium pinnatum*, BENTH); pilón (*Hyeronima alchorneoides* ALLEMO) y surá (No. 634.9562 N972p). Turrialba, CR: CATIE.
- Ortiz, E; Cordero, S. 2008. Atlas Digital de Costa Rica. CD-ROM. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.
- Pavlotzky-Blank, B., & Murillo-Gamboa, O. (2012). Este artículo fue publicado en español!!.. *Agronomía Mesoamericana*, 23(1), 93-106.
- Payn, T. Carnus, J. Freer-Smith. Kimberley M. Kollert, W. Liu, S. Orazio, C. Rodriguez, L. Silva, N. Wingfield, M. (2015). Changes in planted forests and future global implications, *Forest Ecology and Management* 352 (2015), 57–67.
- Piotto, D., Montagnini, F., Kanninen, M., Ugalde, L., & Viquez, E. (2004). Forest plantations in Costa Rica and Nicaragua: Performance of species and preferences of farmers. *Journal of Sustainable Forestry*, 18(4). 59-77.
- Resende, M. (2007). SELEGEN-REML/BLUP. Sistema Estadístico e Selecao Genética Computadorizada (Software). EMBRAPA. Brasilia, Brasil.
- Rojas, F. & Torres, G. 1990. Manejo de semillas y viverización para especies forestales nativas de importancia en las zonas altas de Costa Rica. Informe final. Proyecto de Investigación. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Forestal. Cartago, Costa Rica. 210 p.
- Salas Guevara, R. J. (2012). Evaluación de un ensayo genético de *Gmelina arborea* en Siquirres, Limón. Tesis de licenciatura. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal. Cartago, Costa Rica. 53 p.

Vallejos, J., Badilla, Y., Picado, F., & Murillo, O. (2010). Metodología para la selección e incorporación de árboles plus en programas de mejoramiento genético forestal. *Agronomía Costarricense*, 34(1), 105-119.

Wellenndorf, H., Ditlevsen, B. 1992. Introduction to forest genetics. Lecture note No. D-2. Danida Forest Seed Centre. Humlebeak, Denmark. 13p.

Zobel, B; Talbert, J. 1988. Técnicas de mejoramiento genético de árboles forestales. Editorial LIMUSA. México, D.F. México. 546 p.

}

CAPÍTULO II.
**GANANCIA GENÉTICA A LOS 4 AÑOS DE EDAD EN EL PROGRAMA CLONAL
DE PILÓN (*Hieronyma alchorneoides*) EN UPALA, ZONA NORTE DE COSTA RICA.**

Resumen

Se evaluó los parámetros poblacionales de un ensayo clonal de 17 clones y un testigo de *Hieronyma alchorneoides* (pilón) en Upala, zona norte de Costa Rica. El ensayo forma parte del programa de mejoramiento genético de la especie dentro de la cooperativa de mejoramiento genético GENFORES. El diseño experimental corresponde a bloques completos al azar, donde cada parcela consiste en 6 rametos, distribuidos aleatoriamente en tres parejas dentro de cada bloque. Se utilizó el procedimiento REML/BLUP del software SELEGEN para el análisis de los datos. Se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa que establece la existencia de diferencias significativas en el crecimiento en diámetro, altura comercial y volumen entre los genotipos evaluados. Los valores genéticos muestran una población élite conformada por los mejores 10 clones, cuya utilización generará una ganancia genética de 2,6% en diámetro que significa una reducción potencial de 0,5 años en el cultivo de esta especie. El volumen comercial obtuvo una ganancia genética de 9,7 %, mientras que el valor de la plantación aumentará en un 12,1% si se utilizan los mejores 10 genotipos. El coeficiente de variación genético fue de 4,96 %, lo cual implica la necesidad de aumentar la base genética del programa. Los valores de heredabilidad individual y heredabilidad media clonal fueron de 0,0622 \pm 0,0289 cm y 69%; 0,0694 \pm 0,0305 m^3 y 70%; 0,0693 \pm 0,0307 USD\$ y 68% para los caracteres DAP, volumen comercial y valor comercial, respectivamente.

Introducción

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO, 2016) señaló que la superficie mundial de plantaciones forestales comerciales aumentó de 60.000 hectáreas en el año 2000 a 325.000 hectáreas en el año 2016. En Costa Rica según la Oficina Nacional Forestal para el año 2014 se cosechó 1.017.000 m^3 de madera en troza, de las cuales el 77.6% se produjo a partir de plantaciones forestales. Además, se menciona que del año 2005 al año 2014 la tasa de reforestación se mantuvo constante (ONF 2015). Para lograr satisfacer la demanda nacional de madera actual es necesario reactivar la reforestación con fines productivos, así como también mejorar la calidad de la madera que se produce en plantaciones forestales; debido al incremento de importaciones de la madera. Entre las especies nativas maderables de Costa Rica se encuentra el pilón (*Hieronyma alchorneoides*), es una de las especies nativas que presenta mayor adaptación a plantaciones (Delgado, Marcelino, Murillo & Castillo; 2003); además esta especie por sus características de crecimiento, múltiples usos, está dentro de las especies nativas estratégicas del país (Piotto, 2001), la Escuela de Ingeniería Forestal (EIFO) y de la Cooperativa de Mejoramiento Genético Forestal (GENFORES) (Acuña, 1999).

Estudios previos sobre la silvicultura en Costa Rica a partir de los años 80's han identificado al pilón entre otras especies de árboles nativos como una especie de gran importancia para la reforestación en fincas y en pasturas degradadas (Butterfield 1990, Müller 1993, Butterfield & Fisher 1994, Butterfield 1995, Butterfield & Espinoza 1995, González & Fisher 1994, Nichols & González 1992, Arguedas & Chaverri 1997, Haggar, Briscoe, Butterfield; 1998). En el año 1995 el pilón destacó por su alto potencial silvicultural en la reforestación (Calvo-Alvarado, Aria-Aguilar & Sibaja-Villegas, 1995); un estudio de crecimiento por Delgado et al 2003 muestra que el pilón se adapta a condiciones de sitios con suelos: pobres, ácidos (pH 4,5-6) y arcillosos.

El género *Hieronyma* pertenece a la familia *Phyllanthaceae* es una especie dioica, de tamaño mediano a grande que alcanza dimensiones hasta los 45 m de altura, 1.2 m de diámetro a la altura del pecho y un fuste cilíndrico (COSEFORMA, 1998). Esta especie presenta limitaciones para su reproducción sexual, dado que: hay dificultades en la localización de fuentes semilleras, no se diferencia de manera evidente el sexo del árbol, la producción de frutos es muy variable en el tiempo y entre árboles, los frutos en su mayoría son depredados por aves, avispas; al ser semillas recalcitrantes se pierde su capacidad de germinación en pocos días después de la cosecha (Abdelnour, Aguilar & Valverde, 2011); es por esto que, la propagación vegetativa se convierte en un método eficiente de reproducción del pilón, con valores altos de enraizamiento mayores o iguales al 95% (Nuñez-Blanco, 1997).

La madera del pilón ha sido utilizada en construcciones de puentes, pisos, carrocerías, soportes, postes, durmientes de ferrocarril, barcos y estructuras marinas (Carpio 1992). La madera adulta posee un peso específico de 0,60 y una densidad de $0,79\text{g/cm}^3$, el duramen es de color café-rojizo, la albura se diferencia del duramen por su tono más claro (Solís 1992). En cuanto a la madera juvenil se reporta un 30% en albura, un duramen color rojo-claro, un peso específico de $0,48\text{ g/cm}^3$ (Moya, Leandro, Murillo 2009).

Las plantaciones forestales actuales con el objetivo de suministrar productos industriales en su mayoría se establecen a partir de un germoplasma genéticamente mejorado (Evans & Turnbull, 2004; Johnson & Kirby, 2004; Nehra, 2005). El mejoramiento genético forestal con una adecuada silvicultura aporta un impacto significativo a la conservación genética de la especie, así como en la productividad de los árboles; es también, una herramienta clave para impulsar la reforestación, ya que con un efectivo programa de mejoramiento se reduce el turno de aprovechamiento final, mejora la calidad, disminuye los costos y repercute en una mejora de los procesos industriales (Marco, 2005).

Los ensayos de mejoramiento genético para el pilón iniciaron a partir del 1994 con la evaluación de procedencia-progenie en 32 familias evaluadas (Calvo-Alvarado, Arias-Aguilar, Sibaja-Villegas, Camacho-Mora, & Fisher 1996). Para una adecuada selección de árboles altamente

productivos de *H. alchorneoides* es necesario validar la superioridad genética de las progenies previamente seleccionadas (Pavlotzky-Blank & Murillo-Gamboa, 2012). El objetivo de esta investigación fue determinar la existencia de diferencias genéticas entre los 17 clones de pilón evaluados en un ensayo genético establecido en Upala de la zona norte de Costa Rica. Así como proceder con el manejo del ensayo para convertirlo en un huerto semillero clonal de la especie en el país.

Materiales y métodos.

Diseño experimental

El ensayo clonal de *Hieronyma alchorneoides* está ubicado en el cantón de Upala (10°57'25.91" de longitud norte, 85°03'00.04" de latitud oeste) de la provincia de Alajuela, Costa Rica. En setiembre del año 2012 se estableció el ensayo con 17 tratamientos cada uno, en donde cada clon es un tratamiento y se incluyó un testigo de material de un vivero comercial de la zona norte de Costa Rica. Los árboles fueron plantados con un distanciamiento de 3m x 3m. (Figura 1).

El diseño experimental del ensayo genético fue el propuesto y empleado por GENFORES (Murillo, Obando, Badilla & Araya, 2001). El cual consiste en un diseño de bloques completos al azar, con seis bloques o repeticiones. La parcela o unidad experimental consistió de seis rametos por cada clon, distribuidos aleatoriamente dentro de cada bloque en tres parejas independientes y físicamente separadas entre sí. Los clones proceden de una selección de los mejores fenotipos de la evaluación de un ensayo de progenie establecido en la misma zona de Santa Clara de San Carlos (Acuña, 1999).

La distribución de los rametos en parejas independientes dentro de cada bloque, permite posteriormente realizar un primer raleo de una intensidad de un de 50%, donde se selecciona al mejor individuo de cada pareja, basado en sus atributos de adaptación, crecimiento y calidad de tronco (Murillo y Badilla 2004, Murillo 2011). Una vez ejecutado este primer raleo, el ensayo se convierte en un huerto semillero clonal.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
I	1	20	20	11	11	13	13	15	15	20	20	5	5	20	20	2	2	10	10	4	4
	2	T	T	8	8	4	4	12	12	10	10	8	8	13	13	19	19	8	8	20	20
	3	4	4	13	13	11	11	17	17	2	2	11	11	7	7	15	15	12	12	10	10
	4	12	12	10	10	5	5	T	T	19	19	T	T	16	16	11	11	17	17	6	6
	5	15	15	16	16	18	18	7	7	15	15	21	21	2	2	13	13	4	4	5	5
	6	18	18	17	17	21	21	6	6	17	17	10	10	18	18	21	21	18	18	21	21
	7	19	19	5	5	19	19	T	T	5	5	6	6	17	17	T	T	12	12	15	15
	8	6	6	7	7	8	8	16	16	11	11	12	12	7	7	5	5	7	7	19	19
	9	21	21	10	10	20	20	6	6	13	13	4	4	10	10	6	6	18	18	16	16
	10	5	5	11	11	16	16	18	18	7	7	19	19	11	11	16	16	8	8	17	17
	11	7	7	12	12	2	2	8	8	4	4	15	15	12	12	20	20	13	13	2	2
	12	2	2	13	13	10	10	21	21	12	12	5	5	13	13	T	T	7	7	11	11
III	1	10	10	5	5	17	17	7	7	16	16	8	8	17	17	10	10	6	6	21	21
	2	20	20	19	19	15	15	6	6	19	19	T	T	15	15	8	8	16	16	13	13
	3	T	T	4	4	16	16	11	11	18	18	11	11	21	21	T	T	12	12	8	8
	4	21	21	7	7	13	13	12	12	T	T	13	13	2	2	4	4	5	5	19	19
	5	17	17	12	12	2	2	20	20	7	7	16	16	10	10	19	19	2	2	7	7
	6	6	6	18	18	21	21	18	18	13	13	4	4	5	5	11	11	17	17	16	16
	7	11	11	5	5	T	T	5	5	2	2	6	6	T	T	13	13	20	20	10	10
	8	12	12	7	7	13	13	21	21	17	17	12	12	7	7	15	15	12	12	4	4
	9	8	8	10	10	11	11	4	4	6	6	19	19	10	10	20	20	6	6	5	5
	10	15	15	19	19	8	8	2	2	10	10	7	7	11	11	18	18	2	2	17	17
	11	16	16	12	12	10	10	20	20	11	11	18	18	12	12	7	7	15	15	11	11
	12	4	4	13	13	5	5	8	8	15	15	20	20	13	13	21	21	5	5	18	18
V	1	11	11	12	12	19	19	7	7	10	10	21	21	11	11	4	4	20	20	17	17
	2	6	6	16	16	8	8	4	4	16	16	15	15	12	12	13	13	2	2	4	4
	3	20	20	7	7	18	18	15	15	21	21	18	18	6	6	7	7	16	16	12	12
	4	13	13	8	8	16	16	10	10	13	13	8	8	2	2	5	5	8	8	11	11
	5	15	15	21	21	2	2	12	12	11	11	4	4	7	7	13	13	T	T	15	15
	6	10	10	19	19	11	11	20	20	6	6	16	16	5	5	11	11	19	19	16	16
	7	2	2	5	5	T	T	2	2	5	5	19	19	13	13	10	10	17	17	5	5
	8	17	17	7	7	13	13	17	17	20	20	17	17	7	7	20	20	18	18	8	8
	9	18	18	10	10	21	21	4	4	18	18	10	10	15	15	6	6	T	T	19	19
	10	5	5	11	11	T	T	19	19	8	8	20	20	11	11	21	21	10	10	2	2
	11	T	T	12	12	6	6	5	5	15	15	T	T	12	12	18	18	6	6	12	12
	12	4	4	13	13	17	17	7	7	12	12	21	21	13	13	10	10	5	5	7	7

Figura 1. Distribución de los 17 clones en los 6 bloques, con tres parejas de clones y una pareja testigo en cada bloque del ensayo de pilón en Upala, zona norte de Costa Rica



El sitio de investigación corresponde a la zona de vida Bosque Húmedo Tropical transición a perhúmedo (Holdridge, 1987). Con suelos del orden de los Inceptisoles (Ortiz y Cordero 2014), caracterizados por poseer un nivel de aguas muy alto (mal drenaje) y suelos ácidos (baja saturación en bases). La preparación el ensayo fue un subsolado a 30 cm de profundidad sobre las líneas de siembra, un rastreado y posteriormente se hicieron surcos.

El ensayo se evaluó a los años 3 y 4, donde se evaluó el DAP en centímetros (1,3 m de altura) la altura total en metros (h), altura comercial definida hasta la pérdida de la dominancia apical, calidad de las primeras cuatro trozas de 2,5m de longitud según la metodología propuesta por Murillo y Badilla (2004).

Cada troza se calificó individualmente en una escala de 1 a 4; donde 1 equivale a la mejor calidad y 4 a la peor. Con base en la calificación de las primeras cuatro trozas (10 metros de fuste) se obtuvo posteriormente un valor de la calidad del árbol mediante el siguiente algoritmo:

$$\text{Calidad del árbol} = \text{Troza1} * 0,4 + \text{Troza2} * 0,3 + \text{Troza3} * 0,2 + \text{Troza4} * 0,1 \quad (1)$$

Los coeficientes de cada troza corresponden a su peso económico acorde con su posición dentro del tronco del árbol. Para una mejor comprensión de estos valores, la calidad se transformó a una escala de 1 a 100, donde 100 es la mejor calidad posible y 1 la peor. La transformación se obtuvo de la siguiente forma:

$$\text{Cal}\% = (1 - ((\text{Cal} - 1)/3)) * 100 \quad (2)$$

Análisis de datos

Los datos fueron procesados por el software Avalúos Forestales (Murillo & Badilla, 2011), que realiza un despiece del árbol troza por troza y asocia su respectivo volumen con su calidad. Este programa permitió generar las variables: volumen comercial/árbol, calidad/árbol, valor

comercial de árbol, volumen comercial/hectárea y valor comercial/hectárea. Finalmente, todos estos caracteres fueron analizados con el software SELEGEN (Resende, EMBRAPA, Brasil)

El análisis genético se realizó utilizando el Modelo 2 de SELEGEN, que corresponde con el diseño Bloques Completos al Azar, ensayo clonal, varias plantas por parcela: $y = Xr + Za + Wp + e$. El software realiza el procedimiento REML/BLUP (Resende, 2007); donde “Y” es el vector de datos, “r” es el vector de los efectos de repetición (asumidos como fijos) y sumados a la media general, “a” es el vector de los efectos genéticos aditivos individuales (asumidos como aleatorios); “p” es el vector de los efectos de parcela (asumidos como aleatorios) y “e” es el vector del término del error o residuos (aleatorio).

Resultados

El cuadro 1 muestra los valores genéticos poblacionales obtenidos de *H. alchorroides* a los 4 años de edad en Upala de Zona Norte de Costa Rica. Los parámetros calculados por el software “Selegen” (Resende, 2007) permiten validar el potencial de mejoramiento genético de los 17 clones, este procedimiento permite separar los efectos ambientales de los genéticos y por medio del análisis de varianza, a partir del fenotipo se puede cuantificar cuanto realmente se heredó de las variables medidas y evaluadas. La heredabilidad se define como la porción de la variación genética que cambia con respecto a la variación genotípica de los clones de pilón; el valor que se obtuvo de manera indirecta es fundamental ya que cuantifica los beneficios reales que se obtuvieron a partir de la colección en estudio (Cuadro 2).

La heredabilidad media clonal (h^2_{mc}) del experimento presentó un valor bajo para las variables altura comercial, incremento medio anual en altura total, altura total y calidad; en cuanto a las variables diámetro, volumen comercial y valor comercial se evidencia un control genético del diámetro; dado que los valores obtenidos de la heredabilidad son valores mayores al 0,68 con coeficientes de variación genética aceptables (cerca al 5%) (Cuadro 1). En volumen

comercial y valor comercial los resultados de los parámetros genéticos presentados determinan que existe potencial de mejoramiento genético para los 17 clones de pilón.

Los caracteres volumen comercial y valor comercial logran integrar las variables de tipo cuantitativas (diámetro, altura total y altura comercial) y la variable de tipo cualitativa (calidad). La variable valor comercial tiene la ventaja de integrar al volumen comercial un valor que corresponde al producto aceptado en el mercado nacional según la dimensión de cada troza; de manera que los parámetros poblacionales para el carácter valor (\$) tienen una exactitud de selección alta (0,87), con un coeficiente de variación genotípica alto (27.98%); por lo que la heredabilidad para cada clon de en sentido amplio fue de: $0,0742 \pm 0,0324$ dólares USD, esto evidenció control genético en la variable valor, a pesar de que el análisis es del primer raleo para el ensayo.

Cuadro 1. Parámetros genéticos de 18 clones y un testigo evaluado en un ensayo clonal de *H. alchorneoides* de 4 años de edad. Upala, zona norte de Costa Rica.

Parámetros	d año 2 (cm)	d año 4 (cm)	Atura total año 4 (m)	Altura comercial (m)	Calidad (%)	Volumen comercial (m ³)	Valor Comercial (\$/árbol)
Vg	0,56	0,26	0,02	0,01	0,26	0,00	0,3
Vparc	0,16	0,22	0,01	0,01	8,29	0,00	0,4
Ve	2,55	3,62	1,68	2,51	274,13	0,00	3,9
Vf	3,28	4,10	1,71	2,57	282,69	0,00	4,6
h2g	0,1718+- 0,0469	0,0622+- 0,0289	0,0138+- 0,0136	0,0026+- 0,0059	0,0009+- 0,0035	0,0694+- 0,0305	0,0693+- 0,0307
c2parc	0,05	0,05	0,01	0,02	0,03	0,07	0,09
h2mc	0,88	0,69	0,39	0,10	0,36	0,70	0,68
Acclon	0,94	0,83	0,63	0,32	0,19	0,84	0,83
CVgi%	10,39	4,96	1,77	1,11	0,62	18,50	23,44
SEP	0,26	0,28	0,01	0,08	0,50	0,00	0,32
Media general	7,23	10,18	8,69	7,33	82,31	0,04	2,42

Dónde: **Vg**: varianza genotípica; **Vparc**: varianza ambiental entre parcelas; **Ve**: varianza residual; **Vf**: varianza fenotípica individual; **h2g h2**: heredabilidad individual en el sentido amplio de los efectos genotípicos totales; **c2parc**: coeficiente de determinación de los efectos de parcela; **h2mc**: heredabilidad de la media de genotipo, asumiendo ausencia de pérdida de parcelas; **Acclon**: exactitud de la selección de genotipos, asumiendo ausencia de pérdida de parcelas; **CVgi%**: coeficiente de variación genotípica; **SEP**: desviación estándar del valor genotípico estimado, asumiendo sobrevivencia completa; **Media general del experimento**: Estimado de la media poblacional para el carácter.

El cuadro 2 muestra el grado con que una característica cambia genéticamente como resultado de un cambio en otra característica por medio de una matriz de correlaciones genéticas. La correlación genética entre el diámetro del año 3 y el año 4 es no significativa, se correlacionan entre sí solo en un 78%, lo cual sugiere que no es conveniente la selección temprana de los mejores clones al año 3 ya que para el año 4 cambió en un 23% para la variable diámetro. En esta matriz las variables volumen comercial y valor comercial se correlacionan en un mayor grado con el diámetro que las demás variables, es de esperar que las demás variables que

también correlacionen con el volumen y valor comercial, ya que estas variables se construyen a partir de las demás; sin embargo, este modelo de proyección del valor de los productos muestra una aplicación práctica, ya que el diámetro es una variable de mayor precisión y menor sesgo al momento de medir y evaluar las variables dasométricas como la altura comercial, la altura total y la calidad.

Cuadro 2. Matriz de correlaciones genéticas de los caracteres medidos pre raleo en 19 clones y un testigo evaluados en un ensayo clonal de *H. alchorneoides* de 4 años de edad. Upala, zona norte de Costa Rica.

VARIABLES	d año3	Altura total año3	Calidad año3	d año 4	Altura total año4	Altura comercial año4	Calidad año4	Volumen comercial año 4	Valor año 4
d año3	1,00	0,75	0,12	0,78	0,53	0,46	0,16	0,82	0,84
Altura total año3		1,00	0,34	0,54	0,64	0,65	0,13	0,62	0,64
Calidad en el año3			1,00	0,25	0,45	0,43	0,40	0,27	0,22
d año 4				1,00	0,57	0,53	0,32	0,98	0,96
Altura total año4					1,00	0,95	0,34	0,64	0,63
Altura comercial año4						1,00	0,35	0,63	0,64
Calidad año4							1,00	0,34	0,32
Volumen año 4								1,00	0,99
Valor año 4									1,00
IMA (d) año4									
IMA (h) año4									

Los parámetros seleccionados para calcular la ganancia genética fueron el volumen comercial y el valor comercial, ambos criterios de selección logran captar la heredabilidad genética de los clones, el crecimiento fue evaluado por el criterio de la calidad que se valoró comercialmente como resultado del despiece en función de sus dimensiones, al cual se logró dar un valor de mercado en dólares al producto que este permite obtener.

El éxito de un buen programa de mejoramiento no solo tiene que ver con las altas heredabilidades que posea la población en mejoramiento genético; sino también, es muy valioso que la población tenga variación genética. Tanto el volumen y el valor comercial muestran los mejores valores de heredabilidad ($\geq 0,68$) y los coeficientes de variación genotípica de 18,5% y 23,4% respectivamente (Cuadro 1).

La ganancia genética (GG) se cuantificó por el cambio de la media general de la población y fue definida a partir del diferencial de selección ($g = \mu_1 - \mu_0$); donde μ_1 es la media de la población mejorada y μ_0 es la media de la población original; de manera tal, que este resultado permitió observar la superioridad de los clones con respecto a la media general del experimento. Al comparar el parámetro obtenido (g) para los caracteres volumen (m^3/clon) y el carácter valor ($\$/\text{clon}$) se comparó con respecto a la media general del experimento; y así, obtenemos una ganancia (g) en términos porcentuales (%) (Cuadro 3).

Cuadro 3. Ranking, efectos genéticos aditivos de los caracteres volumen (m^3) y valor (\$) con sus respectivas medias para los 10 mejores clones, ensayo clonal de *H. alchorneoides* de 4 años de edad. Upala, zona norte de Costa Rica.

Posición	Ganancia genética			
	Clon	m^3/clon	Clon	$\$/\text{clon}$
1	20	0,0111	6	0,83
2	2	0,0099	20	0,83
3	6	0,0095	2	0,81
4	10	0,0079	10	0,67
5	7	0,007	7	0,58
6	19	0,0061	19	0,50
7	21	0,0053	21	0,44
8	16	0,0046	16	0,38
9	4	0,004	11	0,34
10	11	0,0035	T	0,29

El cuadro 3 muestra que los clones en las primeras 10 posiciones del ranking prácticamente son los mismos tanto para el carácter volumen comercial como para el valor, dando que no presentan

variaciones significativas en las posiciones para el volumen como para el valor. En términos porcentuales ganancia fue de 30,9% para el volumen comercial y 34,5% para el valor comercial al utilizar el mejor clon; sin embargo, no tiene sentido práctico el utilizar solamente un clon ya que sin variabilidad genética no es posible el mejoramiento genético. Es entonces el valor del clon en la posición 10 el que me permite realmente conocer la ganancia genética en volumen comercial y valor comercial con valores de 9,7% y 12,1% respectivamente (Cuadro 3).

La figura 2 muestra el valor genético del volumen (m^3) y el valor (USD \$) con sus respectivos límites de confianza. Es fundamental conocer si existen diferencias genéticas significativas en el crecimiento de los 17 clones. Los clones 20, 2 y 6 muestran diferencias con respecto al clon 18, de manera que el clon 18 es el de menor rendimiento en términos de volumen y valor comercial (Figura 2). Dado que el análisis estadístico de Selegen se basa en un análisis de varianza; donde la variable analizada es la varianza genética, en la cual cada clon posee límites de confianza inferiores y superiores (Figura 2), el criterio para decidir si existen o no diferencias genéticas es dado por los intervalos de confianza. Si existe traslape entre los límites de confianza se puede afirmar que no hay diferencias entre los clones, en caso de no existir traslape en sus límites de confianza se interpreta como que si hay diferencias significativas. Los clones 10, 7, 19, 21, 16, 4, T, 8, 17, 5, 15, 17, 12, y 13 no presentan diferencias genéticas significativas entre ellos, por lo que no se puede afirmar cuáles de ellos son mayor o menor rendimiento y se comportaron genéticamente de la misma manera a la media general del experimento (Figura 2).

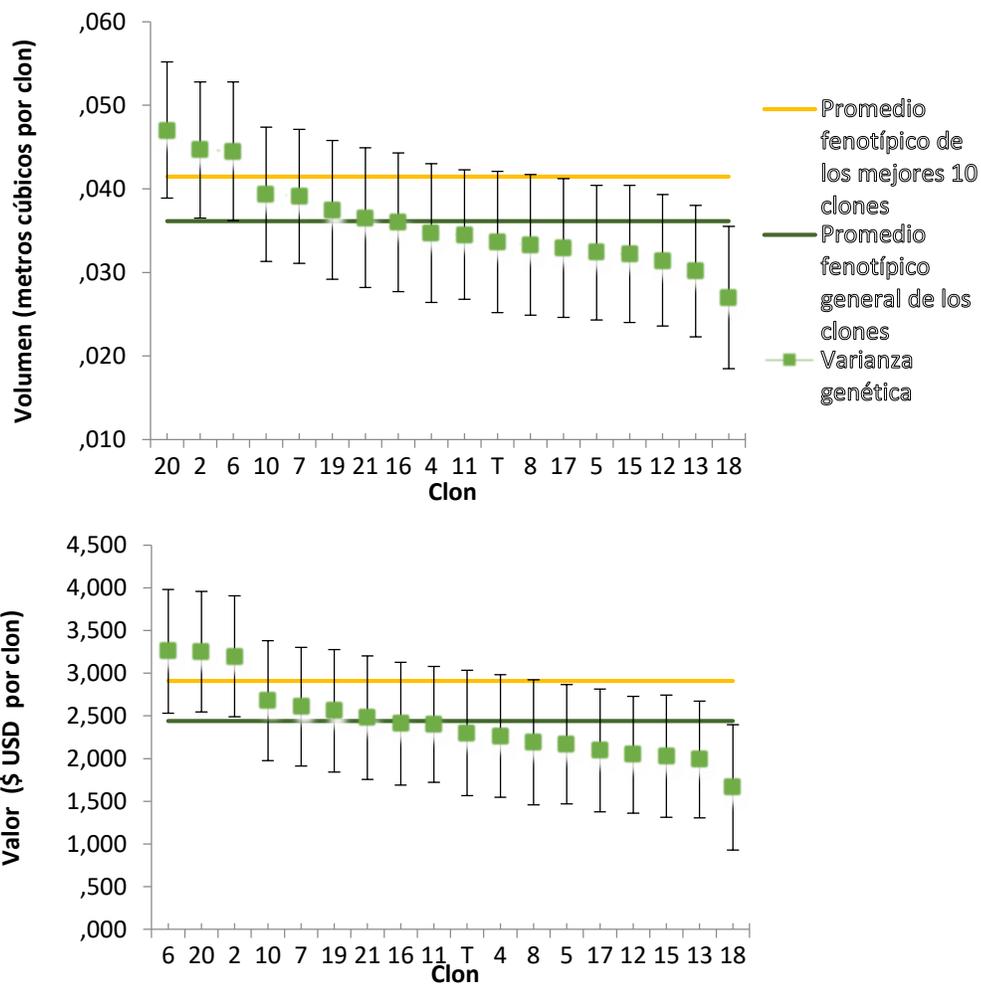


Figura 2. Valores genéticos y límites de confianza del: (a) volumen comercial (m^3) y (b) valor (USD \$); en un ensayo clonal de *H. alchorneoides* de 4 años de edad Upala, zona norte de Costa Rica.

Los mejores 10 clones de *H. alchorneoides* en volumen y valor comercial no registran diferencias significativas entre sí, el promedio genotipo obtenido fue de 43,11 m^3/ha , para el volumen comercial se obtiene una ganancia genética de 9,7% (Cuadro 3). En cuanto al valor

comercial, es un carácter que integra las variables cuantitativas (diámetro, altura comercial y altura total) y la variable cualitativas calidad; estos parámetros genéticos son expresados en dólares (USD\$). Los 10 mejores clones mostraron un promedio genotipo de 325 dólares por hectárea; siendo su ganancia genética es de 12,1% (Cuadro 3).

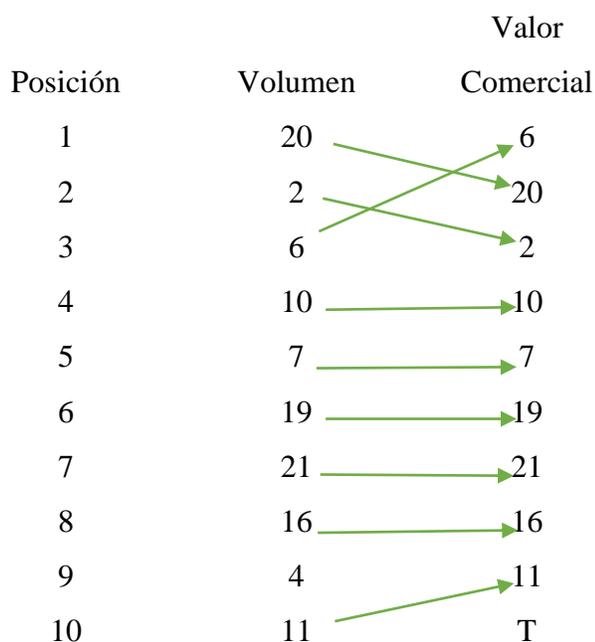


Figura 3. Ranking genético de los 10 mejores clones de para los caracteres volumen (m^3) y valor comercial (USD \$); en un ensayo clonal de *H. alchorneoides* de 4 años de edad. Upala, zona norte de Costa Rica.

La figura 3 mostró que el comportamiento del ranking es el mismo para los clones y las variables volumen comercial y valor comercial. Dado que los cambios en el ranking no son significativos y no existen diferencias genéticas significativas entre los clones

Discusión.

La selección clonal en el pilón para este experimento es eficiente dado que mostró medias generales de crecimiento superiores en incremento medio anual tanto para la altura como para el diámetro según lo reportado en la zona norte de Costa Rica (Delgado, Marcelino, Murillo & Castillo; 2003). Sin embargo, es evidente una limitación de selección por la base genética tan

estrecha con que cuenta el experimento, al ser evaluada por la heredabilidad y el coeficiente de variación genético, muestra limitaciones. El éxito de continuar con el programa de mejoramiento genético requiere una amplitud en la variación genética, con coeficientes de variación superiores al 5%; por ejemplo, en Costa Rica la cooperativa genética GENFORES posee programas de mejoramiento exitosos en otras especies como *Tectona grandis* (Chacón, 2012) y *Gmelina arborea* en Siquirres, Limón (Salas, 2012). Es por tanto el coeficiente de variación genotípico bajo para los 17 clones con un valor de 4,9% (Cuadro 1).

Las heredabilidad del experimento para el diámetro, volumen comercial y valor comercial es favorable para la especie dado que en programas de mejoramiento genético de otras especies: (1) *Dipteryx panamensis* en San Carlos, Alajuela (Martínez-Albán, Fallas-Valverde, Murillo-Gamboa, Badilla-Valverde; 2015); (2) *Acacia mangium* en zona norte de Costa Rica (Pavlotzky-Blank, Murillo-Gamboa, 2014); (3) *Tectona grandis* (Chacón, 2012) en zona sur y zona norte de Costa Rica y (4) *Gmelina arborea* en Siquirres, Limón (Salas 2012); presentaron valores poblacionales en la heredabilidad del diámetro (h^2mc) de: 0,8, 0,76, 0,97 y 0,69 respectivamente. Lo cual mostró que la colección del pilón posee un alto control genético en las variables

Los parámetros genéticos son una herramienta para evaluar las variables que se emplearon en el programa de mejoramiento. La variable de mejor comparación entre ensayos clonales de la misma especie es la variable diámetro, es la que presenta menor sesgo humano en su medición. En este caso fue la que presentó los parámetros genéticos más altos, con la gran ventaja que permite la comparación entre diferentes especies. La variable valor comercial es una variable compuesta y esta correlacionada genéticamente con el diámetro (Cuadro 2) de manera muy alta (96%). Este experimento tiene la enorme ventaja de incluir en el programa de mejoramiento genético variables como el valor comercial y volumen comercial, sin embargo, la variable que determina la ganancia genética en tiempo es el diámetro.

Para efectos de selección temprana y determinar en qué momento se puede evaluar las variables, la matriz de correlaciones resulta sumamente práctica, sin embargo, en este experimento no se

encuentra una relación fuerte entre los años 3 y 4, a pesar de que es de esperar que para el año 4 los individuos genéticamente superiores sean evidentes. El tema de manejo de malezas para este ensayo resultó ser un factor negativo debido a que afecta de manera directa la expresión fenotípica del diámetro y se cuantifica como error ambiental que presenta este experimento. El control experimental en este ensayo mostró un error, el crecimiento disminuyó no solo en términos de incrementos de crecimiento sino también en la calidad de los clones que resultó en una heredabilidad muy baja de 0.36 (Cuadro 2), en contraste la literatura reporta que la calidad de los individuos es sumamente heredable (Zobel & Talbert, 1988)

La ganancia genética a partir de los diferenciales de selección es dada por la formula $GG = (S \text{ entre clones} * h^2 mc)$ y es expresada en porcentaje relativo al diferencial de selección, en este caso corresponde a los 10 mejores clones. Esto permite estimar el tiempo real que gana el *H. alchornoides* en llegar al año de cosecha; donde la variable que permite establecer la relación con turno de cosecha es el diámetro. Según lo reportado por COSEFORMA en 1998 el turno de cosecha es a los 20 años, por lo que el utilizar los 10 mejores clones (cuadro 4) permite ganar de 0,5 años, lo cual no es significativo para el turno de cosecha reportado; sin embargo, en términos de volumen y valor si hay una ganancia significativa.

La selección clonal de los mejores individuos es limitada, a pesar de que existen diferencias significativas en el crecimiento y el valor comercial en dólares debido a que son solamente 3 clones superiores (20, 2 y 6) con respecto a un clon (18). Por tanto, el ranking genético no mostró diferencias significativas entre los mejores 10 individuos. Por lo que un criterio para seleccionar los mejores individuos fue el de seleccionar los que superaron la media general del experimento, lo anterior permite seleccionar estos clones: 20, 2, 6, 10, 7, 19, 21, 16, 4, y 11 como los mejores clones de Upala, zona norte de Costa Rica

Un diferencial de selección sumamente estrecho y heredabilidades bajas evidencian que es necesario ampliar la base genética. Es importante realizar un raleo con una intensidad de 50% y convertir el experimento en un jardín clonal de pilón, con el fin de garantizar una fuente de producción de semilla mejorada a futuro para la producción de plántulas genéticamente

superiores, fundamentado con base a los incrementos medios anuales de 2,54 cm/año para el diámetro y de 2,17 m/año para la altura total, en condiciones de sitio similares. Sin embargo, la recombinación de material genético disminuye las heredabilidades ya que aumenta la consanguinidad de las semillas. La selección de nuevos árboles plus o la incorporación de material genético de otras poblaciones que garanticen un bajo grado de parentesco es fundamental continuar con el programa de pilón. }

Conclusiones

Existen diferencias genéticas significativas en la variación del crecimiento para los clones de *H. alchornoides* en Upala, zona norte de Costa Rica. Los valores genéticos muestran una población élite conformada por los mejores 10 clones, cuya utilización generará una ganancia genética de 2,6% en diámetro que significa una reducción potencial de 0,5 años en el cultivo de esta especie.

El volumen comercial obtuvo una ganancia genética de 9,7 %, mientras que el valor de la plantación aumentará en un 12,1% si se utilizan los mejores 10 genotipos. El coeficiente de variación genético fue de 4,96 %, lo cual implica la necesidad de aumentar la base genética del programa. Los valores de heredabilidad individual fueron de 0,0622 +- 0,0289 cm, 0,0694+- 0,0305m³ y 0,0693+-0,0307 USD\$ para los caracteres DAP, volumen comercial y valor comercial respectivamente. La heredabilidad media clonal fue de 69% para el DAP, 70% para el volumen comercial y 68% para el valor comercial.

Recomendaciones

Es conveniente seguir midiendo el ensayo para ver cómo se comportan los clones a lo largo del ciclo, ya que es de suma importancia determinar la respuesta de las variables posterior al raleo silvicultural del 50%

Es necesario validar la superioridad de los clones en otros sitios para así determinar la interacción genotipo-ambiente, esto porque los parámetros analizados se basan en la expresión fenotípica en un ambiente seleccionado (Zobel & Talbert, 1988).

Referencias

- Abdelnour, A., Aguilar, M., & Valverde, L. (2011). Micropropagation of pilon (*Hieronyma alchorneoides*). *Agronomía Costarricense*, 35(2), 09-19.
- Acuña P. 1999. Evaluación de 2 ensayos de progenie en Santa Clara, San Carlos. Práctica de especialidad. B.Sc. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal. Cartago, Costa Rica. 58 p.
- Arguedas M., Chaverri P. 1997. Nuevo reporte en 7 especies forestales nativas en Costa Rica. III Congreso Forestal Nacional. San José, Costa Rica. p. 152-154.
- Barrantes, A; Ugalde, A. (2015, agosto 4) Usos y aportes de la madera en Costa Rica. Estadísticas 2014. Consultado de <http://www.oficinaforestalcr.org/article/usos-y-aportes-de-la-madera-en-costa-rica/>
- Butterfield, R. 1990. Native species for reforestation and land restoration: a case study from Costa Rica. Proceedings of the 14th IUFRO World Congress. Vol. 2. Montreal, Canadá. p. 3-14.
- Butterfield, R., Fisher, R. 1994. Untapped potential: native species for reforestation. *Journal of Forestry* 92(6): 37-40.
- Butterfield R. 1995. Desarrollo de especies forestales en tierras bajas húmedas de Costa Rica. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 42 p.
- Butterfield R., Espinoza, M. 1995. Screening trial of 14 tropical hardwoods with an emphasis on species native to Costa Rica: fourth year results. *New Forests* (9): 135-145.
- Chacón P. 1999. Evaluación de ensayos clonales (GENFORES) de *Tectona grandis*, en la zona norte y zona sur de Costa Rica. Tesis de licenciatura. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal. Cartago, Costa Rica. 93 p.

- Calvo-Alvarado, J. C., Arias-Aguilar, D., Sibaja-Villegas, A., Camacho-Mora, P., & Fisher, R. F. (1996). Evaluación de un ensayo de procedencia-progenie a los dos años de edad para *Hieronyma oblonga* en la Zona Norte de Costa Rica. .IV Taller Nacional de Investigación Forestal y Agroforestal. Memoria, Guácimo, CR, 9-11 Dic. 1996.
- Calvo-Alvarado, J. C., Arias-Aguilar, D., & Sibaja-Villegas, A. (1995). Especies nativas para la reforestación en la Zona Sur de Costa Rica. In Avances en la producción de semillas forestales en América Latina. Memorias del Simposio, Managua, NI, 16-20 Oct. 1995, 1995-10-16.
- Carpio, I. 1992. Maderas de Costa Rica, 150 especies forestales. Editorial de la Universidad de Costa Rica, Costa Rica. 338 p.
- COSEFORMA 1998. Pilon en la Zona Norte de Costa Rica. MINAE/GTZ/ITCR/CCF. San José, Costa Rica.
- Delgado, A.; Montero, M.; Murillo, O.; Castillo, M. 2003. Crecimiento de especies forestales nativas en la zona norte de Costa Rica. Agronomía Costarricense 27(1): 63-78.
- Evans, J. (2009). Planted forests: uses, impacts and sustainability. Viale delle Terme di Caracalla, Rome: CABI.
- FAO. 2016. El Estado de los bosques del mundo 2016. Los bosques y la agricultura: desafíos y oportunidades en relación con el uso de la tierra. Roma.
- Haggar, J.; Briscoe C.; Butterfield R. 1998. Native species: a resource for the diversification of forestry production in the lowland humid tropics. Forest Ecology and Management (106): 195-203.
- Holdridge, L.R. 1987. Ecología basada en zonas de vida. San José, CR, IICA.
- González, E.; Fisher, R. 1994. Growth of native species planted on abandoned pasture land in Costa Rica. Forest Ecology and Management (70): 159-167.

- Moya, R., Leandro, L., & Murillo, O. (2009). Características de la madera de *Terminalia amazonia*, *Vochysia guatemalensis* y *Hyeronima alchorneoides* plantadas en Costa Rica. *Bosque (Valdivia)*, 30(2), 78-87.
- Marcó, M.A. (2005). *Conceptos Generales del Mejoramiento Genético Forestal y su Aplicación a los Bosques Cultivados de la Argentina*. Buenos Aires, Argentina.
- Martínez-Albán, V., Fallas-Valverde, L., Murillo-Gamboa, O., & Badilla-Valverde, Y. (2015). Potencial de mejoramiento genético en *Dipteryx panamensis* a los 33 meses de edad en San Carlos, Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 13(30), 03-12.
- Montero, M. (2007). *Hyeronima alchorneoides: Ecología y silvicultura en costa rica*. Turrialba, Cartago: CATIE.
- Murillo, O; Obando, G; Badilla, Y; Araya, E. (2001). Estrategia de mejoramiento genético para el Programa de Conservación y Mejoramiento Genético de especies forestales del ITCR/FUNDECOR, Costa Rica. *Revista Forestal Latinoamericana* 16(30):273-285.
- Murillo, O., & Badilla, Y. (2004). *Calidad y valoración de plantaciones forestales*. Manual. Taller de Publicaciones del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Forestal. Cartago, Costa Rica. 51p.
- Murillo, O; Badilla, Y. 2011. *Avalúos forestales (software)*. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica.
- Müller, E. 1993. Estado actual del conocimiento sobre especies forestales para la reforestación en Costa Rica. Documento del proyecto COSEFORMA/ITCR. Costa Rica. 29 p.
- Nichols, D., González, E. 1992. *Especies nativas y exóticas para la reforestación en la zona Sur de Costa Rica*. San José, Costa Rica. 84 p.

- Núñez Blanco, Y. (1997). Propagación vegetativa del cristobol (*Platymiscium pinnatum*, BENTH); pilón (*Hyeronima alchorneoides* ALLEMO) y surá (No. 634.9562 N972p). Turrialba, CR: CATIE.
- Ortiz, E; Cordero, S. 2014. Atlas Digital de Costa Rica. CD-ROM. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.
- Pavlotzky-Blank, B., & Murillo-Gamboa, O. (2012). Ganancia genética esperada en *Acacia mangium* en Los Chiles, Zona Norte de Costa Rica. *Agronomía Mesoamericana*, 23(1), 93-106.
- Pavlotzky, B., & Murillo, O. (2014). Ganancia genética esperada e interacción genotipo-ambiente en *Acacia mangium* en la zona norte de Costa Rica. *Agronomía costarricense: Revista de ciencias agrícolas*, 38(2), 8-17.
- Piotto, D. (2001). Plantaciones forestales en Costa Rica y Nicaragua: comportamiento de las especies y preferencias de los productores. *Forest plantations in Costa Rica and Nicaragua: species performance and farmers' preferences* (No. Thesis P662). CATIE, Turrialba (Costa Rica).
- Salas Guevara, R. J. (2012). Evaluación de un ensayo genético *Gmelina arborea* en Siquirres, Limón. Tesis de licenciatura. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal. Cartago, Costa Rica. 53 p.
- Solís, C. 1992. Características de la madera de 20 especies nativas de la Región Huetar Norte. COSEFORMA. Publicación No. 23. San José, Costa Rica. 65 p.
- Resende, M. (2007). SELEGEN-REML/BLUP. Sistema Estadístico e Seleçao Genética Computadorizada (Software). EMBRAPA. Brasilia, Brasil.
- Zobel, B; Talbert, J. 1988. Técnicas de mejoramiento genético de árboles forestales. Editorial LIMUSA. México, D.F. México. 546 p.

CAPÍTULO III.
INTERACCIÓN GENOTIPO-AMBIENTE Y GANANCIA GENÉTICA A LOS 4 AÑOS
DE EDAD EN PLANTACIONES CLONALES DE PILÓN (*Hieronyma alchorneoides*)
EN LA ZONA NORTE DE COSTA RICA

Resumen

Se evaluó los parámetros poblacionales e interacción genotipo por ambiente de dos ensayos clonales con 19 clones y un testigo de *Hieronyma alchorneoides* (pilón) en la zona norte de Costa Rica. Los ensayos forman parte del programa de mejoramiento genético de la especie dentro de la cooperativa de mejoramiento genético GENFORES. El diseño experimental corresponde a bloques completos al azar, donde cada parcela consiste en 6 rametos, distribuidos aleatoriamente en tres parejas dentro de cada bloque. Se utilizó el procedimiento REML/BLUP del software SELEGEN para el análisis de los datos. Se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa que establece la existencia de diferencias significativas en el crecimiento en diámetro, valor comercial y volumen comercial entre los genotipos evaluados. Los valores genéticos muestran una población élite conformada por los 10 mejores clones, cuya utilización generará una ganancia genética de 3,2% en diámetro que significa una reducción potencial de 0,7 años en el cultivo de esta especie. El volumen comercial obtuvo una ganancia genética de 10,8 %, mientras que el valor de la plantación aumentará en un 15,2% si se utilizan los mejores 10 genotipos. El coeficiente de variación genético fue de 4,7%, lo cual implica la necesidad de aumentar la base genética del programa. Los valores de heredabilidad individual y heredabilidad media clonal fue de 0,061+- 0,02cm y 70%; 0,0604 +- 0,0203 y 74%; 0,07 +- 0,02 y 84% respectivamente para los caracteres DAP, volumen comercial y valor comercial. La interacción genotipo ambiente en el sitio de Upala y San Carlos es baja ($c_{2int} \leq 0,01$), de los mejores 10 clones solo 2 clones no repiten el comportamiento en ambos sitios, estos son el clon 16 y 17; por lo que no se debe separar la colección clonal para obtener una productividad similar en diferentes sitios de la zona norte de Costa Rica.

Introducción

El pilón (*Hieronyma alchorneoides*) es una especie nativa de rápido crecimiento perteneciente a la familia *Phyllanthaceae*. Las poblaciones naturales de pilón se distribuyen naturalmente desde el sur de México hasta la cuenca del Amazonas en Brasil y las islas de las Indias Orientales (Franko, 1990). En Costa Rica el pilón se distribuye naturalmente en el bosque húmedo tropical de las zonas bajas del sur, el norte y el caribe (COSEFORMA, 1998). Esta especie posee una importancia económica para el país debido al uso que se le ha dado a la madera, es también una especie de alto valor ecológico. (Nehra & Becwar, 2005; Rottmann & Pearson, 2005; Chowdhury & Chang, 2005; Gause, 2005). Para la reforestación en Costa Rica el pilón es una de las especies nativas que presenta mayor adaptación a plantaciones (Delgado, Montero, Murillo & Castillo; 2003); además por sus características de crecimiento, múltiples usos, está dentro de las especies nativas estratégicas del país (Piotto, 2001), la Escuela de Ingeniería Forestal (EIFO) y de la Cooperativa de Mejoramiento Genético Forestal (GENFORES) (Acuña, 1999).

A partir de los años 80's Costa Rica mostró interés en utilizar especies nativas, el cual fue impulsado por la Organización para Estudios Tropicales (OET) (Butterfield & Fisher 1994). Investigaciones previas sobre la silvicultura en Costa Rica ha identificado al pilón entre otras especies de árboles nativos como una especie de importancia para la reforestación en fincas y en pasturas degradadas (Butterfield 1990, Müller 1993, Butterfield & Fisher 1994, Butterfield 1995, Butterfield & Espinoza 1995, González & Fisher 1994, Nichols & González 1992, Arguedas & Chaverri 1997, Haggard, Briscoe, Butterfield; 1998). Un estudio realizado en 1995 determinó el alto potencial silvicultural que el pilón posee para la reforestación comercial en Costa Rica (Calvo-Alvarado, Aria-Aguilar & Sibaja-Villegas, 1995).

En 2003 el pilón fue una de las especies que presentó los mejores rendimientos en crecimiento, con una adaptación a suelos arcillosos, de muy ácidos a moderadamente ácidos (pH 4,5-6), poco fértiles, pero bien drenados, de textura franca, franco-arcillosas y planicies muy húmedas aluviales; lo que comprueba que el pilón es una especie promisoría para la reforestación en Costa Rica (Delgado et al 2003)

Actualmente las plantaciones forestales que suministran productos industriales en su mayoría se establecen a partir de un germoplasma genéticamente mejorado (Evans & Turnbull, 2004; Johnson & Kirby, 2004; Nehra, 2005). El mejoramiento genético es una valiosa herramienta para la silvicultura; la cual, aporta un impacto significativo no solo a la productividad sino también a la conservación genética de la especie, al aumentar los rendimientos y preservarlos a través del tiempo el mejoramiento genético impulsa la reforestación; dado que los beneficios de un efectivo programa de mejoramiento reducen el turno de aprovechamiento final, mejoran la calidad, disminuyen los costos, repercute en una mejora de los procesos industriales (Marco, 2005).

El programa de mejoramiento genético inició en Costa Rica en 1994, con el establecimiento de un ensayo de procedencia-progenie para la evaluación de 32 familias de la zona norte de Costa Rica (Calvo-Alvarado, Arias-Aguilar, Sibaja-Villegas, Camacho-Mora, & Fisher 1996). El éxito de establecer plantaciones altamente productivas radica en validar la superioridad genética del material utilizado en varios sitios en calidad de fuste, tasa de crecimiento, calidad de la madera (Pavlotzky-Blank & Murillo-Gamboa, 2014). El objetivo de esta investigación es determinar la interacción genotipo ambiente de la colección clonal de pilón del ensayo de GENFORES (Cooperativa de mejoramiento genético forestal, Escuela de Ingeniería Forestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica) y estimar la ganancia genética real de los clones en dos sitios de la zona norte de Costa Rica; de esta manera identificar los clones con mejor crecimiento y mayor valor en el mercado aportando un beneficio a la reforestación de Costa Rica.

Metodología

Diseño experimental

Los ensayos clonales (sitio a y sitio b) de *Hieronyma alchorneoides* están ubicados en la zona norte de Costa Rica, ambos sitios fueron plantados en el año 2012. El diseño experimental de los ensayos genéticos fue el propuesto y empleado por GENFORES (Murillo, Obando, Badilla & Araya, 2001). La distribución de los clones se realizó con tres parejas por clon y un testigo; distribuidos en el campo lo más aleatoriamente posible, lo cual permite posteriormente realizar un primer raleo de una intensidad de un de 50%, donde se selecciona al mejor individuo de cada pareja, basado en sus atributos de adaptación, crecimiento y calidad de tronco (Murillo y Badilla 2004, Murillo 2011) y así convertir los ensayos en huertos semilleros. Los árboles fueron plantados con un distanciamiento de 3m x 3m.

El sitio a está ubicado en el cantón de Santa Clara (10°21'22" de longitud norte, 85°17'10" de latitud oeste) de la provincia de Alajuela, Costa Rica. Este ensayo consta de 19 tratamientos cada uno, en donde cada clon es un tratamiento y se tiene un testigo de fuente semillera proveniente de un vivero forestal comercial situado en Sarapiquí, Heredia de Costa Rica. El sitio pertenece a la zona de vida Bosque Muy Húmedo Premontano transición a Basal (Holdridge, 1987), con un promedio de precipitación de poco menos de 4000 mm distribuidos en todo el año (marzo-abril con baja precipitación). Los suelos son del orden de los Inceptisoles (Ortiz & Cordero 2014), profundos, bien drenados, con alto contenido de materia orgánica y específicamente en el sitio del ensayo este suelo presentó pedregosidad y compactación. Este sitio se caracterizó por tener presencia de vientos fuertes entre los meses de diciembre y marzo.

El sitio b está ubicado en el cantón de Upala (10°57'25.91" de longitud norte, 85°03'00.04" de latitud oeste) de la provincia de Alajuela, Costa Rica; este ensayo consta de 17 tratamientos, en donde cada clon es un tratamiento. Este ensayo pertenece a la Zona de Vida Bosque Húmedo Tropical Transición a Perhúmedo (Holdridge, 1987). Los suelos son del orden de los Inceptisoles según lo reportado por el atlas digital de Costa Rica en 2014, caracterizados por ser suelos ácidos (baja saturación en bases) según las mediciones realizadas. Para el establecimiento de este ensayo el sitio fue subsolado a 30 cm de profundidad sobre las líneas de siembra, un rastreado y posteriormente se hicieron surcos, esto para mejorar la profundidad efectiva ya que el nivel freático se encontró a los 60 cm de profundidad

Los caracteres evaluados al año 3 fueron los siguientes (a) diámetro a 1,3 m (d); (b) altura total (h); (c) calidad de las primeras cuatro trozas de 2,5 m de longitud según la metodología propuesta por Murillo y Badilla (2004), donde 1 equivale a la mejor calidad y 4 la peor, este valor se transformó mediante la siguiente forma:

$$Cal\% = (1 - ((Cal - 1)/3)) * 100 \quad (1)$$

Cada troza se calificó individualmente, con base en la calificación de las primeras cuatro trozas (10 metros de fuste) se obtuvo posteriormente un valor de la calidad del árbol mediante el siguiente algoritmo:

$$Calidad\ del\ árbol = Troza1*0,4 + Troza2*0,3 + Troza3*0,2 + Troza4*0,1 \quad (2)$$

Los coeficientes de cada troza corresponden a su peso económico acorde con su posición dentro del tronco del árbol.

Análisis de datos

Los datos fueron procesados por el programa de Avalúos Forestales (Murillo & Badilla, 2011). Este programa permitió generar las variables: calidad, volumen comercial sin corteza (a una altura comercial hasta los 10 cm de diámetro o hasta una altura menor si se ha perdido la dominancia apical) que utiliza un modelo de estimación del volumen para la especie y valor comercial en dólares. El valor y volumen comercial por hectárea se obtuvieron asumiendo mortalidad 0 y una densidad de 1111 árboles por hectárea. Para el análisis de este software se definieron los siguientes parámetros: un diámetro mínimo comercial de 10 cm para aserrío, un diámetro mínimo para el mercado de astilla o leña de 5 cm, un grosor de corteza de 0,01, el largo de las trozas de 2,5 m y un mismo factor de castigo para todas las posibles trozas de tipo 1 según el programa.

El análisis genético de los datos se realizó con los procedimientos de Máxima Verosimilitud Restringida (Restricted Maximum Likelihood, (REML) con el software SELEGEN (Resende 2007), y el modelo 3, donde $\mathbf{y} = \mathbf{Xr} + \mathbf{Zg} + \mathbf{Wp} + \mathbf{Ti} + \mathbf{e}$, en el que “y” es el vector de los datos, “r” es el vector de los efectos de la repetición (asumidos como fijos) sumados a la media general, “g” es el vector de los efectos genotípicos (asumidos como aleatorios), “p” es el vector de los efectos de parcela (asumidos como aleatorios), “i” es el vector de los efectos de la interacción genotipo x ambiente (aleatorios), “e” es el vector del error o residuos (aleatorios). Las letras mayúsculas representan las matrices de incidencia para los efectos referidos. El vector “r” contempla todas las repeticiones de todas las localidades (ajusta la combinación repetición-localidad). En ese caso, ese vector contempla los efectos de las localidades y de las repeticiones dentro de las localidades. Este modelo evaluó los clones mediante el procedimiento REML/BLUP Individual (Resende, 2007).

El software genético permite analizar las variables mediante una matriz de correlaciones genéticas, permitiendo cuantificar la relación entre las variables. Esta matriz es de suma importancia ya que define que tan precisa se puede calcular una variable mediante otra de manera indirecta. Esta herramienta difiere en el análisis genético anterior ya que en vez de realizar un análisis de varianza se procede a un análisis de covarianza (Zobel & Talbert, 1988).

Resultados

El cuadro 1 muestra los valores genéticos poblacionales de los 19 clones de *H. alchorroides* obtenidos a partir de los 8 caracteres investigados a los 4 años de edad en dos sitios de la zona norte de Costa Rica. Los parámetros diámetro, volumen comercial y valor comercial calculados en la colección clonal mostraron un alto potencial de mejoramiento genético; donde, los valores de varianza genética aditiva (V_a) son altos, la heredabilidad media familiar (h^2_{mc}) osciló entre el 70% y 82%, con una exactitud de la selección de genotipos alta para estos parámetros que osciló entre el 86% y el 91%. Mediante este procedimiento se logró separar los efectos ambientales y analizar la porción genética a la que se le atribuye la expresión fenotípica; de manera que, se cuantificó el beneficio al usar los mejores clones de la población en estudio (cuadro 1).

En el carácter volumen comercial y valor comercial logra integrar las variables de tipo cuantitativas (diámetro y altura comercial) y la variable de tipo cualitativa (calidad). La variable valor comercial tiene la ventaja de integrar al volumen comercial un valor que corresponde al producto aceptado en el mercado nacional según la dimensión de cada troza; de manera que los parámetros poblacionales para el carácter valor (\$) tienen una exactitud de selección alta (91%), con un coeficiente de variación genotípica alto (21,2%); por lo que la heredabilidad para cada clon de en sentido amplio fue de: 0,07 +- 0,02 dólares USD, esto evidenció control genético en la variable valor.

Cuadro 1. Parámetros genéticos de 19 clones y un testigo evaluado en un ensayo clonal de *H. alchorneoides* de 4 años de edad en la zona norte Costa Rica.

Parámetros	d año 3 (cm)	d año 4 (cm)	Atura total año 4 (m)	Altura comercial (m)	Calidad (%)	Volumen comercial (m ³)	Valor comercial (\$USD)
Vg	0,3	0,2	0,02	0,00	1,51	0,00004	0,37
Vparc	0,1	0,1	0,01	0,02	4,01	0,00003	0,17
Vint	0,1	0,1	0,01	0,01	1,46	0,00001	0,03
Ve	2,3	3,6	1,56	2,05	240,07	0,000608	4,73
Vf	2,8	4,0	1,60	2,09	247,05	0,00069	5,29
h2g	0,10 +- 0,02	0,061+- 0,02	0,018 +- 0,010	0,002 +- 0,004	0,006+- 0,006	0,0604 +- 0,0203	0,0693 +- 0,022
c2parc	0,0	0,3	0,06	0,01	0,02	0,35795	0,03
c2int	0,0	0,0	0,01	0,01	0,01	0,01658	0,01
h2mc	0,7	0,7	0,48	0,14	0,30	0,74257	0,82
Acclon	0,9	0,9	0,69	0,38	0,54	0,86172	0,91
Rgloc	0,7	0,8	0,63	0,31	0,51	0,78474	0,92
CVgi%	7,5	4,7	1,63	0,90	1,55	15,75102	21,26
SEP	0,3	0,1	0,11	0,06	1,03	0,00327	0,26
Media general	7,2	10,6	9,14	7,71	79,47	0,04086	2,85

Componentes de Varianza (obtenidos por el procedimiento REML Individual) dónde: **Vg**: varianza genotípica; **Vparc**: varianza ambiental entre parcelas; **Vint**: varianza de la interacción genotipo x ambiente; **Ve**: varianza residual; **Vf**: varianza fenotípica individual; **h2g = H2**: Heredabilidad individual en el sentido amplio, o sea, de los efectos genotípicos totales; **c2parc = c2**: coeficiente de determinación de los efectos de parcela; **c2int = c21**: coeficiente de determinación de los efectos de la interacción genotipo x ambiente; **h2mc**: Heredabilidad de la media del genotipo, asumiendo sobrevivencia completa. **Acclon**: exactitud de la selección de genotipos, asumiendo sobrevivencia completa; **rgloc**: correlación genotípica entre el desempeño de los genotipos en varios ambientes; **VEP**: varianza del error de predicción de los valores genotípicos, asumiendo sobrevivencia completa; **SEP**: desviación estándar del valor genotípico estimado, asumiendo sobrevivencia completa. **CVgi%**: coeficiente de variación genotípica; **CVe%**: coeficiente de variación residual. **Media general del experimento**: estimado de la media poblacional para el carácter.

El cuadro 2 muestra la matriz de correlaciones genéticas de los caracteres medidos en 19 clones en la zona norte de Costa Rica. La correlación genética entre el diámetro del año 3 y el año 4 es

alta, lo cual quiere decir que hay una similitud de un 89% en la selección de los mejores individuos a partir del diámetro. Las variables volumen comercial y valor comercial se correlacionan en un mayor grado con el diámetro que las demás; lo cual es beneficioso ya que el diámetro es una variable de mayor precisión y menor sesgo al momento de medir las variables dasométricas como la altura comercial, la altura total y evaluar la calidad.

Cuadro 2. Matriz de correlaciones genéticas de los caracteres medidos pre raleo en 19 clones y un testigo evaluados en un ensayo clonal de *H. alchorneoides* de 4 años de edad, zona norte Costa Rica.

VARIABLES	d año3	d año 4	Altura total año4	Altura comercial año4	Calidad año4	Volumen comercial año 4	Valor año 4
d año3	1,00	0,89	0,28	0,13	-0,13	0,90	0,90
d año 4		1,00	0,32	0,15	0,09	0,99	0,99
Altura total año4			1,00	0,81	0,20	0,34	0,35
Altura comercial año4				1,00	0,23	0,21	0,21
Calidad año4						0,06	0,09
Volumen año 4						1,00	0,99
Valor año 4							1,00

Las variables seleccionadas para calcular la ganancia genética fueron el diámetro, el volumen comercial y el valor comercial. El éxito de un buen programa de mejoramiento genético está en función de la variación genética de la población y no solo depende de las altas heredabilidades que posea la misma. El diámetro, el volumen comercial y el valor comercial mostraron valores altos de heredabilidad ($\geq 70\%$), con coeficientes de variación genotípica entre 4,7% y 21,2% respectivamente (cuadro 2).

La ganancia genética (GG) se cuantificó por el cambio de la media general de la población y fue definida a partir del diferencial de selección ($g = \mu_1 - \mu_0$); donde μ_1 es la media de la

población mejorada y μ_0 es la media de la población original; de manera tal, que este resultado permitió observar la superioridad de los clones con respecto a la media general del experimento. Al comparar el parámetro obtenido (g) para los caracteres volumen (m^3/clon) y valor ($\$/\text{clon}$) con respecto a la media general del experimento una ganancia (g) términos porcentuales (%) (Cuadro 3). Esto permite estimar el tiempo real que gana el *H. alchorneoides* en llegar al año de cosecha; donde la variable que permite establecer la relación con turno de cosecha es el diámetro, Según lo reportado por COSEFORMA en 1998 el turno de cosecha es a los 20 años, por lo que el utilizar los 10 mejores clones (cuadro 4) permite ganar de 8 meses

Cuadro 3. Ranking genético de los caracteres volumen (m^3) y valor (\$) con su respectivo valor en los 10 mejores clones ensayo clonal de *H. alchorneoides* de 4 años de edad, zona norte Costa Rica.

Posición	Ganancia genética volumen		Ganancia genética Valor	
	Clon	(m^3/clon)	Clon	$\$/\text{clon}$
1	2	0,0090	6	0,8385
2	6	0,0082	9	0,8230
3	20	0,0079	2	0,8087
4	9	0,0077	20	0,7851
5	19	0,0072	19	0,7333
6	21	0,0068	21	0,6793
7	10	0,0061	10	0,6068
8	7	0,0055	7	0,5445
9	3	0,0055	3	0,4897
10	T	0,0044	11	0,4332

En términos porcentuales la ganancia fue de 22% para el volumen comercial y 29,4% para el valor comercial al utilizar el mejor clon; sin embargo, no tiene sentido práctico el utilizar solamente un clon ya que sin variabilidad genética no es posible el mejoramiento genético. El

valor del clon en la posición 10 es el que me permite realmente conocer la ganancia genética al utilizar la población de mejoramiento, tanto en volumen comercial como en valor comercial donde los valores fueron de 10,8% y 15,2% respectivamente (Cuadro 3).

La ganancia genética utilizando los 10 mejores clones en el carácter diámetro fue del 3,2%, la ganancia genética se calcula a partir de los diferenciales de selección ($GG = S$ entre clones $\cdot h^2 mc$) y el turno de cosecha es a los 20 años según lo reportado por COSEFORMA en 1998 en términos de años se obtiene una reducción en el turno de cosecha de 0,7 años

La figura 1 se muestra la varianza genética de los 19 clones de pilón tanto para el carácter volumen (m^3) como para el valor (USD \$) con sus respectivos límites de confianza. Es fundamental conocer si existen diferencias genéticas significativas en el crecimiento de los 19 clones. Los clones muestran diferencias con respecto a la media general; donde la colección clonal se diferencia claramente en tres partes: los clones que se encuentran por encima de la media general: 2, 6, 20, 9, 19, 21; los clones que presentan valores genéticos cercana a la media fenotípica: 10, 7, 3, 11, T, 17 y el segmento que se encuentra por debajo de media general del experimento: 4, 12, 5, 8, 16, 13, 18, 15 (figura 1). Los clones 20, 2 y 6 muestran diferencias con respecto al clon 18, de manera que el clon 18 es el de menor rendimiento en términos de volumen y valor comercial.

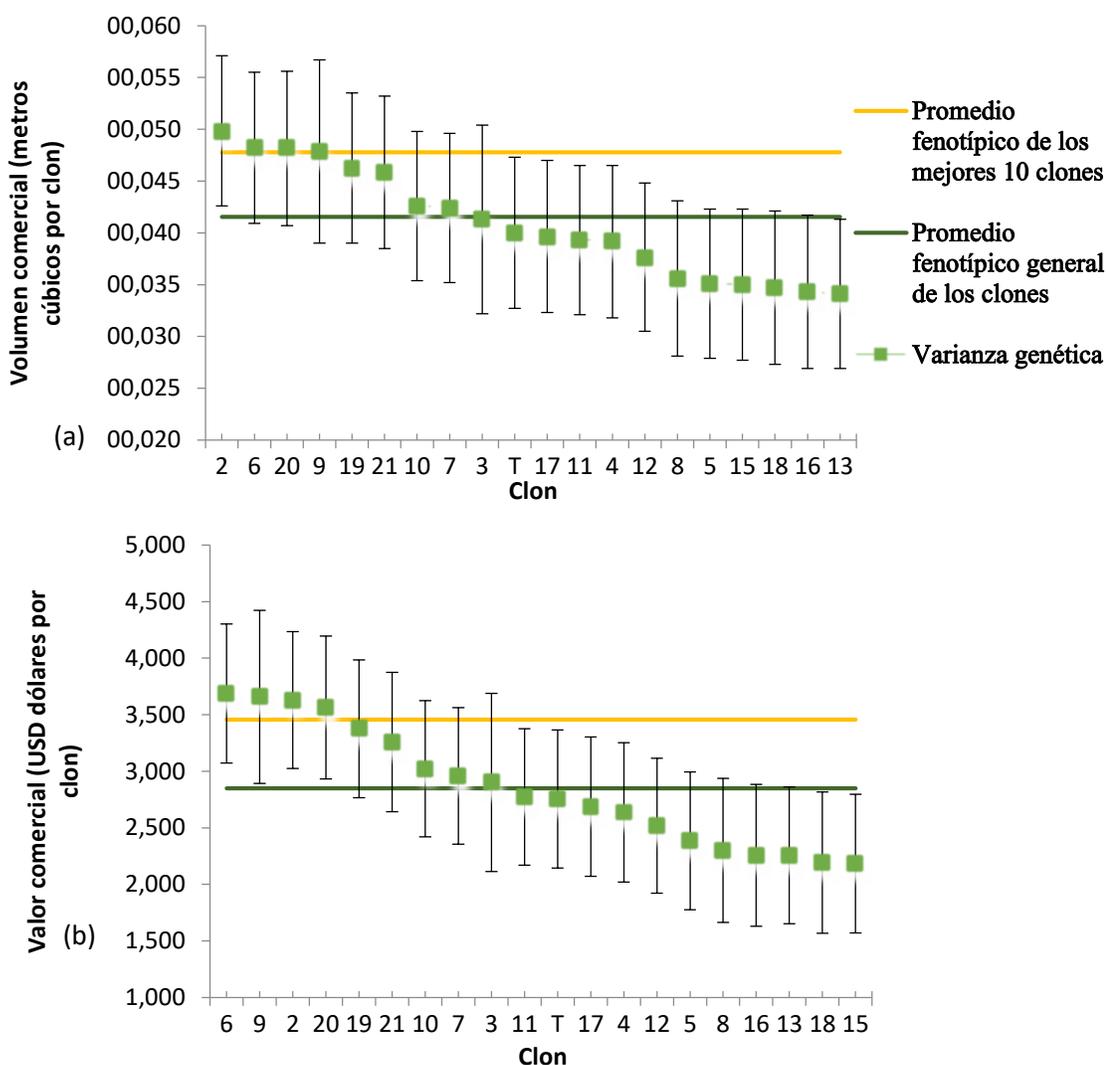


Figura 1. Valores genéticos y límites de confianza de (a) volumen comercial (m^3) y (b) valor (USD \$); en un ensayo clonal de *H. alchorneoides* de 4 años de edad, zona norte de Costa Rica.

La interacción genotipo ambiente es de gran importancia para el mejoramiento genético, ya que permite analizar el rendimiento relativo del material genético en ambientes diferentes. En este caso se observó que la interacción genotipo ambiente es casi nula ($c2int=0,01$) para las variables diámetro, volumen comercial y valor comercial (Cuadro 1). En la figura 2 se observó que el ranking de los dos sitios para las primeras dos posiciones tanto para volumen comercial como para valor comercial son las mismas, exceptuando el comportamiento de los clones 17, 16 y 4. Lo que indica que la colección clonal de pilón en la zona norte se comporta muy similar en

ambos sitios (Upala y San Carlos), con valor de desempeño genotípico alto para el volumen comercial de 0,78% y 0,92% para el valor comercial (Cuadro 1).

El análisis de la colección clonal muestra un comportamiento de rendimiento generalista para los clones 21, 19, 9, 2, 6, 20,17, 3, 10 y 7 (Figura 2). Se puede observar claramente la existencia de tres grupos con comportamiento similar en términos de rendimiento de volumen comercial y valor comercial, donde se puede segmentar la colección clonal en clones de bajo rendimiento, rendimiento medio y los clones de mayor rendimiento.

Ranking	Sito a (Santa Clara)	Sitio b (Upala)
1	21	20
2	19	2
3	9	6
4	2	10
5	6	7
6	20	19
7	17	21
8	T	16
9	3	4
10	10	11
11	7	T
12	12	8
13	11	17
14	4	5
15	18	15
16	13	12
17	8	13
18	15	18
19	5	
20	16	

Figura 2. Ranking genético para el carácter volumen comercial (m^3), las flechas muestran cambios importantes en la posición del ranking en ambos sitios (Santa Clara y Upala) para la colección clonal de *H. alchorneoides* a los 4 años de edad, zona norte de Costa Rica.

Discusión

El crecimiento del pilón en la zona norte mostró un valor alto, el incremento medio anual (ICA) en diámetro y altura total fue de 2,6 *cm/año* y 2,2 *m/año* respectivamente (Cuadro 2). Los valores máximos en ICA a los 5 años reportados por Murillo et al 2003 para especies nativas en plantaciones de la zona norte son de 1,7 *cm/año* para el diámetro y 2,5 *m/año* para la altura total en suelos del orden Ultisoles y 1,4 *cm/año* y 1,7 *m/año* en altura diámetro y altura, respectivamente, para suelos del orden Inceptisoles. La población estudiada se caracterizó como una población élite para el norte de Costa Rica. Las diferencias de crecimiento los clones son evidentes; sin embargo, la mayoría de clones tienen un crecimiento similar, esto se explica por el hecho de evaluar solamente 19 clones, que a diferencia de otros programas de mejoramiento genético con especies forestales donde utilizan una base genética amplia, por ejemplo en: *Acacia mangium* en zona norte de Costa Rica (Pavlotzky-Blank, Murillo-Gamboa, 2014), *Tectona grandis* (Chacón, 1999) en zona sur y zona norte de Costa Rica y *Gmelina arborea* en Siquirres, Limón (Salas 2012). El éxito de continuar con el programa de mejoramiento genético requiere una amplitud en la variación genética, con coeficientes de variación superiores al 5%.

La interacción genotipo ambiente en el sitio de Upala y San Carlos es baja ($c2int \leq 0,01$) esto para todos los caracteres analizados. De los mejores 10 clones solo 2 clones no repiten el comportamiento en ambos sitios, estos son el clon 16 y 17 (figura 2). Se puede afirmar que el clon 16 crece de mejor manera en suelos ácidos y mal drenados a diferencia del clon 17 que no crece de manera óptima en estas condiciones. De manera que los mejores y peores clones de Upala son los mismos a los de Santa Clara con excepción al clon 16 y clon 17, los valores interacción genotipo x ambiente son bajos para el volumen comercial, valor comercial y crecimiento esto para el programa de mejoramiento es un hallazgo positivo dado que simplifica las siguientes etapas del programa dado que no se debe separar la colección clonal para obtener una productividad similar en diferentes sitios de la zona norte de Costa Rica.

Las diferencias ambientales entre ambos sitios son muy representativas a lo que en su mayoría se encuentra en la zona norte de Costa Rica. Sitios mal drenados, ácidos, con predregosidad y

de los dos órdenes de suelo más representativos como lo son los Ultisoles y Inceptisoles (Murillo et al 2003). La distancia geográfica entre ambos sitios es de 110km presentando dos diferentes zonas de vida, las cuales no llegan a ser significativas, dado que el crecimiento de la especie nativa está adaptada a las condiciones de humedad, altura sobre el nivel del mar y precipitación que presenta el sitio de Upala y Santa Clara.

La correlación genética entre los caracteres diámetro del año 3 y el año 4 sugiere un comportamiento similar, el ranking genético entre ambos años no varía mucho; lo cual muestra que el pilón posee un año de selección entre el año 3 y año 4. Esto beneficia al programa de mejoramiento dado que no se debe esperar muchos años para encontrar diferencias significativas en el crecimiento de los clones para los caracteres volumen comercial y valor comercial dado que entre el año 3 y año 4 la similitud del diámetro es del 89%; y los caracteres del avalúo volumen y valor comercial se obtienen a partir del diámetro, una variable fácil medición que arroja menor error que la estimación en las alturas.

La ganancia genética en relación al material local es muy baja dado que el material que se empleó como testigo se encuentra cercano a las primeras posiciones del ranking genético en donde ganancia genética para el diámetro para los 10 clones es de 3,2% y esto significa un impacto para la silvicultura de 8 meses. Este análisis indica que si bien es cierto se mejora en el volumen y valor comercial, en términos de crecimiento el programa de crecimiento no arroja diferencias importantes entre los clones evaluados y el testigo comercial utilizado en el experimento. Por lo que se evidencia una necesidad en ampliar la base genética que se está utilizando en el programa de mejoramiento para la especie.

Conclusiones

No se observó interacción genotipo-ambiente significativa entre el sitio de Upala y Santa Clara para la zona norte de Costa Rica; sin embargo, el clon 16 y clon 10 tuvieron un mejor crecimiento en sitios mal drenados y ácidos (Upala).

Se registraron diferencias genéticas significativas en el crecimiento en cuanto al DAP, volumen comercial y valor comercial para los 17 clones evaluados en Upala y los 19 clones evaluados Santa Clara en la zona norte de Costa Rica.

Los valores genéticos muestran una población élite conformada por los mejores 10 clones, cuya utilización generará una ganancia genética en 3,2% en diámetro que significa una reducción potencial de 0,7 años en el cultivo de esta especie. El volumen comercial obtuvo una ganancia genética de 11%, mientras que el valor de la plantación aumentara en un 15 % si se utilizan los mejores 10 genotipos. El coeficiente de variación fue de 4,7% lo que implica la necesidad de aumentar la base genética del programa de mejoramiento en cuanto a DAP, volumen comercial, valor comercial.

Los valores de heredabilidad individual fueron de 0,06 +- 0,02 *cm* en DAP; 0,06004 +- 0,0203 m^3 de volumen comercial y 0,0693 +- 0,0220 en valor comercial \$USD. La heredabilidad media clonal fueron de 70%, 74% y 82% para los caracteres d, volumen comercial y valor comercial, respectivamente.

Referencias

- Acuña P. 1999. Evaluación de 2 ensayos de progenie en Santa Clara, San Carlos. Práctica de especialidad. B.Sc. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal. Cartago, Costa Rica. 58 p.
- Butterfield, R. 1990. Native species for reforestation and land restoration: a case study from Costa Rica. Proceedings of the Fourteenth IUFRO World Congress. Volumen 2. Montreal, Canadá. 3-14 p.
- Butterfield, R. 1990. Native species for reforestation and land restoration: a case study from Costa Rica. Proceedings of the 14th IUFRO World Congress. Vol. 2. Montreal, Canadá. p. 3-14.



- Butterfield ,R., Fisher, R. 1994. Untapped potential: native species for reforestation. *Journal of Forestry* 92(6): 37-40.
- Butterfield R. 1995. Desarrollo de especies forestales en tierras bajas húmedas de Costa Rica. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 42 p.
- Butterfield R., Espinoza, M. 1995. Screening trial of 14 tropical hardwoods with an emphasis on species native to Costa Rica: fourth year results. *New Forests* (9): 135-145.
- Calvo-Alvarado, J. C., Arias-Aguilar, D., & Sibaja-Villegas, A. (1995). Especies nativas para la reforestación en la zona sur de Costa Rica. En: Avances en la producción de semillas forestales en América Latina. Memorias del Simposio, Managua, NI, 16-20 Oct. 1995, 1995-10-16.
- Chacón P. 1999. Evaluación de ensayos clonales (GENFORES) de *Tectona grandis*, en la zona norte y zona sur de Costa Rica. Tesis de licenciatura. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal. Cartago, Costa Rica. 93 p.
- COSEFORMA 1998. Pílon en la Zona Norte de Costa Rica. MINAE/GTZ/ITCR/CCF. San José, Costa Rica.
- Franco, R. P. (1990). The genus *Hyeronima* (Euphorbiaceae) in South America. *Botanische Jahrbücher für Systematik, Pflanzengeschichte und Pflanzengeographie* 111(3), 297-346.
- Delgado, A., Montero, M., Murillo, O., & Castillo, M. (2003). Crecimiento de especies forestales nativas en la zona norte de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 27(1), 63-78.
- Holdridge, L.R. 1987. *Ecología basada en zonas de vida*. San José, CR, IICA.
- Nehra, N. S., Becwar, M. R., Rottmann, W. H., Pearson, L., Chowdhury, K., Chang, S., Gause, K. C. (2005). Forest biotechnology: Innovative methods, emerging opportunities. *In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant*,41(6), 701-717.

- Pavlotzky, B., & Murillo, O. (2014). Ganancia genética esperada e interacción genotipo-ambiente en *Acacia mangium* en la zona norte de Costa Rica. *Agronomía costarricense: Revista de ciencias agrícolas*, 38(2), 8-17.
- Piotto, D. (2001). *Plantaciones forestales en Costa Rica y Nicaragua: comportamiento de las especies y preferencias de los productores*. Forest plantations in Costa Rica and Nicaragua: species performance and farmers' preferences (No. Thesis P662). CATIE, Turrialba (Costa Rica).
- Piotto, D., Montagnini, F., Kanninen, M., Ugalde, L., & Viquez, E. (2004). Forest plantations in Costa Rica and Nicaragua: Performance of species and preferences of farmers. *Journal of Sustainable Forestry*, 18(4). 59-77.
- Murillo, O; Obando, G; Badilla, Y; Araya, E. (2001). Estrategia de mejoramiento genético para el Programa de Conservación y Mejoramiento Genético de especies forestales del ITCR/FUNDECOR, Costa Rica. *Revista Forestal Latinoamericana* 16(30):273-285
- Murillo, O., & Badilla, Y. (2004). Calidad y valoración de plantaciones forestales. Manual. Taller de Publicaciones del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Forestal. Cartago, Costa Rica. 51p.
- Murillo, O; Badilla, Y. 2011. Avalúos forestales (software). Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica.
- Ortiz, E; Cordero, S. 2014. Atlas Digital de Costa Rica. CD-ROM. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.
- Resende, M. (2007). SELEGEN-REML/BLUP. Sistema Estadístico e Seleçao Genética Computadorizada (Software). EMBRAPA. Brasilia, Brasil.

Salas Guevara, R. J. (2012). Evaluación de un ensayo genético de Gmelina arborea en Siquirres, Limón. Tesis de licenciatura. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal. Cartago, Costa Rica. 53 p.

Zobel, B; Talbert, J. 1988. Técnicas de mejoramiento genético de árboles forestales. Editorial LIMUSA. México, D.F. México. 546 p.

