

Modelo de optimización heurística para la prescripción de regímenes de aclareo en plantaciones de *Tectona grandis*

*Heuristic optimization model for prescribing thinning regimes in **Tectona grandis** plantations*

MARÍA ALEJANDRA QUINTERO M.¹
y MAURICIO JEREZ²

Recibido: 02-09-13 / Aceptado: 07-11-13

1 Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Escuela de Ingeniería Forestal, Departamento de Botánica y Ciencias Básicas, Mérida, Venezuela, correo electrónico: mariaq@ula.ve

2 Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Centro de Estudios Forestales y Ambientales de Postgrado, Mérida, Venezuela, correo electrónico: jerez@ula.ve

Resumen

En este artículo se presenta un modelo para determinar planes óptimos de aclareo en plantaciones de teca (*Tectona grandis*). Las decisiones que toma el modelo están relacionadas a la edad e intensidad en que deben aplicarse los aclareos en un rodal, de tal manera que se maximicen los beneficios económicos asociados al aprovechamiento de la madera y se satisfagan algunas restricciones biológicas y técnicas. El modelo de optimización se apoya en un modelo de simulación del crecimiento y rendimiento, el cual calcula variables de rodal bajo diferentes regímenes de aclareo. Para resolver el modelo se utilizó Algoritmos Genéticos, una técnica heurística que permite obtener soluciones de alta calidad a problemas de optimización complejos. Se probó el modelo con datos de plantaciones de teca de las reservas forestales de Caparo y Ticoporo (Venezuela). Se obtuvieron regímenes de aclareo óptimos bajo diferentes escenarios y se analizó la sensibilidad del modelo, en términos de cambios en las prescripciones de los aclareos como respuesta a cambios en los parámetros biológicos, técnicos y financieros. Los resultados muestran que el modelo puede ser útil para definir un conjunto de alternativas de aclareo bajo diferentes condiciones iniciales, las cuales pueden ser evaluadas por un gestor forestal de acuerdo a su experiencia y a la factibilidad práctica de su aplicación.

Palabras clave: manejo forestal, raleos, teca, algoritmos genéticos.

Abstract

In this paper a model is shown for determining optimal thinning plans for teak plantations (*Tectona grandis*). The model takes decisions related to age and intensity of thinnings for a given stand, in such a way, that economic benefits associated with timber harvest are maximized after satisfying some biological and technical restrictions. The optimization model is integrated with a growth and yield model, which calculates the dynamics of stand variables under various thinning regimes. Genetic algorithms were used to solve the model. This is a heuristic technique that can obtain high quality solutions to complex optimization problems. The model was tested with teak plantation data from the Caparo and Ticoporo forest reserves (Venezuela). Optimal thinning regimes were obtained under various scenarios and model sensitivity was analyzed in terms of changes in thinning prescriptions as a response to changes in biological, technical, and financial parameters. The results show that the model can be useful to define a set of thinning alternatives under various initial conditions, which can be evaluated by a forest manager according to her experience and the practical suitability of its application.

Key words: forest management, thinning, teak, genetic algorithms.

1. Introducción

La prescripción de aclareos es uno de los principales problemas que se presentan en el manejo de plantaciones, junto con la determinación del turno óptimo y la definición de métodos de regeneración (Davis *et al.*, 2001). Mediante los aclareos los técnicos forestales pueden manipular la competencia y modificar la densidad de una plantación con el fin

de lograr el mayor beneficio económico de su aprovechamiento. La intensidad y el momento en que se realizan los aclareos influyen de manera importante sobre el ritmo de crecimiento y el rendimiento de la plantación; si el aclareo se demora, las tasas de crecimiento descenden o se paralizan, mientras que si el aclareo es prematuro o demasiado intenso, los árboles tienen mayor tendencia a producir ramas laterales y brotes superficiales; esto reduce

el rendimiento potencial de la plantación, puesto que el crecimiento se desvía del tronco principal, que debería estar libre de defectos como los causados por ramas laterales y brotes superficiales (Fonseca, 2004).

Según Vincent (1980) para cada especie y para cada calidad de sitio debe haber un régimen óptimo de aclareo, el cual permitirá que se logre producir la madera en la forma más económica posible. El problema consiste en determinar cuándo aclarear, qué tipo de aclareo realizar y cuál debe ser el porcentaje de extracción de árboles (intensidad del aclareo). La planificación de los aclareos no es un problema sencillo puesto que involucra una serie de aspectos relacionados entre sí, entre los que se encuentran la proyección del crecimiento de los árboles, la relación entre la productividad y el régimen de aclareos, la determinación del número de cortas más indicado y las edades en las que se deben efectuar los aclareos, así como también la evaluación de un gran número de niveles de densidad residual después de un aclareo.

Se han usado varios enfoques para abordar la programación de aclareos en un rodal. Una práctica ha sido establecer ensayos de campo con diferentes espaciamientos iniciales y distintos regímenes de aclareo, con el fin de estudiar el comportamiento del rodal en el tiempo de acuerdo a los tratamientos aplicados; la desventaja es que la información que producen estos ensayos es a largo plazo y para un número limitado de regímenes silviculturales. Obviamente, es imposible analizar la respuesta de una masa forestal para cada opción silvicultural mediante experimentación directa, sin embargo, los datos obtenidos mediante ensayos brindan información muy valiosa que sirve para la construcción de modelos de crecimiento más generales.

Para estudiar la dinámica de un rodal y analizar los efectos de distintos tratamientos silviculturales también se utilizan modelos de simulación del crecimiento y rendimiento, estos constituyen una herramienta muy útil para los planificadores forestales puesto que permiten probar una amplia variedad de opciones de manejo. En el caso concreto de los aclareos, se puede evaluar la respuesta de un rodal a diferentes regímenes, variando la frecuencia y la intensidad de los mismos.

Un tercer enfoque para prescribir regímenes de aclareo es el uso de modelos de optimización. Con frecuencia, el objetivo de estos modelos es de-

terminar el régimen de aclareos que maximice los beneficios obtenidos del bosque (función objetivo) cumpliendo un conjunto de restricciones biológicas, económicas y técnicas. Entre las técnicas de optimización que se utilizan para modelar problemas a nivel rodal, tales como la determinación del régimen óptimo de aclareo, están la Programación Dinámica, Programación No Lineal, y el método de Hooke y Jeeves (Bettinger *et al.* 2009). Algunas técnicas heurísticas también se han empleado para solucionar modelos de manejo forestal a nivel de rodal, tales como Búsqueda Aleatoria (Bullard *et al.*, 1985; Valsta, 1990), Búsqueda Tabú (Wikström y Eriksson, 2000; Wikström; 2001) y métodos basados en poblaciones (Pukkala, 2009). Otras heurísticas empleadas en optimización combinatoria como Recocido Simulado y Algoritmos Genéticos, no han sido utilizadas en problemas de optimización a nivel de rodal.

En este artículo se propone un modelo para la planificación de regímenes de aclareos en plantaciones de teca (*T. grandis*). La determinación del régimen de aclareos constituye el principal problema en la fase de manejo de la teca, pues según Vincent (1989), se requieren intervenciones periódicas de raleos en las plantaciones de teca para concentrar la productividad del sitio en árboles seleccionados de acuerdo a su forma y distribución espacial, por tal razón es de interés desarrollar modelos que apoyen al técnico forestal en esta tarea. Aunque en la literatura se encuentran numerosos estudios sobre el manejo de plantaciones de teca, los cuales van desde lo estrictamente "empírico" hasta criterios más elaborados basados en especificaciones técnicas, ninguno de éstos utiliza modelos de optimización. Por ello, es importante explorar este enfoque como una vía para determinar los mejores regímenes de aclareo bajo ciertas condiciones como densidad inicial y calidad de sitio; un modelo de optimización con estas características puede ser muy útil en los procesos de toma de decisiones.

El objetivo fue desarrollar un modelo de optimización heurística basado en la simulación del crecimiento y rendimiento, para determinar la edad e intensidad de los aclareos a realizar en un rodal de acuerdo a consideraciones biológicas y financieras. La función objetivo a consiste en maximizar los beneficios económicos, teniendo como restricciones los valores críticos del área basal del rodal que delimitan la franja de ocupación óptima

del rodal de acuerdo a los principios del Modelo de Área Basal y la Teoría de Möller (Vincent, 1985). Se utilizó algoritmos genéticos para resolver el modelo, la cual es una técnica robusta que ha mostrado un excelente desempeño en problemas de optimización (Dréo *et al.*, 2006).

2. Materiales y métodos

2.1 Modelo de área basal

Es un enfoque utilizado para la especificación del régimen de espesura, refiriéndose éste al espaciamiento inicial y el conjunto de aclareos integrados en un régimen coherente. El modelo de área basal se fundamenta en la teoría de Möller, según la cual existe un rango de densidades (ocupación del rodal) en el que el incremento periódico en área basal es máximo, considerándose entonces, que el sitio está ocupado de manera óptima, siendo los recursos del sitio aprovechados por la masa forestal de la forma más eficiente posible (Vincent, 1985).

El modelo de área basal del rodal tiene tres puntos de referencia: 1) área basal potencial del sitio (AB_{ps}) que representa la capacidad de carga del sitio para la especie bajo consideración; 2) área basal máxima (AB_{max}) que es la mayor espesura para la cual se obtiene el incremento máximo en área basal; y 3) área basal limitante (AB_{lim}) que corresponde a la espesura mínima para la cual se obtiene el incremento máximo en área basal.

Cuando el área basal de la masa forestal está por debajo del área basal limitante, hay un uso incompleto del potencial productivo del sitio; y cuando está por encima del área basal máxima, hay una competencia excesiva, producto de la “sobre-ocupación” del sitio. Entre el área basal limitante y el área basal máxima el incremento en área basal es máximo y según la teoría de Möller, constante.

2.2 Estructura y supuestos del modelo de optimización

El modelo de optimización propuesto permite determinar un régimen de aclareo para un rodal de teca, el cual maximiza los beneficios económicos obtenidos de la producción de madera para aserrío. En el contexto del modelo, un régimen de aclareo se refiere a número de aclareos, edad e intensidad de

los mismos. El número de aclareos no fue optimizado, sino que se consideró un dato de entrada del modelo, los valores permitidos para esta variable van desde un aclareo hasta cuatro aclareos, la acción de no efectuar aclareos también se considera una alternativa. Así, cada número de aclareos conforma un problema de optimización diferente con un número determinado de variables de decisión.

El modelo consta de dos módulos, el primero simula el crecimiento y rendimiento, permitiendo calcular variables de rodal como área basal, densidad, diámetro promedio, volumen y altura, bajo diferentes regímenes de aclareo. El segundo módulo comprende el modelo de optimización, cuya función objetivo es la maximización del valor actual neto (VAN) de los flujos de caja ocurridos durante el turno y que están relacionados con los aclareos y la corta final, se incluyen costos de establecimiento y mantenimiento, costo de corta y los ingresos obtenidos por la venta de la madera aprovechada en los aclareos y en la corta final, se ignora el valor de la tierra de acuerdo al criterio de valor presente neto propuesto por Hille *et al.* (1999). La función objetivo está sujeta a restricciones que buscan mantener el área basal del rodal entre el área basal limitante y el área basal máxima.

El módulo de optimización evalúa múltiples soluciones de acuerdo a un algoritmo de búsqueda, cada solución corresponde a un régimen de aclareo. Para valorar una solución llama al módulo de crecimiento y rendimiento, que se encarga de calcular el valor de las variables de rodal para cada año del turno, correspondiente al régimen de aclareo que se está evaluando. El módulo de crecimiento permite estimar valores de variables de rodal que se utilizan para calcular el valor de la función objetivo o valor actual neto (VAN) de una solución. El régimen de aclareo que presenta un mayor VAN se considera la solución del modelo. En la figura 1 se muestra un diagrama que ilustra el funcionamiento del modelo.

Los supuestos bajo los cuales se desarrolló el modelo son los siguientes: 1) el turno es de 30 años, 2) el primer aclareo se puede hacer a partir de los 5 años, 3) los aclareos tienen un distanciamiento mínimo de 3 años, 4) se asume una mortalidad del 15% en la fase de establecimiento y en la fase manejo no se toma en cuenta la mortalidad si el régimen de manejo contempla realizar aclareos, en estos casos la mortalidad no es significativa. Cuando el

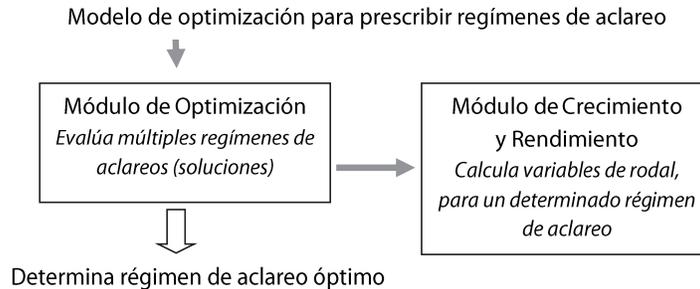


Figura 1. Diagrama de funcionamiento del modelo de prescripción de aclareos.

régimen de manejo no incluye aclareos, se incorpora una ecuación de mortalidad.

2.3 Modelo de crecimiento y rendimiento

Se utiliza un modelo de rodal basado en el enfoque de espacio de estados para simular el crecimiento en plantaciones de teca. Este modelo predice para cada año del turno los valores de área basal (según una ecuación de Chapman-Richards), densidad, diámetro promedio, volumen y altura, para diferentes combinaciones de calidad de sitio, espaciamiento inicial y bajo diferentes regímenes de aclareo. Para simular el crecimiento en área basal se utilizó el modelo ajustado por Zambrano (1993) y por Zambrano *et al.* (1995). Para estimar el volumen sin corteza y con corteza se emplea el modelo logarítmico de variable combinada propuesto por Moret *et al.* (1998). Las ecuaciones que incluye el modelo de crecimiento y rendimiento fueron ajustadas para plantaciones de teca establecidas en las Reservas Forestales de Ticoporo y Caparo, Estado Barinas, Venezuela. Quintero *et al.* (2012) y Quintero (2013) presentan con detalle las ecuaciones de crecimiento y rendimiento utilizadas en el modelo, así como también los valores de los parámetros empleados.

2.4 Modelo matemático

El problema de prescripción de aclareos se representa mediante un modelo de optimización restringida que incluye variables continuas, variables enteras y ecuaciones no lineales que se derivan del modelo de crecimiento y rendimiento.

2.4.1 Variables de decisión

La definición de régimen de aclareo en el modelo se hace mediante las siguientes variables:

A_j : número de años transcurridos desde el año 0 (si es el primer aclareo) o desde el aclareo anterior, para efectuar un nuevo aclareo j .

I_j : intensidad del aclareo j , expresado en porcentaje del área basal.

2.4.2 Función objetivo

Corresponde a la maximización del valor actual neto de los flujos de caja ocurridos durante el turno y que están relacionados a las cortas (Ecuación 1).

$$\text{Maximizar VAN} = - \sum_{i=1}^t \frac{Cm_i}{(1+r)^i} + \sum_{i=1}^{t-3} \left(\frac{I_i - C_i}{(1+r)^i} \right) + \frac{I_t - C_t}{(1+r)^t} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde: t es la edad del turno (30 años), r corresponde a la tasa de interés, Cm_i es el costo de establecimiento o costo de mantenimiento en el año i , I_i representa el ingreso neto percibido en el año i debido a la venta de madera extraída en un aclareo o a la corta final y C_i es el costo del aclareo i o de la corta final, los dos últimos dependen del volumen de madera extraído en el año i y que es estimado por el módulo de crecimiento y rendimiento.

2.4.3 Restricciones

El problema está sujeto al siguiente conjunto de restricciones:

$$ABO_i \leq AB_{max} \quad (1)$$

$$ABf_i \geq AB_{lim} \quad (2)$$

$$ABO_{i+1} = ABf_i + ICA_{i+1,i} \quad (3)$$

$$ABacl_i = I_i \times ABO_i \quad (4)$$

$$ABf_i = ABO_i - ABacl_i \quad (5)$$

$$A_1 \geq 5 \quad (6)$$

$$A_i \geq 3 \quad \text{para } i = 2, 3, 4 \quad (7)$$

$$I_i \geq 0 \quad \forall i \quad (8)$$

$$A_j \text{ es entera } \forall j \quad (9)$$

Donde AB_{0i} es el área basal al inicio del año i , AB_{fi} es el área basal al final del año i , AB_{acl_i} representa el área basal aclareada en el año i , AB_{max} es el área basal máxima y AB_{lim} el área basal limitante, todas expresadas en m^2/ha .

Las desigualdades (1) y (2) corresponden a las restricciones de área basal, las cuales tienen como finalidad mantener esta variable en el intervalo definido por el área basal limitante y el área basal máxima (parámetros del Modelo de Área Basal). Las restricciones (3), (4) y (5) se refieren a las fórmulas de cálculo del área basal inicial, área basal aclareada y área basal final para un año del período de planificación, estos valores se determinan a partir del modelo de crecimiento y rendimiento y en función de las variables de decisión. La restricción (6) está relacionada al supuesto del modelo que establece que el primer aclareo se puede realizar a partir de los cinco años de edad del rodal y la restricción (7) indica que entre dos aclareos sucesivos deben transcurrir al menos tres años.

2.5 Técnica de solución del modelo de optimización

Debido a la estructura del modelo y a la inclusión de diferentes tipos de variables y ecuaciones no lineales se decidió utilizar Algoritmos Genéticos para resolver el modelo. Esta técnica heurística ha sido utilizada con bastante éxito en una gran cantidad de problemas en diferentes áreas del conocimiento, para alcanzar soluciones óptimas o cercanas al óptimo cuando los métodos exactos presentan dificultades, destacándose por ser una técnica de optimización robusta y eficiente (Dréo *et al.*, 2006).

2.6 Implementación del modelo

El modelo se implementó en Visual Basic 2010. El programa necesita como entrada los siguientes datos: calidad de sitio del rodal, pudiéndose elegir entre dos opciones, calidad de sitio I y calidad de sitio II, éstas se definen por el valor del área basal potencial de sitio que puede alcanzar el rodal o capacidad de carga (37,5 y 32 m^2/ha , respectivamente); densidad inicial (1.111 o 1.600 arb/ha); costo de realizar una corta (US\$/ m^3); precio de la madera rolliza por categoría diamétrica (US\$/ m^3), y número de aclareos a considerar. El programa incorpora el

módulo de crecimiento y rendimiento, y el módulo de optimización, este último incluye un Algoritmo Genético diseñado para este problema en particular que se encarga de buscar la mejor solución.

Como salidas, el programa muestra el mejor régimen de aclareo encontrado por el Algoritmo Genético, indicando edad e intensidad (porcentaje de área basal a extraer) de cada aclareo. También calcula el valor actual neto (VAN) de la solución y presenta una tabla con los valores de las variables de rodal durante cada año del turno.

2.7 Experimentación con el modelo

El modelo se utilizó para determinar el régimen de aclareos óptimo en rodales con calidad de sitio I, usando dos valores para la densidad inicial de plantación 1.111 y 1.600 arb/ha. Los valores del área basal máxima, área basal limitante y área basal potencial de sitio fueron 25, 17 y 37,5 m^2/ha , respectivamente. Las tasas de crecimiento utilizadas antes de efectuar aclareos fueron 0,14 para una densidad inicial de 1.111 arb/ha y 0,19 cuando la densidad inicial es 1600 arb/ha (Zambrano, 1993). Los cambios en la tasa de crecimiento después de un aclareo se simulaban según Pienaar y Turnbull (1973). El costo de corta utilizado fue 14,24 US\$/ m^3 , estimado según la metodología de Osorio (1997) y los precios de la madera rolliza que fueron considerados en el modelo se muestran en el cuadro 1.

Se corrió el modelo para determinar regímenes que incluyen desde uno hasta cuatro aclareos. En cada caso se hicieron 50 corridas y se seleccionó la solución que mostró el mayor valor actual neto (VAN) usando una tasa de interés del 10%.

Cuadro 1. Precios de la madera rolliza.

Categoría diamétrica (cm)	Precio (\$/m ³)
< 10	0
[10 - 15)	53
[15 - 20)	77
[20 - 24)	155
[25 - 29)	232
[30 - 39)	310
>= 40	400

2.8 Análisis de sensibilidad

Se estudió la sensibilidad del modelo a los cambios en las siguientes variables de entrada y parámetros: costo de corta, tasa de interés, tasa de crecimiento, precio de la madera, área basal limitante y área basal máxima; se hicieron comparaciones con los resultados obtenidos usando los valores originales de estas variables. Para el análisis de sensibilidad se utilizó una densidad inicial de 1.111 arb/ha y calidad de sitio I.

- El costo de corta: se varió entre ± 10 y $\pm 50\%$ del valor original utilizado, a intervalos de 10%.
- La tasa de interés se varió en intervalos del $\pm 2\%$ teniendo como base $i=10\%$ (4%, 6%, 8%, 12%, 14%).
- Precio de la madera: para estudiar el efecto de esta variable se probaron cuatro escenarios variando la relación entre los precios de la madera asignados a cada categoría diamétrica. En el cuadro 2 se indican los escenarios utilizados.
- Tasa de crecimiento (k): se efectuaron corridas realizando variaciones consecutivas de $\pm 1\%$ en el valor de este parámetro.
- Área basal limitante y área basal máxima: se amplió el intervalo entre estos dos valores, aumentando el área basal máxima y disminuyendo el área basal limitante simultáneamente en un 10% y 20%. También se redujo el intervalo entre el área basal limitante y el área basal máxima, disminuyendo el área basal máxima y aumentando el área basal limitante en un 10% y 20% simultáneamente.

Cuadro 2. Escenarios utilizados en el análisis de sensibilidad del modelo para la variable "Precio de la madera".

Escenario	Diámetro de la madera rolliza		
	<10	[10 - 25]	25
1	100	100	100
2	0	100	200
3	0	100	300

3. Resultados y Discusión

3.1 Regímenes de aclareo óptimos

Los mejores regímenes de aclareo encontrados por el modelo para un rodal de teca bajo las condiciones

experimentales de este estudio, se presentan en el cuadro 3. Se muestra el mejor programa de aclareo para cada escenario según el número de aclareos y para las dos densidades iniciales de plantación consideradas (1.111 y 1.600 arb/ha).

Se observa que cuando la densidad inicial es 1111 arb/ha el régimen que registra mayor VAN es el correspondiente a tres aclareos, efectuados a los 9, 13 y 18 años, con intensidades correspondientes al 25,1%, 28,4% y 30% del área basal, respectivamente. El siguiente programa de aclareo con mejor valor actual neto es aquel que incluye dos aclareos, el cual tiene un VAN 11,6% menor que el régimen con tres aclareos. Le sigue el régimen que incluye cuatro aclareos con un VAN 18,2% menor que el mejor régimen encontrado (tres aclareos).

En el escenario que considera una densidad inicial de 1.600 arb/ha se tiene que la mejor solución en términos del VAN es aquella que incluye cuatro aclareos, a las edades de 6, 10, 14 y 22 años, con intensidades de 20,8%, 33,7%, 26,8% y 22,5% del área basal. Se observa además que los programas de manejo con tres y dos aclareos muestran un VAN muy cercano al registrado por el régimen de cuatro aclareos, diferenciándose por menos del 2%. Estos resultados sugieren que los regímenes con dos y tres aclareos son otras buenas alternativas cuando la densidad inicial es de 1.600 arb/ha.

Al analizar conjuntamente los resultados obtenidos para las dos densidades iniciales consideradas, puede notarse que de acuerdo a las condiciones asumidas en este trabajo y bajo los supuestos del modelo, la mejor solución corresponde a un programa de manejo que incluye una densidad inicial de 1.111 arb/ha y tres aclareos.

A partir de los resultados del modelo, es posible analizar el desarrollo del rodal bajo los regímenes de aclareo óptimos generados por el Algoritmo Genético. Para ello, se elaboraron gráficos de las variables área basal, diámetro del árbol medio, volumen y densidad del rodal, en función de la edad. A manera de ejemplo, en la figura 2 se presentan estos gráficos para el escenario que considera 1.111 arb/ha como densidad inicial de plantación.

En la figura 2 se observa que el comportamiento del área basal es el esperado según la función de crecimiento utilizada; para la alternativa de no aclarear, el área basal va creciendo hasta llegar a estabilizarse en la capacidad de carga del rodal y cuando se incluyen aclareos, en los años en que es-

Cuadro 3. Mejores regímenes de aclareo encontrados por el modelo en rodales de teca (tasa de interés = 10%, costo de corta = 14,24 \$/m³, precios de la madera según su diámetro).

N° de aclareos	E1	I1	E2	I2	E3	I3	E4	I4	VAN (\$/ha)
Densidad inicial = 1.111 arb/ha									
0	-	-	-	-	-	-	-	-	2260,59
1	12	55,1	-	-	-	-	-	-	4585,05
2	10	36,1	17	32,8	-	-	-	-	6613,30
3	9	25,1	13	28,4	18	30,0	-	-	7362,89
4	9	25,9	16	19,9	19	10,9	22	21,9	6180,42
Densidad inicial = 1.600 arb/ha									
0	-	-	-	-	-	-	-	-	709,40
1	9	61,0	-	-	-	-	-	-	5386,53
2	8	37,1	16	42,7	-	-	-	-	6474,06
3	5	15,0	9	32,9	14	40,9	-	-	6549,06
4	6	20,8	10	33,7	14	26,8	22	22,5	6576,98

E_i: Edad del aclareo *i* (años), I_i: intensidad del aclareo *i* (% de área basal extraída).

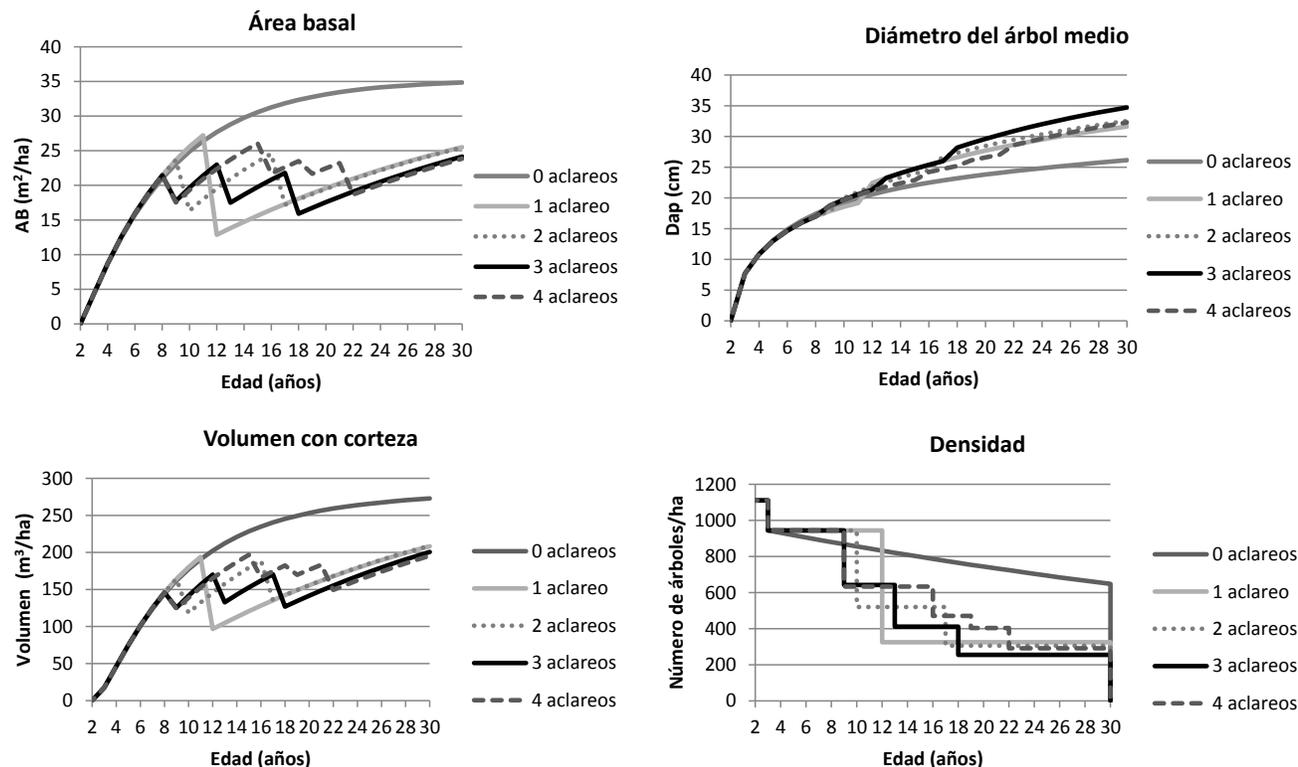


Figura 2. Variables de rodal bajo diferentes los mejores regímenes de aclareo encontrados por el modelo (densidad inicial = 1.111 arb/ha, tasa de interés = 10%, costo de corta = 14,24 \$/ m³, precios de la madera según su diámetro).

tos se efectúan el área basal del rodal disminuye, luego comienza a aumentar de acuerdo a una tasa de crecimiento distinta, la cual depende de la intensidad del aclareo.

En cuanto al diámetro del árbol medio, se observa en la figura 2 que para los regímenes de manejo que incluyen aclareos, se logra un mayor diámetro en el turno que en la alternativa que no

contempla aclareo. El mayor diámetro se registra para tres aclareos, alcanzándose en el turno un diámetro cercano a los 35 cm; este es el mismo régimen de manejo que registra el mayor VAN.

En la figura 2 igualmente se puede ver el comportamiento del rendimiento en volumen rollizo con corteza a lo largo del turno. En el régimen que no incluye aclareos se obtiene el volumen más alto,

272,9 m³/ha. En los regímenes de manejo con aclareos se logra menor volumen al final del turno, pero la madera obtenida presenta diámetros más grandes, por lo que tiene mayor valor comercial para el aserrío. Esta es la razón por la que la alternativa de no aclarear es la que presenta menos beneficios económicos en términos del VAN.

Los cambios que se producen en la densidad del rodal durante el turno también se muestran en la figura 2. Cuando no hay aclareos, la densidad va disminuyendo de acuerdo a la función de mortalidad empleada quedando en el rodal para el momento del turno 648 arb/ha. Para los regímenes de manejo que incorporan aclareos, la densidad al final del turno es mucho menor, estando entre 255 y 326 arb/ha. Asimismo, en el gráfico se pueden observar los cambios en la densidad del rodal cuando se aplican los aclareos.

Es importante comparar el régimen de aclareo óptimo obtenido por el modelo bajo los supuestos y condiciones experimentales definidas en este trabajo, con los empleados en la práctica en plantaciones de teca y con otros regímenes de manejo propuestos en la literatura. Según Pérez (2005), de manera muy general se sugiere que entre el 25% y el 50% de los árboles en pie deben ser removidos de tres a cuatro veces durante ciclos de rotación que van de 20 a 30 años y que los aclareos se determinan con base en indicadores tales como el área basal, índices de ocupación o crecimiento anual. Los regímenes óptimos de aclareo generados por el modelo están en concordancia con estos lineamientos.

Entre los trabajos que se han llevado a cabo en Venezuela en relación a la influencia de los aclareos en la productividad en plantaciones de teca, puede citarse el trabajo de Vincent *et al.* (2000), quienes presentan información comparativa sobre el rendimiento de un grupo de parcelas permanentes de teca que representan diferentes regímenes de espesura (espaciamiento y régimen de aclareo) en el Área Experimental de la Reserva Forestal de Caparo, Estado Barinas. Estos autores encontraron que la masa forestal reacciona bien a aclareos fuertes en parcelas con un espaciamiento inicial 2,5 x 2,5m (1.111 arb/ha), en los ensayos que reporta su investigación se aplicó un aclareo del 48,8% del área basal a los 7,8 años a una parcela con esta densidad inicial y la respuesta fue positiva. Los mencionados autores señalan que de los regímenes ensayados, el

que da mejor resultado es un régimen con espaciamiento amplio, lo cual permite demorar el primer aclareo hasta la edad de 12 a 14 años con el fin de que sea más viable la utilización comercial de los productos del aclareo. Por su parte, el modelo de optimización que se presenta en este artículo encontró que en rodales con condiciones de crecimiento similares, cuando se aplica un aclareo, la edad óptima es a los 12 años con una intensidad del 55,1% si la densidad inicial es de 1.111 arb/ha, o a los 9 años con 61% de intensidad si la densidad inicial es de 1.600 arb/ha, estos regímenes no contradicen los resultados reportados por Vincent *et al.* (2000) para parcelas con un aclareo. En relación al escenario que contempla dos aclareos, estos autores no cuantificaron el efecto de un segundo aclareo, y no se hicieron ensayos con tres y cuatro aclareos, por lo que no es posible hacer comparaciones al respecto.

Otro criterio utilizado para proponer un sistema de aclareo citado en la literatura, es dejar que la plantación alcance 20-25 m²/ha de área basal y cortar hasta dejar 14-17 m²/ha (Fonseca, 2004; Torres, 1982). Los regímenes generados por el modelo de optimización cumplen en su gran mayoría con este criterio, tal como puede observarse en la figura 2.

Algunos regímenes de aclareo para teca, como los propuestos por Chaves y Chinchilla (1986), Kanninen *et al.* (2004) y Fonseca (2004) para plantaciones de Costa Rica, y otros trabajos a nivel mundial (Lowe, 1976; Dupuy y Verhaegen, 1993) recomiendan la ejecución del primer aclareo entre los 3 y 6 años, eliminando entre el 40% y 60% de los árboles, y presentan distintas opciones para las intervenciones subsiguientes, que incluyen entre dos y cinco aclareos en total. La diferencia fundamental entre estos regímenes de aclareo y los encontrados por el modelo, es la edad en que se realizan las intervenciones. Los regímenes generados por el modelo tienden a comenzar más tarde los aclareos, estas diferencias se deben básicamente a los principios en los que se fundamenta el modelo, como lo son el Modelo de Área Basal y los criterios financieros utilizados para determinar el mejor régimen de manejo. Un aspecto clave en la determinación de la edad de los aclareos en el modelo, es el cumplimiento de las restricciones de área basal, el modelo busca mantener esta variable entre los valores del área basal limitante y el área basal máxima. En

ningún caso el modelo prescribe aclareos antes de los 7 años, pues de acuerdo al modelo de crecimiento utilizado en este período no se ha alcanzado el área basal limitante. Adicionalmente, se busca obtener beneficios económicos de los productos de los aclareos, cuando estos se practican a edades muy tempranas la madera extraída es de poco valor, por lo que el modelo hace un balance entre los costos y los beneficios que trae consigo un aclareo y selecciona las opciones que incrementan el valor actual neto. Estos resultados pueden contrastar con algunas prácticas de manejo en plantaciones con clones mejorados, en las cuales con densidades de menos de 1.000 arb/ha a los 3 años ya se está realizando el primer aclareo; en este particular es importante señalar que el modelo es flexible, pues puede ser reprogramado para considerar otros supuestos o restricciones que representen condiciones de manejo diferentes, tales como la ejecución de aclareos a edades más tempranas. En investigaciones futuras sería conveniente realizar modificaciones al modelo para representar otros escenarios de manejo y hacer comparaciones en término de los beneficios obtenidos.

3.2 Análisis de sensibilidad

3.2.1 Costo de corta

Al cambiar los valores de esta variable en el rango de variación indicado se observó que los resultados del modelo se mantienen iguales. En todos los casos, los regímenes de aclareo óptimos siguen siendo los mismos y la mejor solución corresponde al régimen que contempla tres aclareos y una densidad inicial de 1.111 arb/ha.

3.2.2 Tasa de interés

Las variaciones en la tasa de interés producen cambios en la solución óptima en algunos escenarios. Si el régimen de manejo incluye solamente un aclareo, al disminuir la tasa de interés a 4% y 6% la edad y la intensidad del mismo cambia. La edad y la intensidad de los aclareos también se alteran cuando la tasa de interés aumenta a 12% y 14%, para el escenario que considera cuatro aclareos.

3.2.3 Precio de la madera

En todos los escenarios que se presentan en el cuadro 2, al cambiar la relación entre los precios de la madera rolliza para las diferentes categorías dia-

métricas, los mejores regímenes encontrados por el modelo tienen edades e intensidades de aclareo diferentes a los regímenes óptimos obtenidos con los datos originales, por lo tanto el modelo es sensible a estas variaciones.

3.2.4 Tasa de crecimiento (k)

El modelo es muy sensible a variaciones en la tasa de crecimiento (parámetro k de la ecuación de Chapman-Richards de crecimiento en área basal), si su valor cambia en al menos 1% los regímenes de aclareo óptimos se modifican. Al aumentar la tasa de crecimiento k , lo cual pudiera suceder en la práctica si se emplean otros tratamientos silviculturales como fertilización o irrigación, el modelo prescribe los aclareos a edades más tempranas. Estos resultados tienen sentido, ya que cuando un rodal crece más rápido, se hace necesario efectuar aclareos tempranos para evitar los efectos de la competencia. Lo contrario ocurre cuando la tasa de crecimiento disminuye, por lo general la edad en que se realizan los aclareos es mayor, ya que el rodal tarda más en alcanzar el área basal máxima.

3.2.5 Área basal limitante y área basal máxima

El modelo resultó muy sensible a la modificación de la amplitud del intervalo entre estas dos variables, el cual define el período durante el cual el crecimiento en área basal es máximo. En todos los escenarios de optimización la solución óptima se altera cuando se cambian los valores del área basal limitante y el área basal máxima.

4. Conclusiones y recomendaciones

El modelo de optimización presentado en este capítulo permite definir esquemas de aclareo para plantaciones de *T. grandis* (teca), teniendo como objetivo la maximización del valor actual neto del flujo de caja relacionado a las cortas (intermedias y final). Este es un enfoque diferente al que tradicionalmente se ha utilizado para proponer regímenes de manejo para teca.

El modelo genera información completa relacionada al régimen de aclareos óptimo que puede ser de gran ayuda para los profesionales forestales responsables de planificar el manejo de plantaciones. Esta información incluye edad e intensidad de los aclareos, variables de rodal como área

basal, diámetro del árbol medio, altura, densidad, volumen, tanto del vuelo aclareado como del vuelo principal, para cada año del turno. Además, es posible obtener regímenes de aclareo para diferentes escenarios relacionados con los costos de corta, precio de la madera, tasa de interés, calidad de sitio y densidad inicial.

Diferentes variables pueden afectar la optimización e influir en el régimen de aclareo que el modelo genera. A través del análisis de sensibilidad se determinó que el modelo es muy sensible a los parámetros tasa de crecimiento, área basal limitante, área basal máxima, y al precio de la madera, es moderadamente sensible a la tasa de interés, y no es sensible a cambios en los costos de corta. De esta manera, para utilizar modelo de prescripción de aclareos y obtener resultados confiables se debe tener mucho cuidado al momento de estimar los parámetros y variables más sensibles del modelo.

El Algoritmo Genético diseñado para resolver el modelo funcionó correctamente, ya que permitió integrar el módulo de crecimiento con el algoritmo de optimización, obteniendo la solución del modelo en fracciones de segundo sin importar su complejidad. A pesar de ser una técnica muy robusta, fácil de implementar y utilizada ampliamente en distintas áreas, no se encuentran en la literatura trabajos donde se haya utilizado para resolver de modelos a nivel de rodal. Por esta razón, en investigaciones futuras se recomienda comparar su desempeño con técnicas de solución como el método Hooke y Jeeves, heurísticas como Recocido Simulado y Búsqueda Tabú u otros métodos de búsqueda basados en poblaciones.

Los resultados mostraron que la metodología utilizada en este trabajo para prescribir regímenes de aclareo para teca, produce resultados razonables dentro de las restricciones y supuestos establecidos. Sin embargo, el modelo es susceptible a mejoras, tal como la utilización de un modelo de simulación de crecimiento y rendimiento más refinado, que incluya otros aspectos de la dinámica de la plantación (ej. índice de sitio, altura mayor, nutrientes, componentes de biomasa, cierre de copa, entre otros).

El modelo de optimización para prescribir regímenes de aclareos puede trabajar como herramienta de apoyo en la toma de decisiones referentes al manejo de teca, puesto que indica posibles caminos a seguir con sus consecuencias en el desa-

rollo del rodal y en los beneficios que pueden obtenerse de éste. Aunque fue desarrollado bajo unos supuestos específicos, puede ser fácilmente reprogramado para adaptarlo a otras condiciones e incluso a otras especies forestales. Adicionalmente, los regímenes de aclareo que el modelo es capaz de encontrar permiten definir un conjunto de alternativas que un profesional forestal puede evaluar de acuerdo a su experiencia y a la factibilidad de su aplicación.

5. Agradecimiento

Este trabajo fue financiado por el Consejo de Desarrollo Científico, Humanístico, Tecnológico y de las Artes (CDCHTA), de la Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela, bajo el proyecto FO-705-11-01-B.

6. Referencias bibliográficas

- BETTINGER, P., K. BOSTON, J.P. SIRY y D.L. GREBNER. 2009. *Forest Management and Planning*. Academic Press, Elsevier. San Diego, EEUU. 331 p.
- BULLARD, S.H., H.D. SHERALI y W.D. KLEMPERER. 1985. Estimating optimal thinning and rotation for mixed-species timber stands using a random search algorithm. *Forest Science* 31: 303-315.
- CHAVES, E. y O. CHINCHILLA. 1986. Ensayos de aclareo en plantaciones de *Tectona grandis* L. f en Cóbano de Puntarenas, Costa Rica. *Ciencias Ambientales* 7:65-74.
- DAVIS, L.S., N. JOHNSON, P. BETTINGER y T. HOWARD. 2001. *Forest management: to sustain ecological, economic, and social values*. McGraw-Hill. Nueva York, EEUU. 804 p.
- DRÉO, J., A. PÉTROWSKI, P. SIARRY y E. TAILLARD. 2006. *Metaheuristics for hard Optimization*. Springer-Verlag. Berlín, Alemania. 369 p.
- DUPUY, B. y D. VERHAEGEN. 1993. Le teck de plantation (*Tectona grandis*) en Côte d'Ivoire. *Bois et Forêts des Tropiques* 235: 9-24.
- FONSECA, W. 2004. Manual de productores de teca (*Tectona grandis* L. f) en Costa Rica. Heredia, Costa Rica. En línea: www.fonafifo.com/text_files/proyectos/ManualProductoresTeca.pdf [Consultado: 25/03/2012].
- HILLE, M., D. HESSENMÖLLER, B. MÖHRING y K.V. GADOW. 1999. Evaluating alternative silvicultural

- regimes in a 110-year old beech forest. Provisional Proceedings "From Theory to Practice-Gaps and Solutions in Managerial Economics and Accountings in Forestry". 13 al 15 de mayo de 1999. Praga, República Checa.
- KANNINEN, M., L.D. PEREZ, M. MONTERO y E. VIQUEZ. 2004. Intensity and timing of the first thinning of plantations in Costa Rica: results of a thinning trial. *Forest Ecology and Management* 203: 88-99.
- LOWE, R.G. 1976. Teak (*Tectona grandis* Linn f) thinning experiment in Nigeria. *Commonwealth Forestry Review* 55(3): 189-202.
- MORET, A.Y., M. JEREZ y A. MORA. 1998. Determinación de ecuaciones de volumen para plantaciones de teca (*Tectona grandis* L.) en la unidad experimental de la Reserva Forestal Caparo, Estado Barinas-Venezuela. *Revista Forestal Venezolana* 42(1): 41-50.
- OSORIO, O. 1997. Regímenes de espesura y sus efectos en la rentabilidad de teca (*Tectona grandis* L.f) en Caparo, Venezuela. Trabajo de grado. Maestría en Manejo de Bosques. Cefap, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela. 98 p.
- PÉREZ, L. D. 2005. Stand growth scenarios for *Tectona grandis* plantations in Costa Rica. Academic dissertation. University of Helsinki. Finlandia. 77 p.
- PIENAAR, L.V. y K.J. TURNBULL. 1973. The Chapman-Richards Generalization of Bertalanffy's growth model for basal area growth and yield in even-aged stands. *Forest Science* 19: 2-22.
- PUKKALA, T. 2009. Population-based methods in the optimization of stand management. *Silva Fennica* 43(2): 261-274.
- QUINTERO, M.A. 2013. Modelado de un sistema de planificación y manejo de plantaciones forestales industriales. Tesis. Doctorado en Ciencias Aplicadas. Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela. 263 p.
- QUINTERO, M.A., M. JEREZ y J. FLORES. 2012. Modelo de crecimiento y rendimiento para plantaciones de teca (*Tectona grandis* L.) usando el enfoque de espacio de estados. *Revista Ciencia e Ingeniería* 33(1): 33-42.
- TORRES, L.A. 1982. *Influencia del sitio y la espesura en el crecimiento en plantaciones de teca (Tectona grandis) en Caparo, Venezuela*. Universidad de los Andes, Facultad de Ciencias Forestales, Mérida, Venezuela. 67 p.
- VALSTA, L.T. 1990. A comparison of numerical methods for optimizing even aged stand management. *Canadian Journal of Forest Research* 20: 961-966.
- VINCENT, L. 1980. *Manejo de plantaciones con fines de producción*. Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales, Centro de Estudios Forestales de Postgrado. Mérida, Venezuela. 151 p.
- VINCENT, L. 1985. *El modelo de área basal en la formulación del régimen de espesura en plantaciones de teca en Caparo, Edo Barinas, Venezuela*. Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales, Centro de Estudios Forestales de Postgrado. Mérida, Venezuela. 47 p.
- VINCENT, L. 1989. *El raleo en plantaciones jóvenes de teca en la Reserva Forestal de Caparo, Venezuela*. Proyecto CC2-7. Cuadernos Comodato ULA-Marnr. Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales. Mérida, Venezuela. 39 p.
- VINCENT, L., A.Y. MORET y M. JEREZ. 2000. Comparación de algunos regímenes de espesura en plantaciones de teca en el área experimental de la Reserva Forestal de Caparo, Venezuela. *Revista Forestal Venezolana* 44(2): 87-95.
- WIKSTRÖN, P. 2001. Effect of decision variable definition and data aggregation on a search process applied to a single-tree simulator. *Canadian Journal of Forest Research* 31: 1057-1066.
- WIKSTRÖN, P. y L.O. ERIKSSON LO. 2000. Solving the stand management problema under biodiversity-related considerations. *Forest Ecology and Management* 126: 361-376.
- ZAMBRANO, T. 1993. *Modelo preliminar de simulación del crecimiento en área basal para la teca (Tectona grandis Linn)*. Trabajo de grado. Maestría en Manejo de Bosques. Cefap, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela. 147 p.
- ZAMBRANO, T., M. JEREZ y L.VINCENT. 1995. Modelo preliminar de simulación del crecimiento en área basal para la teca (*Tectona grandis* L.) *Revista Forestal Venezolana* 39 (1): 40-48.