Un enfoque metaheurístico para optimizar la planificación de cortas en plantaciones forestales

A metaheuristic approach for optimizing the harvest scheduling in forest plantations

Quintero-Méndez, María^{1*}; Jerez-Rico, Mauricio²

¹Escuela de Ingeniería Forestal, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Universidad de Los Andes, Mérida-Venezuela

²Centro de Estudios Forestales y ambientales de Postgrado, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Universidad de Los Andes, Mérida-Venezuela

*mariaq@ula.ve

Resumen

*En este artículo se abordan dos problemas de optimización relacionados a la planificación de cortas en plantaciones forestales dedicadas a la producción de madera: 1) programación de aclareos en un rodal, y 2) planificación del aprovechamiento forestal en una plantación con múltiples rodales. Para cada problema se planteó un modelo de optimización restringida. Estos modelos son difíciles de resolver usando técnicas clásicas de programación matemática, por lo que se propone el uso de metaheurísticas para encontrar soluciones cercanas a la óptima. Se diseñó e implementó un Algoritmo Genético para solucionar el primer problema, mientras que el segundo problema fue resuelto mediante la metaheurística Recocido Simulado. Los algoritmos fueron utilizados para obtener soluciones bajo distintos escenarios, usando datos de plantaciones de teca (*Tectonagrandis*L.f.) provenientes de las Reservas Forestales de Caparo y Ticoporo (Venezuela). Ambas metaheurísticas permitieron obtener soluciones de manera satisfactoria requiriendo tiempos de computación muy bajos. Los modelos desarrollados en este trabajo pueden ser de gran ayuda en los procesos de toma de decisiones relacionados a la planificación del manejo forestal, ya que brindan información útil de manera rápida y oportuna.*

Palabras claves: algoritmos genéticos, recocido simulado, planificación forestal

Abstract

*In this article, two optimization problems are addressed in relation to thinning and harvest planning in forest plantations for timber production: 1) prescribing thinning regimes for a stand, and 2) harvest planning for a multiple stands plantation project. For each problem, a restricted optimization problem was proposed. Because these models are difficult to solve by classic mathematical programming technique, a metaheuristic approach is used to find near optimum solutions. A Genetic Algorithm was designed and implemented for solving the first problem; whereas, the second was solved through the Simulated Annealing metaheuristic. Further, the algorithms were used to obtain solutions under various scenarios for teak (*Tectonagrandis*L.f.) plantations stands data from the Caparo and Ticoporo forest reserves (Venezuela). Both metaheuristics produced satisfactory solutions, requiring very low computing times. The models developed in this work can be very helpful in decision-making processes related to forest management planning, since they are able to provide useful information in a fast and opportune way.*

Keywords: genetic algorithms, simulated annealing, forest planning.

1 Introducción

En una plantación forestal dedicada a la producción de madera uno de los problemas claves para el éxito económico es la planificación de las cortas, tanto intermedias para favorecer el crecimiento de la masa forestal como la corta

final para el aprovechamiento de la madera. Usualmente las plantaciones están divididas en compartimientos llamados rodales, cada uno de los cuales comprende un conjunto de árboles que ocupan un área específica suficientemente uniforme en edad, especie y condición para ser distinguible de otros ubicados en áreas cercanas, un rodal puede verse como una unidad de tratamiento (McDill 2014). Entre los

diversos aspectos que abarca el manejo de las plantaciones forestales, uno de gran importancia es establecer para cada rodal la edad en que deben efectuarse las cortas, así como también el porcentaje de la masa forestal que debe ser removido en cada intervención, de tal manera que se obtenga el mayor beneficio económico, considerando aspectos técnicos, biológicos y ambientales. A este problema se le conoce como planificación de cortas forestales, en inglés *forest harvest scheduling*.

Debido a los diversos factores que intervienen en una plantación forestal (biológicos, ambientales, financieros), el problema de planificación de cortas puede abordarse mediante la formulación de un modelo matemático y la aplicación o desarrollo de un algoritmo para encontrar la solución. Desde la década de los 60 se han venido empleando técnicas de programación matemática con este fin, entre ellas, la Programación Lineal ha sido muy utilizada para asignar actividades y recursos en áreas forestales extensas y sobre períodos de tiempo largos (Bettingery y col., 2009a). También se ha empleado Programación Entera, Programación Entera Mixta, Programación Entera Binaria y Programación por Metas, todas técnicas derivadas de la Programación Lineal (Bettinger y col., 2004). En la mayoría de las aplicaciones de la Programación Lineal y sus variantes, se busca la maximización de los beneficios del bosque, mediante la asignación de un régimen de manejo a cada uno de los rodales o compartimientos que lo conforma.

Con el transcurrir del tiempo los procesos de toma de decisiones en la planificación del manejo forestal se han hecho más complejos, debido a la incorporación de nuevos objetivos tales como el secuestro de carbono, conservación de la biodiversidad, conservación de los suelos, recreación. Esta complejidad está asociada al uso de ecuaciones no lineales para modelar el comportamiento de una masa forestal, la inclusión de aspectos espaciales en los modelos, un número elevado de variables y restricciones, y la optimización de varios objetivos de manera simultánea (Bettinger y col., 2009b, Dong y col., 2016). En muchos problemas con estas características, las técnicas de programación matemática dejan de ser efectivas pues los algoritmos fallan al tratar de obtener la solución, o en algunos casos los tiempos de cómputo requeridos son muy altos. Esto no solo sucede en el campo de la planificación forestal, en la literatura hay referencia de algunos problemas clásicos de optimización que no pueden resolverse mediante los algoritmos exactos que usan las técnicas tradicionales de programación matemática o que requieren de tiempos de computación prohibitivos para hallar una solución (ej. problema del viajero, problema de la mochila, coloración de grafos), a estos problemas se les denomina *NP difíciles*.

Una excelente alternativa para obtener buenas soluciones en modelos de optimización difíciles de resolver es el uso de técnicas heurísticas, las cuales son procedimientos que permiten obtener soluciones cercanas al óptimo en un tiempo de computación razonable. En las últimas tres décadas han surgido un tipo de procedimientos

heurísticos generales que pueden usarse para resolver una amplia variedad de problemas adaptando convenientemente los elementos que los definen y que permiten obtener mejores resultados; tales procedimientos se denominan metaheurísticas. El término fue introducido por Glover (1986), y a partir de entonces, han surgido multitud de propuestas de procedimientos metaheurísticos para solucionar problemas de optimización en diversas áreas del conocimiento.

En el caso específico de la planificación de cortas tanto en bosques naturales como en plantaciones forestales, diferentes metaheurísticas se han utilizado con éxito para manejar la complejidad de los problemas, algunas de ellas son Recocido Simulado, Búsqueda Tabú, y Algoritmos Genéticos (Heinonen y col., 2004, Bettinger y col., 2009a). Aunque las técnicas de programación matemática clásicas aún se utilizan para resolver algunos problemas de planificación, la tendencia es emplear técnicas heurísticas, y en especial las metaheurísticas, ya que éstas permiten manejar de manera más eficiente la complejidad de los modelos (Bettinger y col., 2004, Pukkala y col., 2005; Liu y col., 2006).

En este artículo se utilizan procedimientos metaheurísticos para resolver dos problemas de optimización relacionados a la planificación de cortas: 1) programación de aclareos (cortas intermedias) en un rodal, y 2) planificación del aprovechamiento forestal en una plantación conformada por múltiples rodales. En cada problema se plantea un modelo matemático y se desarrolla un algoritmo basado en metaheurísticas para encontrar una secuencia óptima de cortas. Este trabajo muestra la utilidad de las metaheurísticas para tratar problemas de planificación forestal difíciles de resolver mediante técnicas clásicas de optimización.

2 Planteamiento de los problemas a estudiar

2.1 Problema 1: Programación de aclareos en un rodal.

Los aclareos también llamados raleos son cortas realizadas durante la vida de un rodal para remover árboles de forma y calidad indeseables y así concentrar el potencial productivo del sitio en los árboles de mayor valor comercial. Los aclareos permiten acelerar el crecimiento en diámetro, lo que conlleva a acortar el turno (edad de la corta final), aumentar el porcentaje de árboles que alcanzan la madurez, mejorar la calidad de la madera, y obtener rendimientos intermedios, entre otros beneficios (Chaves 2003).

La prescripción de aclareos es uno de los principales problemas que se presentan en el manejo de plantaciones, y consiste en determinar la edad en que deben efectuarse, la intensidad o porcentaje de árboles que deben extraerse y el tipo de aclareo. Estas son decisiones que se toman para un rodal, por eso es un problema de planificación a nivel de rodal (stand-level) (McDill 2014). 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 descienden 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, ya 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) la planificación de los aclareos no es un problema sencillo puesto que involucra una serie de aspectos, 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 la selección de la edad en las que se pueden realizar los aclareos entre las diferentes opciones factibles.

Para prescribir aclareos en un rodal se han utilizado tres enfoques: 1) ensayos de campo con distintos regímenes de aclareo para estudiar el comportamiento del rodal en el tiempo; 2) modelos de simulación de crecimiento y rendimiento, los cuales permiten estudiar la dinámica de un rodal y evaluar la respuesta a diferentes regímenes de aclareo; y 3) técnicas de optimización para determinar la mejor combinación de edad e intensidad de los aclareos tal que se optimice una función objetivo. Las técnicas de optimización que más se utilizan para modelar el problema de la determinación del régimen óptimo de aclareo son Programación Dinámica, el método de Hooke y col., y técnicas heurísticas (Bettinger y col., 2005).

2.2 Problema 2: Planificación del aprovechamiento en una plantación con múltiples rodales.

Consiste en la planificación de un sistema de cortas para una plantación forestal conformada por múltiples rodales de una misma especie. Cada rodal tiene características que lo distinguen, como por ejemplo, ubicación, densidad inicial de plantación, calidad de sitio, año de plantación y tasa de crecimiento. Se requiere definir un plan de manejo que asigne a cada rodal un régimen de aclareo (seleccionado de un conjunto de regímenes predefinidos) y establezca el año en que debe realizarse la corta final, de tal manera que se maximicen los beneficios de la plantación obtenidos por la producción de madera. Por otra parte, se requiere cumplir con una cuota anual de producción de madera, para lo cual es posible realizar cortas en varios rodales en un mismo año, la madera aprovechada puede ser extraída en los aclareos o en la corta final de algunos rodales, de acuerdo a los volúmenes disponibles.

En la planificación deben tomarse en cuenta los ingresos que se producen por la venta de madera y los costos involucrados, tales como los costos de establecimiento, costos de mantenimiento, costo de efectuar una corta y costo de transportar la madera aprovechada. El objetivo es obtener

un plan de cortas que indique para cada año de un periodo de planificación los rodales que deben ser cortados y la intensidad de la corta, de tal manera que se cumpla con la demanda anual de madera y se maximicen los beneficios económicos de la plantación.

En este problema la toma de decisiones se realiza considerando todos los rodales simultáneamente y los objetivos y restricciones son globales para la plantación. En estos casos el régimen de manejo que es óptimo para un rodal en particular puede que no sea el mejor cuando ese rodal forma parte de una plantación conformada por múltiples rodales, ya que existen objetivos a nivel de la plantación que pueden no cumplirse si cada rodal es manejado de manera independiente. A este tipo de planificación se le conoce como planificación a nivel de bosque (*forest-level*).

En los modelos de optimización a nivel de bosque es frecuente utilizar Programación Lineal y sus variantes, pero cuando el problema es complejo y estas técnicas fallan, se utilizan técnicas heurísticas. A nivel de bosque las técnicas heurísticas más utilizadas son aquellas que consideran una sola solución por iteración, llamadas s-metaheurísticas, tales como Recocido Simulado y Búsqueda Tabú (Dong y col., 2016).

3 Datos utilizados para el desarrollo de los modelos

3.1 Especie forestal

Se utilizaron datos de teca (*Tectonagrandis* L.f), provenientes de las Reservas Forestales de Caparo y Ticoporo, ubicadas en la región de los Llanos Occidentales de Venezuela, así como también se usó información generada en otras investigaciones que se han llevado a cabo en la Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales de la Universidad de Los Andes, relacionadas a esta especie (Zambrano y col., 1995, Osorio 1997, Moret y col., 1998, Zambrano y col., 2001, Quintero y col., 2012, Jerez y col., 2015, Quintero y col., 2017).

3.2 Modelo de crecimiento y rendimiento

En los problemas de planificación forestal es necesario realizar estimaciones de variables como área basal, densidad, diámetro medio, volumen y altura, para cada año del período de planificación y en respuesta a la aplicación de tratamientos silviculturales (ej. aclareos). Para ello, se requiere de un modelo de crecimiento y rendimiento, el cual comprende ecuaciones que permiten la descripción y predicción del desarrollo de masas forestales en respuesta a factores biológicos, ambientales y técnicos.

En esta investigación se utilizó el modelo de crecimiento y rendimiento para teca desarrollado y descrito suficientemente por Quintero y col. (2012) y Jerez y col. (2015). Las ecuaciones del modelo (Tabla 1) fueron ajustadas en estudios previos usando datos de teca de los

llanos forestales venezolanos (Zambrano y col., 1995, 2001, Moret y col., 1998).

Tabla1. Resumen de las ecuaciones del modelo de crecimiento y rendimiento para teca.

Variable o parámetro a estimar	Ecuación
Crecimiento de área basal	$AB_t = AB_{ps} [1 - e^{-k(t-t_0)}]^{1-m}$ (1)
Tasa de crecimiento k después de aclarear	$k = \frac{\ln[1 - (AB_t/AB_{ps})^{1-m}]}{t - t_0}$ (2)
Diámetro del árbol medio	$D_t = \sqrt{\frac{4AB_t}{\pi \times N_t}} \times 100$ (3)
Altura total	$h = 33,6114369 \times e^{-\frac{8,7143811}{d}}$ (4)
Volumen sin corteza	$VSC = 0,26005789 \times (d^2 h)^{0,963638}$ (5)
Volumen con corteza	$VCC = 0,34337814 \times (d^2 h)^{0,9338306}$ (6)

AB_t : área basal en el tiempo t ($m^2 ha^{-1}$); AB_{ps} = área basal potencial de sitio ($m^2 ha^{-1}$); t_0 = tiempo inicial de medición (años); t = edad (años); k = tasa de crecimiento (parámetro); m = parámetro; D_t = diámetro a la altura de pecho del árbol medio en el tiempo t (cm); N_t = número de árboles en el tiempo t ($Narb ha^{-1}$); h : altura total (m); d : diámetro a la altura de pecho (m).

4 Formulación de los modelos matemáticos

4.1 Modelo 1: Programación de aclareos en un rodal.

Se desarrolló un modelo de optimización para determinar regímenes de aclareo para un rodal de teca, tal que semaximicen los beneficios económicos obtenidos de la producción de madera para aserrío. Un régimen de aclareo especifica el número de aclareos a aplicar durante la vida del rodal, edad e intensidad (% del área basal a extraer) de los mismos. El número de aclareos 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.

El modelo planteado permite encontrar los mejores regímenes de aclareo para un rodal, tomando en cuenta la calidad de sitio, la densidad inicial de plantación y la edad del turno.

Variables de decisión:

A_j : número de años transcurridos desde el año 0 (si es el primer aclareo, $j=1$) o desde el aclareo anterior, para efectuar un nuevo aclareo j .

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

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.

$$Max VAN = - \sum_{i=1}^t \frac{Cm_i}{(1+r)^i} + \sum_{i=1}^t \left(\frac{Ing_i - C_i}{(1+r)^i} \right) \quad (7)$$

donde:

t : edad del turno

r : tasa de interés

Cm_i : costo de establecimiento o costo de mantenimiento en el año i .

Ing_i : ingreso neto percibido en el año i debido a la venta de madera extraída en un aclareo o a la corta final. Se calcula de la siguiente manera:

C_i : costo de efectuar un aclareo en el año i o costo de la corta final.

Restricciones:

$$ABO_{i+1} = ABf_i + ICA_{i+1,i} \quad (8)$$

$$ABacl_i = I_i \times ABO_i \quad (9)$$

$$ABf_i = ABO_i - ABacl_i \quad (10)$$

$$A_i \geq 3 \quad (11)$$

$$I_i \geq 0.25 \quad (12)$$

$$A_j \text{ es entera } \forall j \quad (13)$$

donde:

ABO_i : área basal (en $m^2 ha^{-1}$) al inicio del año i

ABf_i : área basal (en $m^2 ha^{-1}$) al final del año i

$ABacl_i$: área basal (en $m^2 ha^{-1}$) aclareada en el año i

Las restricciones (8), (9) y (10) 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 modelo de crecimiento y rendimiento y en función de las variables de decisión. La restricción (11) indica que el primer aclareo se puede realizar a partir de los tres años de edad del rodal y que entre dos aclareos sucesivos deben transcurrir al menos tres años. La restricción (12) establece que la intensidad de un aclareo debe ser al menos del 25% del área basal del rodal.

4.2 Modelo2: Planificación del aprovechamiento en una plantación con múltiples rodales.

Para resolver este problema se planteó un modelo de optimización restringida que utiliza variables binarias e incluye relaciones funcionales no lineales derivadas de las ecuaciones de crecimiento y rendimiento utilizadas. El modelo determina para cada año del período de planificación cuáles rodales deben ser aclareados y cuáles cortados en su

totalidad, de tal manera que se cumpla con la demanda de madera establecida a la vez que se maximizan los beneficios económicos.

Variables de decisión:

X_{ij} : variable binaria que vale 1 si se le asigna al rodal i el régimen de manejo j , en caso contrario es igual a 0.

Un régimen de manejo j incluye un programa de aclareos elegido de una lista que incluye varias alternativas y el año de la corta final.

Función objetivo:

Corresponde a la maximización del valor actual neto (VAN) de los flujos de caja ocurridos durante el período de planificación relacionados con la madera extraída de los aclareos y la corta final en cada rodal.

$$\text{Max VAN} = \sum_{i=1}^{nr} \sum_{j=1}^{m_i} \sum_{k=1}^a X_{ij} \left(\frac{\text{Ing}_{ijk} - C_{ijk}}{(1+r)^k} \right) \quad (14)$$

donde:

nr : número de rodales de la plantación

m_i : cantidad de regímenes de manejo alternativos para el rodal i .

a : número de años que incluye el período de planificación.

Ing_{ijk} : ingresos obtenidos por la venta de madera extraída del rodal i , en el año k , si se aplica el régimen de manejo j .

Costo_{ijk} : costos en los que se incurre en el rodal i , en el año k , si se aplica el régimen de manejo j . Incluye costo de corta que varía de acuerdo al volumen extraído, costo de establecimiento y mantenimiento del rodal, y costo de transporte de la madera.

r : tasa de interés.

Restricciones:

$$\sum_{i=1}^{nr} \sum_{j=1}^{m_i} X_{ij} V E_{ijk} \geq CP_k \quad k = 1, 2, \dots, a \quad n \quad (15)$$

$$\sum_{j=1}^{m_i} X_{ij} = 1 \quad i = 1, 2, \dots, nr \quad (16)$$

$$X_{ij} = (0, 1) \quad i = 1, 2, \dots, nr; j = 1, 2, \dots, m_i \quad (17)$$

donde:

nr : número de rodales.

m_i : cantidad de regímenes de manejo alternativos para el rodal i .

a : número de años que incluye el período de planificación.

$V E_{ijk}$: volumen extraído del rodal i en el año k , si se aplica el régimen de manejo j .

CP_k : cuota de producción de madera para el año k .

Las restricciones (15) se refieren al cumplimiento de la cuota de producción anual de madera, para cada año del período de planificación hay una restricción; las restricciones (16) indican que a un rodal solamente se le puede asignar un

régimen de manejo; y las restricciones (17) señalan que las variables de decisión son binarias.

5 Metaheurísticas empleadas

5.1 Algoritmos Genéticos (AG)

Los AG fueron propuestos por Holland (1975) como una técnica de búsqueda basada en la teoría de la evolución de Darwin y en la genética, han sido utilizados con bastante éxito 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 y col., 2006).

Esta técnica usa una analogía con el comportamiento evolutivo natural, considerando que las posibles soluciones del problema son individuos y un conjunto de soluciones corresponde a una población. Un AG comienza con una población de soluciones, la cual evolucionará durante varias generaciones (iteraciones del algoritmo). En cada iteración se evalúa la población de soluciones de acuerdo a una función de adaptación que mide su calidad, y se le aplican los operadores genéticos de selección (los mejores individuos tienen mayor probabilidad de ser seleccionados para pasar a la siguiente generación), cruzamiento (dos o más soluciones se combinan para producir una nueva solución) y mutación (se origina un nuevo individuo al aplicar pequeños cambios en un individuo). La aplicación de estos operadores genera una nueva población que reemplaza a la anterior y que tiene mejores valores de la función de adaptación que su predecesora. Después de varias iteraciones, si el AG ha sido bien diseñado, la población final estará compuesta por individuos más aptos, siendo el mejor de éstos la solución que genera el algoritmo.

En esta investigación se diseñó un AG para resolver el problema de prescripción de regímenes de aclareo en un rodal (Modelo 1, ecuaciones 5-13). En la implementación del algoritmo se aplicaron las siguientes estrategias de diseño:

Representación de una solución: se utilizó codificación binaria para representar las variables de decisión del modelo. Así, una solución del modelo se representa mediante un vector de 0's y 1's. Cada variable de decisión ocupa cierta cantidad de elementos del vector, dependiendo del rango de valores que puede tomar y de su precisión.

Solución inicial: corresponde a una población de N soluciones, generadas aleatoriamente.

Función de adaptación: está representada por la función objetivo del problema

Operadores genéticos: en el algoritmo se incluyeron los operadores genéticos básicos descritos por Holland (1975), selección (selección proporcional y método

de la ruleta), cruzamiento (cruzamiento de dos puntos con cierta probabilidad P_c) y mutación (cada elemento del vector solución puede cambiar su valor de acuerdo a una probabilidad P_m).

Parámetros del AG: tamaño de la población (N), probabilidad de cruzamiento (P_c), probabilidad de mutación (P_m) y número máximo de iteraciones del algoritmo (K_{max}), este último es el criterio de parada utilizado. Los valores de los parámetros se determinaron mediante experimentación.

5.2 Recocido simulado (RS)

También llamado Templado Simulado o en inglés *Simulated Annealing* es una técnica heurística basada en un algoritmo propuesto por Metropolis y col. (1953) para simular el proceso de enfriamiento de un material. El RS consiste en un algoritmo de búsqueda para problemas de optimización global que encuentra el valor óptimo de una función o uno muy cercano a este en un espacio de soluciones grande.

El algoritmo comienza con una solución inicial, hace una búsqueda local y genera una solución vecina, la cual se encuentra cerca de la solución inicial en el espacio de soluciones. Si la solución vecina es mejor que la solución inicial se acepta como la nueva solución y se reinicia el proceso de búsqueda. En caso contrario, una solución peor que la inicial puede aceptarse dependiendo de una función probabilística, lo cual evita caer en un óptimo local (Dowsland col., 2001). El RS utiliza un criterio de aceptación de soluciones vecinas que se adapta a lo largo de su ejecución, haciendo uso de una variable llamada temperatura. La variable temperatura se inicia en un valor alto para permitirle al algoritmo aceptar soluciones de peor calidad con una alta probabilidad. La temperatura va disminuyendo en cada iteración mediante un mecanismo definido por una curva de enfriamiento. Para cada nivel de temperatura un número determinado de nuevas soluciones debe ser ensayado antes de que la temperatura sea reducida. El proceso se repite hasta que el algoritmo ya no es capaz de encontrar mejores soluciones, cuando la temperatura se acerca a cero o al alcanzar un número máximo de iteraciones.

La metaheurística RS fue utilizada en este trabajo para determinar soluciones al problema de planificación del aprovechamiento en plantaciones de teca conformadas por múltiples rodales (ecuaciones 14 – 17).

Las estrategias de diseño que se utilizaron en el desarrollo del algoritmo de RS son las siguientes:

Representación de una solución: se hizo mediante una matriz de variables binarias, cuyo número de filas es igual al número de rodales, y el número de columnas corresponde al número máximo de alternativas de manejo ($m = \text{Max}(m_i)$). En cada elemento de la matriz se almacena una variable binaria X_{ij} , cuyo valor es 1 si al rodal i se le asigna el régimen de manejo j , o vale 0 en caso contrario.

Criterio de parada: se definió un número máximo de iteraciones.

Solución inicial: se generó de manera aleatoria, esto es, para cada rodal se elige al azar un régimen de manejo.

Generación de soluciones vecinas: para crear una solución vecina de otra solución X se eligen al azar dos rodales (dos filas de la matriz que representa la solución) y se cambia en forma aleatoria el régimen de manejo asignado a cada uno de ellos.

Evaluación de una solución: para medir la calidad de una solución se utilizó una función de evaluación que considera la función objetivo del modelo (ecuación 14) y una penalización por la violación de las restricciones de cuota anual de producción (ecuación 15). De esta manera, las soluciones que violan las restricciones son penalizadas y tienen un peor valor de la función de evaluación que aquellas soluciones que satisfacen las restricciones. La función de evaluación $fE(X)$ está dada por la siguiente ecuación:

$$fE(X) = f(X) - P \times VT(X) \quad (18)$$

donde:

$f(X)$: función objetivo del modelo (ecuación 14).

P : penalización ($\$/m^3$) que se impone a la violación de las restricciones de cuota anual de producción (ecuación 15)

$VT(X)$: violación total (m^3) de las restricciones para una solución X , se calcula según ecuación 21.

$$VT(X) = \sum_{k=1}^a (CP_k - g_k) \times I_k \quad (19)$$

donde:

CP_k : cuota de producción fijada para el año k .

g_k : volumen aprovechado en el año k si se aplica el plan de cortas X (solución).

I_k : variable indicadora que vale 1 si en el año k se viola la restricción de cuota de producción ($g_k < CP_k$), en otro caso vale 0.

Curva de enfriamiento: se utilizó la forma exponencial o geométrica para la curva que determina la velocidad de disminución de la temperatura a medida que avanzan las iteraciones del algoritmo:

$$t_{z+1} = \alpha t_z \quad (22)$$

Donde:

t_z : temperatura en la iteración z

α : constante cercana a 1, escogida generalmente en el rango de 0,9 a 0,99 (Dréo y col., 2006).

Parámetros del algoritmo: temperatura inicial (t_0), tasa de disminución de la temperatura (α), número de iteraciones en cada nivel de temperatura (n_i) y número máximo de iteraciones del algoritmo (K_{max}), todos definidos mediante experimentación.

6 Implementación de los modelos

El Algoritmo Genético y el algoritmo de Recocido Simulado se implementaron utilizando el lenguaje de programación Visual Basic 2013. Se hicieron varias corridas de los programas bajo distintos escenarios de manejo

forestal. Los programas se ejecutaron en una computadora con procesador modelo Intel(R) Core (TM)i3-3217U 1.8 GHz, 4 GB de memoria RAM y disco duro de 500 GB.

7 Corridas de los modelos

7.1 Modelo 1: Programación de aclareos en un rodal

El modelo se utilizó para determinar regímenes de aclareos en rodales de teca con calidades de sitio I (área basal potencial = $37,5 \text{ m}^2\text{ha}^{-1}$) y II (área basal potencial = $32 \text{ m}^2\text{ha}^{-1}$), con valores de la densidad inicial de plantación iguales a 1111 y 1600 arb ha^{-1} , para edades de turno de 20, 25 y 30 años, y considerando un máximo de cuatro aclareos. Para cada escenario de optimización se hicieron 50 corridas del Algoritmo Genético, se seleccionaron como mejores regímenes de aclareo los que reportaron el VAN más alto.

7.2 Modelo 2: Planificación del aprovechamiento en una plantación con múltiples rodales

El modelo se utilizó para generar un plan de manejo de 40 años para una plantación hipotética de teca de 10.000 ha, compuesta de 200 rodales, cada uno con un área de 50 ha. Se asumió una distribución de los rodales en cuadrículas de $500 \times 1000 \text{ m}$. Los rodales están ubicados en sitios de calidades I y II, y plantados a espaciamientos de $3 \times 3 \text{ m}$ (1111 arb ha^{-1}) y $2,5 \times 2,5 \text{ m}$ (1600 arb ha^{-1}).

Para cada rodal se consideraron 10 regímenes de manejo alternativos (regímenes de aclareo) los cuales fueron generados por el modelo descrito en la sección 4.1. A partir del año 7 del período de planificación se fijó una cuota de producción que varía entre 5000 y 60000 m^3 de madera con diámetro a la altura de pecho superior a 20 cm.

Se hicieron 50 corridas del modelo, tomándose como el mejor plan de aprovechamiento aquél con mayor VAN.

8 Discusión y resultados

8.1 Modelo 1: Programación de aclareos en un rodal.

En la Tabla 2 se muestran los mejores regímenes de aclareo encontrados por el Algoritmo Genético para los diferentes escenarios considerados. Se observa que el régimen que presenta un mayor VAN es aquel que considera un rodal ubicado en calidad de sitio I, con una densidad inicial de plantación de 1111 arb ha^{-1} , un turno de 20 años y 3 aclareos, realizados a los 7, 11 y 14 años, con una intensidad del 28,6, 26,1 y 38,2% del área basal, respectivamente. El modelo además de edad e intensidad de

las cortas, calcula variables de rodal de interés forestal como área basal, diámetro del árbol medio, altura, densidad, volumen, tanto de los árboles aclareados como de los árboles remanentes para cada año del turno.

El Algoritmo Genético desarrollado para resolver el modelo de prescripción de aclareos funcionó bien, generando soluciones de manera muy rápida (1,02 seg) y con sentido lógico desde el punto de vista forestal. Para los gestores de plantaciones forestales el tipo de información que puede obtenerse con el modelo es de gran utilidad, en el manejo de plantaciones y particularmente en el caso de la teca, es importante contar con una guía para el manejo de la especie, pues además de conocer los sitios adecuados para establecerla, los cuidados en el vivero y en la fase de establecimiento, también es necesario conocer el régimen de aclareo que optimiza los objetivos del productor. En el problema tratado en este trabajo se considera que el objetivo fundamental es la obtención de beneficios económicos asociados a la producción de madera para aserrío, por tanto, el modelo busca la mejor combinación de edad e intensidad de los aclareos de tal manera que se concentre el potencial productivo del sitio en los árboles más prometedores y con mayor valor económico.

8.2 Modelo 2: Planificación del aprovechamiento en una plantación con múltiples rodales

El modelo genera un plan de cortas que indica para cada año del período de planificación los rodales que deben ser aclareados y la intensidad de la corta, así como también los rodales que deben ser sometidos a la corta final. Asimismo, se generan otros datos de interés como el volumen de madera extraído de la plantación y el diámetro medio de los árboles aprovechados. En la Tabla 3 se presenta a manera de ejemplo el mejor plan de cortas encontrado por el algoritmo de Recocido Simulado, en la tabla, por razones de espacio, solo se incluyen 10 años del período de planificación, el cual fue fijado en 40 años.

Otro resultado importante es el cumplimiento de las cuotas de producción (restricción 15), las cuales se refieren al volumen de madera rolliza con diámetro superior a los 20 cm. requerido durante cada año del período de planificación. En las distintas corridas del algoritmo se logró generar planes de aprovechamiento que satisfacen los requerimientos de volumen anual de madera cosechada.

El algoritmo de Recocido Simulado fue capaz de obtener planes de aprovechamiento de manera rápida (45,3 s) y satisfactoria.

Tabla 2. Mejores regímenes de aclareo encontrados por el Algoritmo Genético en diferentes escenarios (tasa de interés = 10%, precio de la madera oscila entre 53 y 400 US\$ m⁻³ según diámetro, costo de corta = 14.24 US\$ m⁻³)

Turno (años)	Calidad de sitio I						Calidad de sitio II					
	1111 arb ha ⁻¹			1600 arb ha ⁻¹			1111 arb ha ⁻¹			1600 arb ha ⁻¹		
	E	I	VAN	E	I	VAN	E	I	VAN	E	I	VAN
20	7	28,6		5	32,4		4	25,1		5	46,9	
	11	26,1	11684,52	11	52,3	11648,96	12	38,4	8610,77	11	56,1	8550,64
	14	38,2					17	44,11				
25	4	52,0		4	53,2		3	31,6		5	41,2	
	12	42,7	8520,92	10	54,9	9939,28	11	27,3	7873,57	12	35,0	7753,16
							17	49,7		17	48,5	
							21	40,4				
30	5	31,2		5	46,5		5	44,7		5	60,5	
	9	28,1	9372,78	10	47,7	9090,11	12	44,1	6900,40	10	28,0	6736,02
	21	48,8		19	29,0		20	47,7		14	54,0	

E: Edad del aclareo (años), I: intensidad del aclareo (% de área basal extraída), VAN: valor actual neto (US\$ m⁻²)

Tabla 3. Mejor plan de cortas generado por el algoritmo de Recocido Simulado para 10 años del período de planificación (tasa de interés = 10%, precio de la madera oscila entre 53 y 400 US\$ m⁻³ según diámetro, costo de corta = 14.24 US\$ m⁻³, costo de transporte varía entre 2 y 6 US\$ m⁻³ dependiendo de la distancia de un rodal a un punto fijo, período de planificación = 40 años)

Año	Rodales aclareados (No. rodal; intensidad del aclareo*)	Rodales sometidos a la corta final **	Volumen total aprovechado (miles de m ³)
26	(65; 26,3%) (71; 48,8%) (97; 28,5%) (100; 47,7%) (143; 47,7%) (146; 47,7%) (148; 42%) (149; 50,5%) (157; 52,1%) (187; 44,2%)	6, 20, 29, 34, 35, 59, 110	94,1
27	(7; 28,7%) (93; 48,8%) (95; 48,8%) (109; 34,7%) (111; 37,5%) (119; 28,5%) (122; 47,7%) (124; 47,7%) (138; 39%) (168; 47,7%) (171; 39%) (174; 40,5%) (179; 25,4%) (185; 40,5%)	1, 3, 36, 37, 58	98,8
28	(130; 34,7%) (140; 28,5%) (141; 28,5%) (145; 47,7%) (194; 47,7%) (195; 39%)	16, 19, 64, 72, 77, 85, 91, 92, 101, 107, 120, 127	98,4
29	(157; 37,5%) (158; 37,5%) (166; 47,7%) (170; 47,7%)	21, 25, 63, 80, 112, 114, 131, 137, 148, 163, 167, 175	93,1
30	(45; 29%) (109; 46%) (115; 30,1%) (150; 44,5%) (152; 49%) (153; 49%) (155; 49%) (185; 28,5%) (191; 47,7%)	7, 22, 42, 46, 48, 49, 81, 84, 139, 144, 161, 173, 186	115,0
31	(65; 28,7%) (100; 26,7%) (130; 45,6%) (132; 29,6%) (177; 48,8%) (181; 48,8%)	10, 52, 54, 57, 69, 75, 86, 124, 149, 160, 169, 174, 196, 200	117,4
32	(189; 32,9%)	8, 27, 30, 32, 82, 93, 98, 103, 118, 134, 190, 199	87,0
33	(116; 49,5%)	24, 41, 47, 53, 55, 61, 88, 89, 91, 106, 125, 143, 151, 176, 188, 195	115,2
34	(132; 49,5%)	14, 18, 70, 74, 97, 102, 158, 159, 164, 180, 183, 193	110,9
35	(179; 43%) (189; 43%)	31, 33, 68, 73, 94, 104, 117, 119, 145, 147, 156, 157, 168, 192, 197	113,0
VAN	33,2 millones de US\$		

* Intensidad del aclareo se expresa en % del área basal a extraer. ** Corta final: se extrae 100% de árboles.

Una herramienta como la presentada en este trabajo facilitaría la planificación del aprovechamiento de plantaciones conformadas por muchos rodales, la cual es una ardua tarea sin la ayuda de un modelo matemático, dada la gran cantidad de combinaciones de tratamientos que pueden aplicarse en los diferentes rodales. Esto, aunado a la naturaleza no lineal de las ecuaciones de crecimiento de la masa forestal, hace muy difícil la resolución del modelo mediante técnicas clásicas de optimización en un tiempo de computación razonable.

9 Conclusiones

El enfoque de optimización mediante procedimientos metaheurísticos utilizado en este trabajo permitió obtener soluciones de manera eficiente a dos problemas claves en el manejo de plantaciones forestales, la prescripción de aclareos y la programación de cortas en una plantación con múltiples rodales. Los modelos de optimización planteados son difíciles de resolver mediante técnicas clásicas de programación matemática, sin embargo, las metaheurísticas utilizadas AG y RS permitieron encontrar soluciones cercanas al óptimo bajo diferentes escenarios. Es difícil establecer cuán cercanas están las soluciones heurísticas obtenidas a la solución óptima matemática, pues no se tiene un valor de referencia para tal fin. En futuros trabajos es conveniente utilizar otras técnicas heurísticas y así determinar cuáles tienen un mejor desempeño para resolver los problemas descritos en este trabajo.

Los modelos desarrollados pueden ser usados como herramientas de apoyo en la toma de decisiones referentes al manejo de teca, puesto que indican posibles caminos a seguir con sus consecuencias en el desarrollo de la plantación y en los beneficios que pueden obtenerse de ésta. Aunque fueron desarrollados bajo unos supuestos específicos, pueden ser fácilmente reprogramados para adaptarlo a otras condiciones e incluso a otras especies forestales.

10 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-748-17-01-B.

Referencias

Bettinger P, Boston K, Siry JP, Grebner DL, 2009, *Forest Management and Planning*, Academic Press, Elseiver. San Diego, EEUU.
 Bettinger P, Chung W, 2004, *The key literature of, and trends in forest-level management planning in North*

America, 1950-2001, *International Forest Review*, Vol. 6, pp. 40-50.
 Bettinger P, Graetz D, Sessions J, 2005, *A density-dependent stand-level optimization approach for deriving management prescriptions for interior northwest (USA) landscapes*, *Forest Ecology and Management* Vol.217, pp. 171-186.
 Bettinger P, Sessions J, Boston K, 2009 b, *A review of the status and use of validation procedures for heuristics used in forest planning*, *International Journal of Mathematical and Computational Forestry & Natural-Resource Sciences*, Vol.1, pp. 26-37.
 Chaves E, 2003, *Aclareos en Plantaciones Forestales*, Instituto de Investigación y Servicios Forestales (INISEFOR), Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica.
 Dong L, Bettinger P, Liu Z, Qin H, 2016, *Evaluating the neighborhood, hybrid and reversion search techniques of a simulated annealing algorithm in solving forest spatial harvest scheduling problems*, *Silva Fennica*, Vol. 50, No. 2, article id 1622. <https://doi.org/10.14214/sf.1622>.
 Dowsland KA, Díaz BA, 2001, *Diseño de Heurísticas y Fundamentos del Recocido Simulado*. *Inteligencia Artificial*, Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial, Vol. 20, pp.34-52.
 Dréo J, Pétrowski A, Siarry P, Taillard E, 2006, *Metaheuristics for hard Optimization*, Springer - Verlag. Berlín, Alemania.
 Fonseca W, 2004, *Manual de productores de teca (Tectonagrandis L. f) en Costa Rica*, Heredia, Costa Rica. http://www.sirefor.go.cr/Documentos/Reforestacion/2004_Fonseca_ManualProductoresTeca.pdf. Fecha de consulta: 26 octubre 2017.
 Glover F, 1986, *Future paths for integer programming and links to artificial intelligence*, *Computers and Operations Research*, Vol.13, pp. 533-549.
 Heinonen T, Pukkala T, 2004, *A comparison of one- and two-compartment neighbourhoods in heuristic search with spatial forest management goals*, *Silva Fennica* Vol. 38, pp. 319-332.
 Holland JH, 1975, *Adaptation in natural and artificial systems*. University of Michigan Press, Ann Harbor, MI, EEUU.
 Jerez M, Quintero M, Quevedo A, Moret A, 2015, *Simulador de crecimiento y secuestro de carbono para plantaciones de teca en Venezuela: una aplicación en SIMILE*, *Bosque*, Vol. 36, 519 – 530
 Liu G, Han S, Zhao X, Nelson JD, Wang H, Wang W, 2006, *Optimisation algorithms for spatially constrained forest planning*, *Ecological Modelling*, Vol.194, pp. 421-428.
 McDill ME, 2014, *An overview of forest management planning and Information Management*. In: Borges JG, Díaz-Balteiro L, McDill ME, Rodríguez LCE (eds.). *The management of industrial forest plantations*, Springer, pp.27-59.

Metropolis N, Rosenbluth AW, Rosenbluth MN, Teller AH, Teller E, 1953, Equation of state calculation by fast computing machines, *Journal of Chemistry* Vol. 21, pp. 1087 – 1091.

Moret AY, Jerez M, Mora A, 1998, Determinación de ecuaciones de volumen para plantaciones de teca (*Tectonagrandis L.*) en la unidad experimental de la Reserva Forestal Caparo, Estado Barinas – Venezuela, *Revista Forestal Venezolana*, Vol. 42, pp. 41-50.

Osorio O, 1997, Regímenes de espesura y sus efectos en la rentabilidad de teca (*TectonagrandisL.f*) en Caparo, Venezuela, Tesis de Maestría. Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Centro de Estudios Forestales y Ambientales de Postgrado, Mérida, Venezuela.

Pukkala T, Kurttila M, 2005, Examining the performance of six heuristic search techniques in different forest planning problems, *Silva Fennica*, Vol.3, pp. 67 – 80.

Quintero MA, Jerez M, Flores J, 2012, Modelo de crecimiento y rendimiento para plantaciones de teca (*TectonagrandisL.*) usando el enfoque de espacio de estados, *Revista Ciencia e Ingeniería*, Vol. 33, No.1, pp. 33-42.

Quintero-Méndez MA, Jerez-Rico M, 2017, Heuristic forest planning model for optimizing timber production and carbon sequestration in teak plantations, *iForest*, Vol. 10, pp. 430 – 439

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.

Zambrano T, Jerez M, Vincent L, 1995, Modelo preliminar de simulación del crecimiento en área basal para la teca (*Tectonagrandis L.*) *Revista Forestal Venezolana*, Vol.39, pp. 40-48.

Zambrano T, Suárez M, Jerez M, 2001, Evaluación de la efectividad del ajuste de algunos modelos de regresión utilizados para estimar la relación altura-diámetro en parcelas permanentes de rendimiento y aclareo en teca (*TectonagrandisLinn*), *Revista Forestal Venezolana*, Vol.45, pp. 163-173.

Recibido: 17 de noviembre de 2016

Aceptado: 07 de julio de 2017

Quintero-Méndez, María: Ing de Sistemas, MSc. en Estadística Aplicada (ULA), Dra. en Ciencias Aplicadas (ULA), Profesora Titular de la Escuela de Ingeniería Forestal, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, ULA, Mérida-Venezuela.

Jerez, Mauricio: Ing. Forestal, M.Sc. en Estadística Aplicada (ULA), Ph.D. en Manejo Ecológico de Bosques, Louisiana State University, EEUU. Profesor Jubilado del Centro de Estudios Forestales y Ambientales de

Postgrado (CEFAP), Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, ULA, Mérida – Venezuela. Correo electrónico: jerezorama@gmail.com.