

Aspectos medioambientales dentro de la planificación forestal con objetivos múltiples: Captura de carbono y restricciones de adyacencia.

T. Gómez^a, M. Hernández^a, J. Molina^a, M. A. León^b, R. Caballero^{a,1}

^a*Departamento de Economía Aplicada (Matemáticas). Campus El Ejido s/n, 29071-Málaga.*

^b*Departamento de Matemáticas, Universidad de Pinar del Río, Pinar del Río, Cuba.*

RESUMEN

En este trabajo se presenta un modelo de programación por metas no lineal de variable binaria para planificar el aprovechamiento de una plantación productora de madera en Cuba, donde se tienen en cuenta tanto objetivos económicos como ecológicos. Se trata de no superar ciertos niveles de volumen extraído, limitar la edad de los rodales a los que se aplica tala rasa, conseguir un bosque lo más equilibrado posible respecto a grupos de edad, superar ciertos niveles del valor actualizado neto en cada periodo de la planificación así como un umbral global prefijado de captura de carbono para toda la planificación. Estos objetivos se tratan de superar teniendo en cuenta, además de restricciones técnicas relativas a los tratamientos, restricciones espaciales de adyacencias que limitan la superficie contigua máxima a la que se aplica tala rasa. El resultado es un problema sumamente complejo, para el que se ha recurrido al método metaheurístico basado en Scatter Search SSPMO a la hora de tratar su resolución. Con objeto de contrastar la potencialidad del modelo propuesto, lo hemos aplicado a una plantación de *Pinus Caribaea* situada en la provincia cubana de Pinar del Río.

Palabras Clave: *Planificación Forestal, Programación por Metas, Restricciones de Adyacencia, Captura de Carbono, Métodos Metaheurísticos*

¹ Corresponding author. Tel.:+34-952-131168; Fax: +34-952-132061.
E-mail address: r_caballero@uma.es (R.Caballero)

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas forestales desempeñan múltiples funciones. Tradicionalmente se dice que los montes cumplen un triple papel: de producción, protección y recreo. Así, los problemas de gestión forestal resultan ser problemas decisionales complejos que deben tener en cuenta distintos criterios de naturaleza económica, medioambiental y social (Díaz-Balteiro y Romero (2007)). Por esta razón se hace necesario el empleo de técnicas multicriterio para resolver una gran mayoría de problemas de gestión forestal. Desde Field (1973) hasta nuestros días son múltiples los trabajos encontrados en la literatura que utilizan técnicas multicriterio en estos problemas, como queda de manifiesto en los libros y capítulos de libro dedicados exclusivamente a este tema. Véase Weintraub et al. (2007), Mendoza y Martins (2006), Buongiorno y Gilless (2003) y Pukkala (2002). Tal y como se señala en Gómez et al. (2006), dependiendo del tipo de información disponible y de las características específicas del problema en sí, será elegida una técnica multicriterio u otra.

En este trabajo utilizamos la técnica multicriterio de programación por metas para resolver un problema de gestión forestal donde nos centraremos en dos de los tres aspectos del bosque mencionados anteriormente. Se trata de satisfacer los deseos del planificador en cuanto a volumen de madera a extraer, maximizar la tala en árboles que superen la edad de rotación, evitar la tala rasa en árboles jóvenes, regular el bosque y superar un umbral para el valor actual neto y el carbono capturado. Es decir, por una parte, nos centramos en el aspecto económico de bosques productores de madera y, por otra, consideraremos aspectos de protección ambiental. En este último aspecto, y relativo al papel que tienen los árboles como posibles reguladores del clima, se está incidiendo en los últimos años, debido a que los árboles, en su metabolismo, consumen mucho más dióxido de carbono del que emiten y pueden así contrarrestar las altas emisiones de este gas con efecto invernadero (Bateman y Lovett (2000)). En este sentido, el Protocolo de Kyoto estableció el principio de que se podrían utilizar las actividades forestales para compensar las emisiones industriales de carbono (Plantinga et al. (1999)). En este trabajo, hemos tenido en cuenta el papel de los árboles como sumideros de carbono, considerando una medida del carbono neto capturado por los árboles de una plantación en conjunción con otros aspectos, económicos y de

conservación del medio-ambiente, que son importantes de cara a la planificación del manejo de dicha plantación.

Además tendremos en cuenta la incorporación de restricciones espaciales que pretenden limitar el área contigua máxima a la que se aplica tala rasa. Tales restricciones permiten la preservación de la belleza visual, la biodiversidad, evitar las erosiones, etc. y se conocen en la literatura como adyacencias. Actualmente están resultando una práctica estándar en la gestión de áreas forestales públicas y privadas. En la actualidad, la mayor parte de los casos siguen dos modelos diferentes para tratar las adyacencias. En uno de estos modelos, conocido en la literatura como modelo URM, dos o más rodales vecinos no pueden ser talados simultáneamente. En el otro modelo, conocido por ARM, el área contigua de tala rasa no puede superar un cierto tamaño (maximum opening size). Es decir, dos rodales adyacentes podrían ser talados simultáneamente siempre que no superen un cierto área máxima (Murray (1999)). En el trabajo que aquí presentamos tratamos con el modelo ARM, que, como queda explícito en la literatura al efecto, se trata de un modelo más potente y complejo que el URM (Murray y Weintraub (2002), McDill et al. (2002), Goycoolea et al. (2005), Weintraub y Murray (2006)).

La aplicación que presentamos en este trabajo está situada en una plantación productora de madera cubana. Actualmente Cuba está haciendo grandes esfuerzos en reducir la presión que soportan sus bosques naturales, aumentando el número de plantaciones productivas con las que cubrir las necesidades de madera del país. Un aspecto a tener en cuenta de las plantaciones cubanas es que presentan una composición desequilibrada por grupos de edad. Por ello, además de los objetivos clásicos en la planificación forestal, en estas plantaciones se ha de añadir un objetivo que trate de equilibrar la distribución por edades al finalizar el horizonte temporal y así obtener un flujo constante de madera. Dicho objetivo se ha planteado en este trabajo siguiendo la formulación fraccional de Gómez et al. (2006) que modeliza el deseo de equilibrio en términos de la diferencia relativa entre los grupos de edad. Esto quiere decir que nuestro modelo no se corresponde con una formulación lineal, lo que hace aún más compleja su resolución. Si tenemos en cuenta además las dos características fundamentales de dicho modelo comentadas anteriormente, (un modelo multicriterio que trata con restricciones

espaciales de adyacencia bajo el enfoque ARM), nos encontramos ante un problema sumamente complejo el cual, para tratar su resolución, se hace necesario acudir a procedimientos metaheurísticos. Este tipo de métodos están siendo utilizados cada vez con más frecuencia en problemas de planificación forestal desde que las actuales formulaciones de métodos exactos no son lo suficientemente potentes como para resolver problemas como el que aquí se presenta (Pukkala y Heinonen (2006)). En la literatura han sido utilizados diferentes métodos tales como el temple simulado, tabu search, algoritmos genéticos, etc. para resolver problemas de planificación forestal (Borges et al. (2002), Falcao y Borges (2002), Caro et al. (2003), Liu et al. (2006), entre otros). El algoritmo metaheurístico empleado para la resolución de nuestro problema ha sido una adaptación del método evolutivo SSPMO (Scatter Search Procedure for Multiobjective Optimization, Molina et al. (2007)).

La plantación cubana a la que hemos hecho mención está formada por 3.347,7 ha. de *Pinus Caribaea* pertenecientes a la Empresa Forestal Integral (E.F.I) “Macurije” ubicada en la provincia de Pinar del Rio. Esta plantación pertenece a la unidad de manejo “Minadora”, representando un 30,5% de la superficie de ésta última. Así mismo, Minadora constituye un 12% de la superficie total de la empresa, y está distribuida en 35 lotes que varían en cuanto al tamaño. Todos los lotes están categorizados según lo establecido en la Ley Forestal del país, por lo que los mismos tienen como objetivo fundamental la producción de madera. Los lotes se componen de secciones más pequeñas llamadas rodales, que son de superficie variable pero de semejantes características de las masas. Los elementos que se toman en cuenta para diferenciar los rodales dentro del lote son, entre otros, la edad de los árboles, los diámetros medios, la altura media, el área basal, la densidad y composición del bosque. Según Bobko y Aldana (1981) los rodales forman la superficie elemental del manejo silvícola. Esto se traduce en que cada rodal representa una unidad casi homogénea en las cuestiones de comportamiento, tipología y mediciones dasométricas. La superficie objeto de estudio se compone de 305 rodales cuya función principal es la producción de madera de pequeñas dimensiones usada para la industria tabacalera del país.

La estructura del trabajo será como sigue. En la siguiente sección estableceremos el modelo propuesto en su forma teórica. En la sección 3 se pondrá de manifiesto la

técnica metaheurística empleada para la resolución del mismo. La sección 4 la dedicamos a la aplicación al caso cubano y la discusión de los resultados obtenidos. Concluiremos el trabajo con la sección de conclusiones y referencias bibliográficas.

2. EL MODELO

Partimos de un bosque F dividido en diferentes unidades (rodales) de acuerdo, por ejemplo, a características físicas: pendientes, altitud, accesibilidad, etc. Supondremos que hay R unidades homogéneas o rodales ($r = 1, 2, \dots, R$) de forma que

$$r \cup s = \emptyset, \quad \forall r, s = 1, \dots, R / r \neq s,$$

$$\bigcup_{r=1}^R r \subseteq F$$

Cada bloque viene caracterizado por una superficie (medida en ha), una edad (medida en años) y un índice de sitio que es un indicativo de la productividad. Así, para cada bloque r , podemos definir:

$S(r)$ = superficie del bloque r ($r = 1, 2, \dots, R$) medida en hectáreas.

$E(r, t)$ = edad del bloque r (expresada en años) en el momento “ t ” de la planificación. De forma que $E(r, 0)$ es la edad inicial o de partida del bloque r . Consideraremos que $E(r, t) = 1, 2, \dots, N$ y que existe la posibilidad de que el turno de rotación (edad idónea de tala rasa) sea $N^* < N$.

$IS(r)$ = índice de sitio del bloque r . Supondremos que $IS(r) = 1, 2, \dots, H$, es decir, que hay H índices de sitio diferentes en los que podemos clasificar los rodales del bosque, de acuerdo con su rendimiento.

Consideraremos un horizonte temporal de T años y, de acuerdo con el centro decisor, la planificación de la cosecha la vamos a realizar anualmente. Cabe resaltar que consideraremos que todo lo que se tala se vuelve a repoblar y, por tanto, la superficie de cada unidad o bloque se mantiene constante a lo largo de toda la planificación, al igual que el índice de sitio correspondiente.

Tal y como se ha comentado en la Introducción, el problema trata con restricciones espaciales de adyacencias, que se enmarcan dentro del modelo conocido por ARM, según el cual el área contigua de tala rasa no puede superar un cierto tamaño. Así pues, supondremos que las unidades están agrupadas en función de las adyacencias de forma que tenemos K grupos de adyacencias, C_1, C_2, \dots, C_K , donde cada C_i está compuesto por dos o más unidades contiguas. Estos grupos están calculados de manera que las unidades que están en el mismo grupo C_i son unidades contiguas cuya superficie unida supera el umbral permitido S^* denominado maximum opening size (Murray y Weintraub (2002)). Así pues las unidades pertenecientes a un mismo grupo de adyacencias no se pueden talar simultáneamente en el mismo periodo de la planificación. Además, puesto que este modelo trata con periodos anuales, se tratarán las adyacencias teniendo en cuenta los llamados *green-up requirements* que impiden que se talen rodales pertenecientes a un mismo conjunto de adyacencias hasta que hayan transcurrido un número g de años o periodos de planificación.

El objetivo es planificar el tratamiento que se ha de llevar a cabo en cada unidad o bloque a lo largo de los años que componen el horizonte temporal, de manera que se consigan ciertos niveles en determinados objetivos perseguidos por el planificador. Algunos objetivos son de naturaleza económica (relacionados con el valor monetario de la cosecha realizada) y otros son relativos a la sostenibilidad del bosque. Entre estos últimos se encuentra el conseguir un bosque regulado, es decir, tal que la superficie por grupos de edad al finalizar la planificación sea bastante similar para que ello permita un flujo de cosecha uniforme.

La variable de decisión del modelo va a indicar el tratamiento a aplicar a cada unidad (bloque), cada año y la denotaremos por x_{rjt} , de manera que:

$$x_{rjt} = \begin{cases} 1 & \text{si al bloque } r \text{ se le aplica tratamiento } j \text{ en el año } t \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

En principio consideraremos que $j = 1, 2, \dots, J$, siendo J el tratamiento de tala rasa, el cual supondremos en principio que se puede aplicar a rodales de cualquier edad, aunque más adelante incluiremos el hecho de que no se desean talar árboles jóvenes como una de las metas del modelo.

No obstante, hemos de tener en cuenta que el tipo de tratamiento a aplicar en cada instante, a cada bloque, depende de su edad, lo cual implica que el subíndice j depende de $E(r, t)$. Por ello definimos el conjunto:

$$A(E(r, t)) = \{j / j \text{ es el tratamiento correspondiente a la edad } E(r, t)\}$$

Además, la edad de cada bloque varía a lo largo de la planificación de año en año. De manera que, o bien se incrementa en uno la edad del año anterior, o bien, si el bloque ha sido talado, éste pasa a tener edad 1. Es decir:

$$E(r, t) = (E(r, t-1) + 1)(1 - x_{rjt}) + x_{rjt} \quad (1)$$

Por otra parte, los tratamientos a aplicar a cada rodal en cada periodo se encuentran limitados por una serie de restricciones de diversa índole que pasamos a comentar.

1) Un bloque ya talado no se puede volver a talar hasta que hayan transcurridos η años:

$$\sum_{s=t}^{t+\eta} x_{rjs} \leq 1 \quad r = 1, 2, \dots, R; \quad t = 1, 2, \dots, T - \eta \quad (2)$$

2) No se pueden talar simultáneamente rodales de un mismo conjunto de adyacencias hasta que hayan pasado g años (donde g es constante):

$$\sum_{r \in C_k} \sum_{s=t}^{t+g-1} x_{rjs} \leq |C_k| - 1 \quad k = 1, 2, \dots, K; \quad t = 1, 2, \dots, T - g \quad (3)$$

3) Restricciones técnicas relativas a los tratamientos:

$$x_{rjt} = 0 \text{ si } j \notin A(E(r, t)) \quad (4)$$

Además de las restricciones técnicas y de sostenibilidad expuestas, de acuerdo con el centro decisor, se van a añadir las siguientes restricciones. Éstas tratan de controlar en cierta medida cotas mínimas para el total del área talada en cada periodo (y así

garantizar la regeneración de los rodales) y para el net present value (NPV) obtenido anualmente.

4) Cota inferior para la superficie a la que se aplica tala rasa:

$$\sum_{r=1}^R S(r) x_{r,t} \geq \tau Se^t \quad t = 1, 2, \dots, T \quad 0 \leq \tau \leq 1 \quad (5)$$

donde Se^t es la superficie a regenerar de equilibrio (the forest area that would ensure the replacement of the forest) y τ es un porcentaje de dicha superficie.

5) Cota inferior para el valor actual neto:

$$\sum_{r=1}^R \sum_{j \in A(E(r,t))} VAN_{rjt} x_{rjt} \geq \mu VAN^t \quad t = 1, 2, \dots, T \quad 0 \leq \mu \leq 1 \quad (6)$$

donde VAN_{rjt} representa el valor actual neto obtenido al aplicar al bloque r el tratamiento j en el año t , VAN^t el nivel deseado por el decisor en el año t y μ un porcentaje de dicho valor.

El conjunto de estas restricciones conforman los tratamientos factibles. Dentro del contexto en el que nos encontramos, una plantación con fines productivos dividida en rodales, y cuya situación inicial se encuentra muy descompensada por grupos de edad, las metas que establecemos a continuación formalizan los principales deseos del centro decisor. Estos deseos lo hemos modelizado como metas, puesto que el decisor no pretendía maximizar o minimizar unos objetivos, sino más bien que éstos alcanzaran ciertos valores que le resultarían satisfactorios. Por otra parte, las preferencias relativas a la satisfacción de las metas han sido modelizadas utilizando el enfoque lexicográfico, de acuerdo con su prioridad mediante los siguientes niveles:

Primer nivel de prioridad: El área al que se le aplica tala rasa en cada periodo no debe sobrepasar la superficie total de equilibrio. Esta superficie representa el área que asegura la renovación de la masa forestal. Por tanto, la meta que formaliza este deseo es la siguiente:

$$\sum_{r=1}^R S(r)x_{r,t} + n_1^t - p_1^t = Se^t \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (7)$$

En cada una de estas T metas las variables de desviación no deseadas son las positivas (p_1^t , $t = 1, 2, \dots, T$) y la función de logro, que se desea minimizar, relativa a este nivel, dado que todos los periodos son considerados con la misma importancia, es

$$f^1(n_1^1, p_1^1, n_1^2, p_1^2, \dots, n_1^T, p_1^T) = \sum_{t=1}^T p_1^t.$$

Segundo nivel de prioridad: Se trata de mantener los niveles de extracción en el límite del volumen que se puede extraer sin riesgos de degradación, tratando de que no se sobrepase. Así, si v_{hij}^p representa el volumen por hectárea aprovechada en cada índice de sitio, edad, tratamiento y periodo, y V^p la posibilidad volumen cosechable en dicho periodo, la siguiente meta ocupa el segundo nivel de prioridad:

$$\sum_{r=1}^R \sum_{j \in A(E(r,t))} v_{rjt} x_{rjt} + n_2^t - p_2^t = V^t \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (8)$$

donde, de nuevo, la variable no deseada es la positiva: p_2^t , $t = 1, 2, \dots, T$. En este nivel, la correspondiente función de logro, que se desea minimizar, es

$$f^2(n_2^1, p_2^1, n_2^2, p_2^2, \dots, n_2^T, p_2^T) = \sum_{t=1}^T p_2^t.$$

Tercer nivel de prioridad: Puesto que no es deseable talar árboles jóvenes, en este caso se pretende no tener que sacrificar árboles de edades menor que n^* :

$$x_{r,t} + n_3^t - p_3^t = 0 \quad \forall r / E(r,t) < n^* \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (9)$$

De nuevo la variable no deseada: p_3^t , $t = 1, 2, \dots, T$. Y la correspondiente función de logro, $f^3(n_3^1, p_3^1, n_3^2, p_3^2, \dots, n_3^T, p_3^T) = \sum_{t=1}^T p_3^t$.

Cuarto nivel de prioridad: Como se ha venido diciendo desde la introducción, uno de los objetivos del centro decisor es el alcanzar una estructura lo más equilibrada

posible por edades al finalizar la planificación. Para ello, haremos uso de la propuesta fraccional de Gómez et al. (2006) donde se modeliza este deseo mediante un cociente que muestra la diferencia relativa entre el número de hectáreas de árboles en un primer grupo de edad y en un último grupo de edad. Para adaptar dicha modelización al caso que nos concierne, siendo la planificación anual, vamos a considerar como primer grupo de edad a los rodales con edades comprendidas entre l y m años y como último grupo de edad a los rodales con edad mayor que $N^* - m$ años, donde m es una constante divisora de N^* que se fijará de acuerdo con el decisor.

Denotemos por S_i^t a la superficie total disponible de edad i años en el momento t , la cual se obtiene como:

$$S_i^t = \sum_{r/E(r,t)=i} S(r)$$

En base a ello, la meta fraccional para regular el bosque sería:

$$\frac{S_1^t + S_2^t + \dots + S_m^t}{S_{N^*-m+1}^t + \dots + S_{N^*}^t + \dots + S_N^t} \geq \frac{t}{T} \quad t = 1, 2, \dots, T$$

Los niveles de aspiración de estas metas se van acercando a l año a año de forma lineal, de manera que en el último año de la planificación esta meta exige que haya el mismo número de hectáreas de árboles del primer grupo de edad y árboles del último grupo de edad.

Incorporando variables de desviación positiva y negativa, obtendríamos:

$$\frac{S_1^t + S_2^t + \dots + S_m^t}{S_{N^*-m+1}^t + \dots + S_{N^*}^t + \dots + S_N^t} + n_4^t - p_4^t = \frac{t}{T} \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (10)$$

cuya variable no deseada: n_4^t , $t = 1, 2, \dots, T$. La función de logro que se desea

minimizar, es en este caso $f^4(n_4^1, p_4^1, n_4^2, p_4^2, \dots, n_4^T, p_4^T) = \sum_{t=1}^T n_4^t$.

Quinto nivel de prioridad: Uno de los deseos del decisor es que al finalizar la planificación no existan rodales de edades superiores al turno de rotación. Este deseo lo hemos formalizado de manera progresiva a lo largo del horizonte temporal. Cada año se pretende talar, al menos, un porcentaje del número de hectáreas de árboles con edad superior a N^* existente en el año anterior. Además, dicho porcentaje crece con respecto al tiempo. Por todo ello, la meta de este nivel es la siguiente:

$$\sum_{r/E(r,t) > N^*} (S(r)(1 - x_{r,t})) + n_5^t - p_5^t = \alpha \left(1 - \frac{t}{T}\right) \left(\sum_{r/E(r,t-1) > N^*} S(r) \right) \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (11)$$

donde α ($0 \leq \alpha \leq 1$) es un coeficiente que permite incidir en la rapidez de crecimiento del porcentaje de árboles viejos talados cada año. En el caso extremo de que se fijara $\alpha = 0$, las metas situadas en este nivel conllevarían a la tala de todos los árboles con edad superior a N^* , desde el primer año de la planificación. Por último, la variable no deseada en este caso vuelve a ser la positiva: p_5^t , $t = 1, 2, \dots, T$. De nuevo, la función de

logro, $f^5(n_5^1, p_5^1, n_5^2, p_5^2, \dots, n_5^T, p_5^T) = \sum_{t=1}^T p_5^t$.

Sexto nivel de prioridad: Se corresponde con las metas relativas al objetivo económico. Reflejan que el valor actual neto obtenido anualmente sea mayor que un cierto umbral establecido por el decisor:

$$\sum_{r=1}^R \sum_{j \in A(E(r,t))} VAN_{rjt} x_{rjt} + n_6^t - p_6^t = VAN^t \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (12)$$

En este caso, la variable no deseada: n_6^t , $t = 1, 2, \dots, T$ y

$$f^6(n_6^1, p_6^1, n_6^2, p_6^2, \dots, n_6^T, p_6^T) = \sum_{t=1}^T n_6^t$$

Séptimo nivel de prioridad: Por último, se desea que la cantidad de carbono neto fijada por los árboles de la plantación sobrepase un umbral considerado deseable por el decisor. Así, el primer sumando de esta meta representa el carbono fijado en la plantación dados los metros cúbicos existentes en ella a lo largo de la planificación,

mientras que el segundo sumando indica el carbono neto que se ha fijado desde el primer periodo (lo absorbido menos lo que se desprende) como consecuencia de los distintos tratamientos llevados a cabo (incluyendo la tala rasa):

$$\sum_{t=1}^T \left(\sum_{i=1}^I \gamma (v_{rJt} - v_{rJ(t-1)}) + \gamma \sum_{r=1}^R \sum_{j=1}^J x_{rjt} v_{rjt} (1 - \beta_{rjt}) \right) + n_7 - p_7 = C \quad (13)$$

donde γ es la tasa de conversión del dióxido de carbono atmosférico en biomasa (ton. de carbono/m³ de madera), la cual depende de la especie considerada. Por otra parte, β_{rjt} es el porcentaje del dióxido de carbono fijado en la biomasa que se desprende a la atmósfera en el momento de la tala rasa.

Este nivel de prioridad comprende una única meta, a diferencia de los anteriores. En este caso, la variable de desviación no deseada es la negativa (n_7) y la función de logro de este nivel: $f^7(p_7, n_7) = n_7$.

De esta forma, el problema a resolver resulta el siguiente:

$$\begin{aligned} \text{Min } f &= (f^1, \dots, f^7) \\ \text{sujeto a: } & \text{Restricciones (1)-(6)} \\ & \text{Metas (7)-(13)} \\ & x_{rjt} \in \{0,1\} \quad r = 1, \dots, R; j = 1, \dots, J; t = 1, \dots, T \\ & n_i^t, p_i^t, n_7, p_7 \geq 0 \quad i = 1, \dots, 6; t = 1, \dots, T \end{aligned} \quad (14)$$

3. RESOLUCIÓN TÉCNICA

El problema resultante a resolver constituye un problema de Programación Binaria No-Lineal Multiobjetivo, cuya complejidad condiciona sumamente su resolución. Así, un método exacto en este caso resulta inviable, en primer lugar por el carácter no-lineal binario del problema y en segundo por la dimensión del mismo, donde el número de variables asciende a tantas como número de rodales por número de períodos de planificación y por número de tratamientos. Por estas razones, tal y como se señala en la

introducción, hemos acudido a los métodos metaheurísticos que se han mostrado sumamente eficientes para la resolución de este tipo de problemas en la literatura.

Así, la Programación Multiobjetivo (PMO) es una de las áreas de investigación en la cual los algoritmos metaheurísticos están alcanzando mayor popularidad, puesto que la mayor parte de las técnicas exactas para la resolución de este tipo de problemas están diseñadas para problemas lineales y su aplicación a problemas con algún tipo de dificultad (como es el carácter no-lineal de alguna de las funciones o restricciones, o el carácter entero o binario de las variables) puede hacer la resolución muy costosa o incluso inviable. Sin embargo, este tipo de dificultades son habituales cuando uno se enfrenta a un problema real de PMO, tal y como sucede en nuestro caso. Ello ha producido un gran avance en la aplicación de técnicas metaheurísticas para la resolución de este tipo de problemas en los últimos años, tal y como se puede observar en Jones et al. (2002) o en Ehrgott y Gandibleux (2004).

Los métodos evolutivos son los más aplicados a este tipo de problemas y dominan la investigación en el campo de metaheurísticos para la PMO, tal y como puede observarse por ejemplo en Coello et al. (2007). Así, el objetivo de este epígrafe será adaptar el método evolutivo SSPMO (*Scatter Search Procedure for Multiobjective Optimization*, Molina et al. (2007)) basado en Scatter Search (SS) (Glover et al. (2000)) para la resolución de nuestro problema de planificación forestal. Este método ha demostrado una capacidad de resolución muy competitiva sobre un amplio conjunto de problemas test.

Por tanto, se ha realizado una adaptación para el problema de gestión forestal del método evolutivo SSPMO, el cual está compuesto por dos fases:

Fase I: Generación de un conjunto inicial de puntos eficientes mediante una serie de búsquedas tabú.

Fase II: Mejora de este conjunto inicial mediante un proceso de Scatter Search.

La Fase I tiene como objeto construir un conjunto inicial de puntos eficientes. Para ello se realizarán una serie de búsquedas tabú enlazadas (es decir, búsquedas en las que

el punto inicial de cada una de ellas será el último punto visitado por la anterior búsqueda). En cada iteración de cada una de las búsquedas tabú que se realizan se comprueba si el punto actual está dominado (según el orden de Pareto) por alguno de los elementos de su vecindario. En caso contrario, el punto se declara posiblemente eficiente y se envía al conjunto de puntos eficientes para comprobar si realmente lo es y para actualizar debidamente, en caso de que sea necesario, la lista de puntos eficientes.

Mediante este proceso de actualización continua de los puntos eficientes, lo que se pretende es obtener una lista de todos los posibles puntos eficientes que han sido visitados mediante cada una de las búsquedas tabú, las cuales nos han de llevar por distintas zonas del conjunto eficiente. Así, enlazando las distintas búsquedas tabú se pretende realizar una exploración del Conjunto Eficiente mucho más provechosa puesto que cada punto visitado puede formar parte de la aproximación final obtenida.

Para cada una de estas búsquedas, en el caso particular que nos concierne, se utiliza un sistema de vecindarios basado en la perturbación del tratamiento de un determinado bloque en un determinado año de la planificación, ambos elegidos aleatoriamente. Es decir, para cada solución, el vecindario construido contiene soluciones que difieren de ésta en el tratamiento a aplicar a un bloque concreto en un año determinado.

La segunda fase se basa en la utilización del Conjunto de Referencia (CR), que es el núcleo de un método de SS. En el esquema para la optimización mono-objetivo, en este conjunto hemos de encontrar soluciones de alta calidad y soluciones que aporten diversidad, donde la diversidad se mide en este caso en el espacio de variables. Para la PMO se modifica el papel de este conjunto para adaptarse a la diferente situación que se ha de resolver. En particular, la calidad de una solución se mide ahora en relación a p objetivos y la diversidad se mide en el espacio de objetivos.

En nuestro caso particular, cada posible pareja de soluciones en el CR (llamadas *padre* y *madre*) se utiliza para generar 4 nuevas soluciones. Cada nueva solución generada (llamada *hijo*) obtiene la información completa para cada bloque (los tratamientos que se realizan a dicho bloque a lo largo de todo el horizonte temporal) aleatoriamente de cada uno de los padres. Es decir, una vez seleccionados un par de soluciones del CR (el *padre* y la *madre*), para cada bloque r de cada solución hijo se

lanza un número aleatorio y si resulta menor o igual que 0.5 el hijo es tal que los tratamientos a aplicar al bloque r durante todo el horizonte temporal coinciden con los de la solución *padre*, y en caso contrario con los de la *madre*.

La ejecución de SSPMO depende del valor de tres parámetros: *InitPhase*, b y *MeanDist*. El parámetro *InitPhase* controla la terminación de la fase inicial del procedimiento, mientras que b indica el cardinal de CR. Hemos asumido un valor de *InitPhase* = 3 y $b = 2 \cdot 7$, tal y como se sugiere en el trabajo de Molina et al. (2007). *MeanDist* controla la finalización de la fase de búsqueda, y ha de tomar un valor entre 0 y 1. Cuanto más próximo a cero sea este valor, tanto más larga será dicha fase de búsqueda. Como en nuestro caso no era crucial una rápida resolución computacional, hemos fijado este parámetro igual a 0,05.

4. APLICACIÓN DEL MODELO Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Como hemos comentado en la introducción, el modelo teórico lo hemos aplicado a un plantación de 3.347,7 ha. de *Pinus Caribaea* dedicada, principalmente, a la producción de madera.

Dicha plantación se divide en 305 rodales distribuidos en 4 áreas de sitio ($H = 4$) y con edades comprendidas entre los 3 y los 41 años de edad, estableciéndose la edad de rotación de la plantación en $N^* = 30$ años que coincide con el horizonte de planificación ($T = 30$ años). En esta plantación se considera un umbral de tala rasa máxima de $S^* = 20$ has., quedando de esta forma un total de 103 conjuntos de adyacencias. Respecto a los tratamientos, además de poder aplicar tala rasa (tratamiento 4) en todos los rodales, los tratamientos a aplicar por edades de los rodales son los siguientes: raleo 1 ($j = 1$) en árboles comprendidos entre la edad 11 y 15, raleo 2 ($j = 2$) en árboles comprendidos entre 16 y 25 años y raleo 3 ($j = 3$) en árboles de edad mayor que 26. Así, en total contamos en esta aplicación con un total de 36.600 variables binarias de decisión, cada una de las cuales nos indica si al rodal r ($r = 1, \dots, 305$) se le aplica o no el tratamiento j ($j = 1, \dots, 4$) en el año t ($t = 1, \dots, 30$).

Por otro lado, se han establecido los valores de los parámetros η , g , τ y μ de acuerdo con el decisor de la siguiente manera:

El número de años que un rodal ya talado no puede volver a ser talado durante la planificación es $\eta = 20$ años. Por otro lado, si bien el modelo en su forma general contempla requerimientos de *green-up*, en esta aplicación, de acuerdo con el decisor, se ha establecido un valor de $g = 1$, que significa no tener en cuenta dicho requerimiento.

Con el propósito de garantizar la renovación de la masa arbórea, se ha establecido el valor del parámetro $\tau = 0,75$ que asegura que se va a aplicar el tratamiento de tala rasa ($j = 4$), como mínimo, al 75% de la superficie a regenerar de equilibrio. De una forma muy similar, se ha establecido el valor de $\mu = 0,50$.

Respecto a los niveles de aspiración de las metas se han considerado los siguientes:

Para el primer nivel de prioridad, de acuerdo a la normativa cubana, el nivel que representa la superficie a regenerar de equilibrio viene dado por la superficie total en dicho índice de sitio multiplicada por el recíproco de la edad de turno (30 años), es decir:

$$Se^t = Se^0 = \frac{1}{30} 3.347,7 = 111,6 \text{ ha.}$$

Respecto al segundo nivel de prioridad, la posibilidad volumen cosechable se ha considerado cada año igual a 34.869 m^3 y representa el volumen de madera que se puede extraer como máximo sin riesgos de degradación por año.

En el tercer nivel de prioridad se ha considerado un valor de $n^* = 20$, que significa que no se desean talar árboles de edades menores que 20 años. Respecto al cuarto nivel de prioridad, se fijó un valor de $m = 5$, que indica que los grupos de edad comprenden árboles cuya edad dista entre sí menos de 5 años. En el quinto nivel de prioridad, se tomó $\alpha = 1$. Para el sexto nivel de prioridad se estableció, de acuerdo con el decisor, el nivel mínimo deseado del VAN en 124.000 pesos^2 cada año. Por último, el nivel global de carbono neto que se desea superar en la planificación asciende a $C = 319.408 \text{ tons}$.

² 25 pesos cubanos \cong 1 \$.

La configuración inicial de la unidad forestal, expresada en hectáreas totales por índice y sitio y por edad (Tabla 1), es la siguiente:

Area (ha)	Índice de Sitio				
	1	2	3	4	Total
Edad					
0-5	9,1	0	0	54,2	63,3
6-10	55,7	54,8	72,2	0	182,7
11-15	4,6	21,4	0	0	26
16-20	0	30,6	12,0	0	42,6
21-25	14,4	412,9	142	12,2	581,5
> 25	93,9	1495,6	676,5	185,6	2451,6
Total	177,7	2015,3	902,7	252,0	3347,7

Tabla 1. Situación inicial de la plantación por edades y por índices de sitio.

Como se puede observar, la suma por filas corresponde a las hectáreas disponibles en cada grupo de edad en la situación inicial, y la suma por columnas la disponibilidad en cada índice de sitio, la cual no variará a lo largo de toda la planificación. Resulta bastante claro notar que esta composición inicial por edades es bastante irregular, como queda de manifiesto en el gráfico 1.

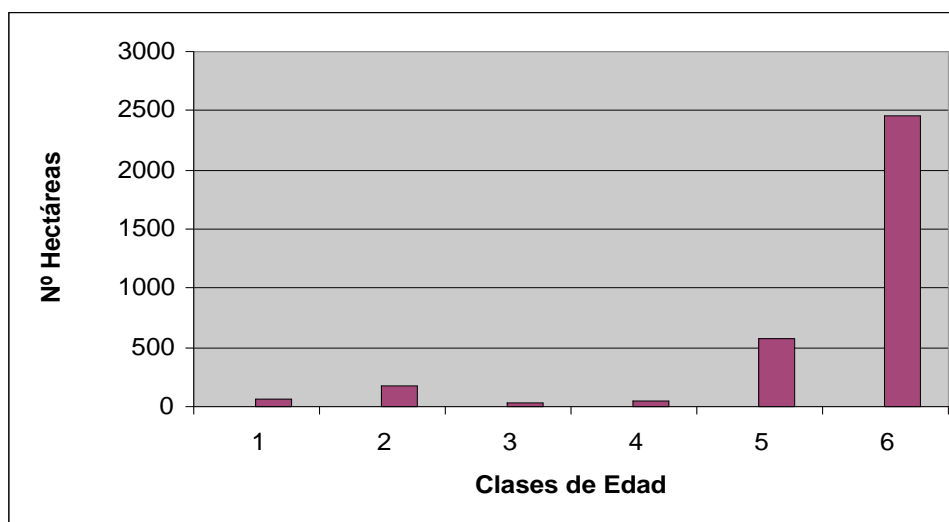


Gráfico 1. Situación inicial por edades de la plantación.

Se observa que estamos ante una plantación muy vieja, en la que el número de hectáreas correspondientes a rodales con edades inferior a 26 años corresponde sólo a un 26,77 % de la superficie total de la plantación, y la relación entre rodales de edades inferior a 5 años y rodales de edad superior a 26 es de un 2,58%.

Como se ha especificado en el epígrafe 3 del trabajo, la resolución del problema se ha realizado mediante una adaptación para este problema de gestión forestal del método metaheurístico evolutivo SSPMO. El problema resultante es un problema de programación por metas no lineal con variable binaria que consta de 36.600 variables, 181 metas clasificadas en 7 niveles de prioridad y del orden de 20.000 restricciones. Se ha resuelto en un procesador Pentium IV a 3,2 GHz y el tiempo de resolución ha ascendido a 233.843 segundos. Al resolver, se obtiene una planificación de los tratamientos a aplicar durante 30 años a esta plantación de manera que se verifiquen todas las restricciones espaciales y técnicas y al finalizar el horizonte temporal nos acerquemos lo más posible a los deseos del decisor. Es un modelo lexicográfico y, por tanto, los niveles inferiores de prioridad son los primeros que se tratan de satisfacer. La solución obtenida en este caso satisface los tres primeros niveles de prioridad, que se corresponden con requerimientos de sostenibilidad. Esto es, se alcanzan los valores $f^1 = 0$, $f^2 = 0$ y $f^3 = 0$.

Sin embargo, debido a la desequilibrada situación inicial, y a la gran cantidad de restricciones técnicas que se contemplan en esta aplicación del modelo, las metas situadas en niveles de prioridad posteriores al tercero no se logran satisfacer. Esto tiene sentido en este problema por el gran desequilibrio inicial del que se parte y, además, tanto las restricciones técnicas como los tres primeros niveles de prioridad tratan de limitar la tala rasa. Concretamente, los valores alcanzados por el resto de funciones de logro son los siguientes: $f^4 = 2,35$, $f^5 = 14.318$ has., $f^6 = 663.748$ pesos y finalmente $f^7 = 60.291$ tons.

Con todo ello, sin embargo, la situación final ha mejorado bastante con respecto a la situación inicial, véase la siguiente tabla (Tabla 2):

Area (ha)	Indice de Sitio				
	1	2	3	4	Total
Edad					
0-5	75,5	259,3	175,3	44,4	554,5
6-10	9,1	341,7	150,6	45	546,4
11-15	29	228,8	195,6	82,8	536,2
16-20	2,1	370,4	152,3	26	550,8
21-25	11,6	382,9	103,4	2,6	500,5
> 25	50,4	432,2	125,5	51,2	659,3
Total	177,7	2015,3	902,7	252	3347,7

Tabla 2. Situación final de la plantación por edades y por índices de sitio.

Como se observa, no se ha llegado al equilibrio final deseado, pero se ha mejorado bastante la composición por edades (véase gráfico 2), gracias a la incorporación en el modelo de las metas fraccionales situadas en el cuarto nivel de prioridad, que, aunque no se satisfacen y por eso el equilibrio final exacto no se alcanza, sí hacen que la solución intente equilibrar la composición final por edades de la plantación. En la situación final, el número de hectáreas correspondientes a rodales con edades inferior a 26 años corresponde a un 80,3 % de la superficie total de la plantación, frente al 26,77 % de la situación de partida. En este caso, la relación entre edades inferiores a 5 años y superiores a 26 mejora sustancialmente, puesto que ha pasado del 2,58% al 84,1%.

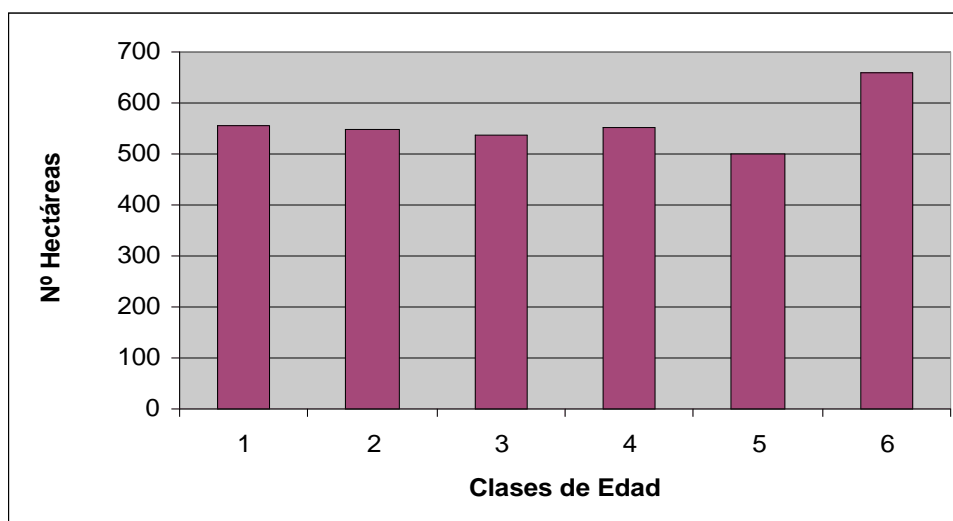


Gráfico 2. Situación final por edades de la plantación.

Por otro lado, en esta solución final, el número de árboles con edad superior a 30 años al finalizar la planificación es de 209 has., frente a las 2.225 has. iniciales (representa un 6,24% frente al 66,5% inicial). En el gráfico 3 se observa la evolución anual del número de hectáreas de estos árboles a lo largo de la planificación.

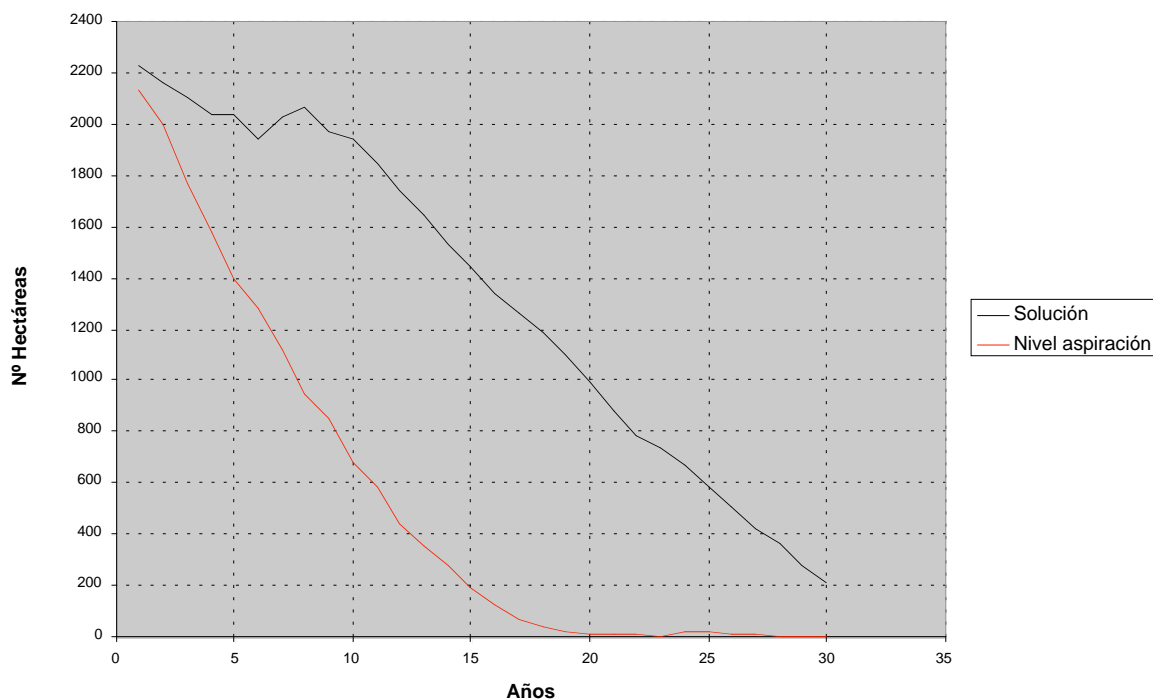


Gráfico 3. Evolución anual del número de hectáreas de árboles mayores que N^* a lo largo de la planificación.

Por último, respecto al nivel de prioridad relativo al objetivo económico de la plantación, se logra alcanzar, en general, al menos un 66 % del nivel deseado de VAN anual, y en cuanto a la meta de captura de carbono, el nivel que alcanza la solución es de 259.117 toneladas que representa un 81,12% del nivel deseado.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha planteado un modelo de planificación forestal que contempla distintas restricciones y objetivos. Hasta donde alcanza nuestro conocimiento, es la primera vez que se ha planteado un modelo de metas lexicográficas que permite determinar el tratamiento a aplicar a cada bloque de una plantación anualmente, sin deterioro del ecosistema, tratando de alcanzar el equilibrio por edades al finalizar la

planificación y sin olvidar el objetivo económico, todo ello teniendo en cuenta restricciones de adyacencias que no permiten talar de forma contigua en un mismo periodo de la planificación más de un número concreto de hectáreas y contando con un objetivo de captura de carbono.

El modelo planteado resulta ser de una gran complejidad debido a sus características fundamentales: es un modelo de programación multiobjetivo, de variable binaria y no lineal. Por todo ello, se plantea el uso de un método metaheurístico para proceder a su resolución. El método elegido ha sido una adaptación a este modelo concreto del método evolutivo SSPMO que ya ha sido contrastado en la resolución de problemas multiobjetivo con una capacidad de resolución muy competitiva. Un epígrafe de este trabajo ha sido dedicado a la exposición del método empleado y de su adaptación a este problema en concreto.

Así pues, el modelo diseñado permite determinar los rodales que deben ser sometidos a los diferentes tratamientos, indicando el volumen de madera a extraer en cada periodo de la planificación, conocer el Valor Actualizado Neto que genera dicha planificación así como la captura total de carbono que se alcanzará mediante la misma, y además disminuir los sacrificios de cortabilidad en el proceso de ordenación de la plantación. Todo ello tratando, con el uso de metas fraccionales, de encontrar un equilibrio por edades al finalizar la planificación, lo que permitirá extraer un flujo constante de madera al llegar a la edad de turno. Este modelo además, es aplicable a plantaciones puras de otras especies, con objetivos de producción de madera.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BATEMAN I. J., LOVETT A.A. (2000) Estimating and valuing the carbon sequestered in softwood and hardwood trees, timber products and forest soils in Wales. *Journal of Environmental Management*. 60: 301-323.
- BOBKO, A. ALDANA, E. (1981) Ordenación de Montes. Centro Universitario de Pinar del Río. Cuba.
- BORGES, J.G., HOGANSON, H.M., FALCÃO, A.O. (2002) Heuristics in multi-objective forest planning. In: Pukkala, T. (ed) *Multi-objective forest planning*, Kluwer Academic Publishers, Boston.

- BUONGIORNO, J. , GILLESS, J.K. (2003) Decision Methods for forest resource management, Academic Press, Boston.
- CARO, F., CONSTANTINO, M., MARTINS, I., WEINTRAUB, A. (2003) A 2-opt tabu search procedure for the multiperiod forest harvesting problem with adjacency, green-up, old growth, and even flow constraints. *Forest Sci.* 49: 738-751.
- COELLO, C., VAN VELDHUIZEN, D. A., LAMONT, G. B. (2007) Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems, Second Edition, Kluwer Academic Publishers, Boston.
- DIAZ-BALTEIRO, L., ROMERO, C. (2007) Multiple criteria decision-making in forest planning: recent results and current challenges. In: Weintraub, A., Romero, C., Bjørndal, T., Epstein, R. (eds.) Handbook of Operations Research in Natural Resources. Series: International Series in Operations Research & Management Science, 99. Springer, New York.
- ERHGOTT, M., GANDIBLEUX, X. (2004) Approximate solution methods for multiobjective combinatorial optimization. *Top* 12, 1: 1-88.
- FALCÃO, A., BORGES, J. (2002) Combining random and systematic search heuristic procedures for solving spatially constrained forest management scheduling models. *Forest Sci.* 48: 608-621.
- FIELD, D. B. (1973) Goal programming for forest management. *Forest Sci.* 19: 125-135.
- GLOVER, F., LAGUNA, M., MARTÍ, R. (2000) Fundamentals of Scatter Search and Path Relinking. *Control and Cybernetics.* 39, 3: 653-684.
- GÓMEZ, T., HERNÁNDEZ, M., LEÓN, M.A., CABALLERO, R. (2006) A forest planning problem solved via a linear fractional goal programming model. *Forest Ecol Manage.* 227: 79-88.
- GOYCOOLEA, M., MURRAY, A.T., BARAHONA, F., EPSTEIN, R., WEINTRAUB, A. (2005) Harvest scheduling subject to maximum area restrictions: exploring exact approaches. *Oper Res.* 53: 490-500.
- JONES, D. F., S. K. MIRRAZAVI, M. TAMIZ (2002) Multiobjective metaheuristics: an overview of the current state of the art, *European Journal of Operational Research.* 137: 1-9.
- LIU, G., HAN, S., ZHAO, X., NELSON, J.D., WANG, H., WANG, W. (2006) Optimisation algorithms for spatially constrained forest planning. *Ecol Model.* 194: 421-428.

- MCDILL, M.E., REBAIN, S.A., BRAZE, J. (2002) Harvest scheduling with area-based adjacency constraints. *Forest Sci.* 48: 631-642.
- MENDOZA, G.A., MARTINS, H. (2006) Multi-criteria decision analysis in natural resource management: a critical review of methods and new modelling paradigms. *Forest Ecol Manage.* 230: 1-22.
- MOLINA, J., LAGUNA, M., MARTI, R., CABALLERO, R. (2007) SSPMO: A scatter tabu search procedure for non-linear multiobjective optimization. *JOC.* 19, 1: 91-100.
- MURRAY, A.T., WEINTRAUB, A. (2002) Scale and unit specification influences in harvest scheduling with maximum area restrictions. *Forest Sci.* 48: 779-789.
- MURRAY, A.T. (1999) Spatial restrictions in harvest scheduling. *Forest Sci.* 45:1-8
- PLANTINGA A. J., Mauldin, T., Miller, J. (1999) An econometric analysis of the costs of sequestering carbon in forests. *American Agricultural Economics Association.* 81: 812-824.
- PUKKALA, T. (2002) *Multi-objective forest planning.* Kluwer Academic Publishers, Boston.
- PUKKALA, T., HEINONEN, T. (2006) Optimizing heuristic search in forest planning. *Nonlinear Anal.* 7: 1284-1297.
- WEINTRAUB, A., ROMERO, C., BJØRNDAL, T., EPSTEIN, R. (2007) (Eds.) *Handbook of Operations Research in Natural Resources.* Series: International Series in Operations Research & Management Science, 99. Springer, New York.
- WEINTRAUB, A., MURRAY, A.T. (2006) Review of combinatorial problems induced by spatial forest harvesting planning. *Discret Appl Math.* 154: 867-879.

