

Modelización de problemas de ordenación forestal con múltiples criterios. Una aplicación a la economía forestal cubana.

León Sánchez, M^a Amparo *

Molina Luque, Julián **

maleon@tele.upr.edu.cu

julian.molina@uma.es

* Departamento de Matemática. Universidad de Pinar del Río (Cuba)

** Departamento de Economía Aplicada (Matemáticas) Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales. Universidad de Málaga.

Palabras Clave: *Programación por Metas, Ordenación forestal, impacto ambiental.*

Area Temática: 3- Economía Agraria y Recursos Naturales.

RESUMEN

El presente trabajo presenta un modelo de Programación por Metas Lexicográficas para la ordenación de plantaciones puras con el objetivo de lograr el equilibrio de clases de edades al finalizar el período de planificación forestal. Los criterios considerados fueron: Control de área de tala por índice de sitio según lo normado, igualdad de volumen aprovechado en cada período de planificación, igualdad de áreas por grupos de edades al finalizar el período de planificación y estabilización del Valor Actual Neto en el horizonte de planificación. La ordenación lexicográfica se hizo basada en criterios de expertos en materia de Ordenación Forestal. El modelo fue resuelto aplicando el sistema PROMO (PROgramación MultiObjetivo, Caballero y otros (2000)) que es una implementación de Programación Multiobjetivo y Programación por Metas sobre entorno Windows, con información suministrada por una empresa forestal cubana y la solución además de satisfacer las exigencias de los decisores logra un inventario final que eleva en un 11.7 % la posibilidad volumen de aprovechamiento y en 20.7 % el Valor Actual Neto.

1. Introducción

Las particularidades del medio forestal y la extensión de las rotaciones de los árboles, proporcionan a las acciones forestales características muy especiales. En la actualidad, la Ordenación va encaminada no solo a la producción de madera y otros bienes directos sino al uso múltiple del bosque, es decir que sin disminuir su capacidad total de proveedor de bienes y servicios, debe mantener sus funciones en cuanto a la preservación de los recursos genéticos, la diversidad biológica y a la protección del medio ambiente.

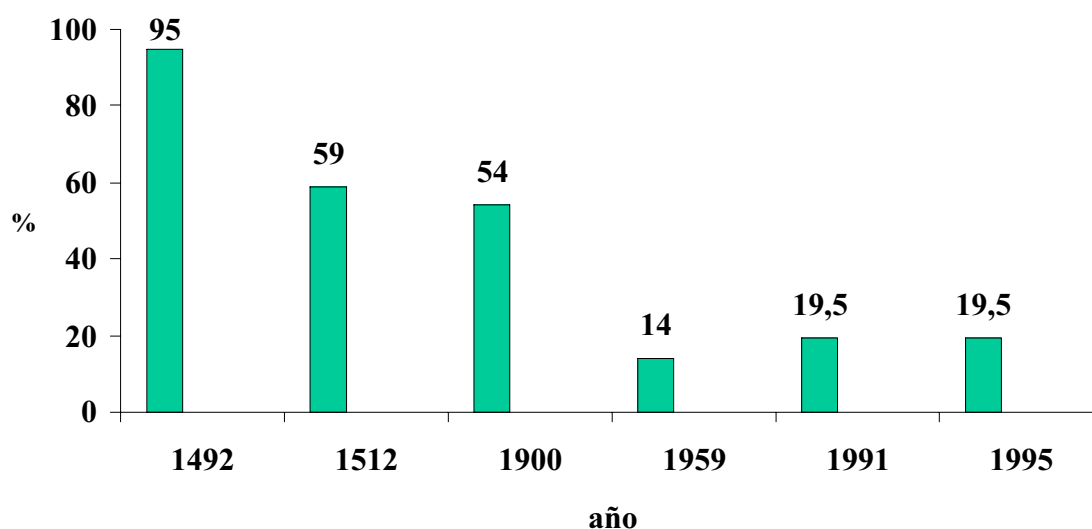
En lo referente a los sistemas forestales, sostenibilidad implica utilizar al máximo el potencial total del bosque en formas que sean silvícola, ecológica y sociológicamente deseables, logrando en el plazo más corto posible, una estabilidad máxima en la producción de bienes y servicios que se alcanza cuando **la distribución por clases de edades de las masas, está en equilibrio.**

En este trabajo se planifica el aprovechamiento de una plantación pura de *Pinus caribaea* en la provincia de Pinar del Río (Cuba) con la finalidad de lograr al finalizar el período de un turno (25 años), una estructura de áreas por edades en equilibrio. Para ello se utilizó un modelo de Programación por metas lexicográficas que incluye restricciones de edad, áreas, tratamientos silvícola y metas de superficie a regenerar, volumen máximo de aprovechamiento y Valor Actual Neto. Para encontrar la solución al modelo se utilizó el programa PROMO, PROgramación MultiObjetivo, (Caballero y otros, 2001) que es una implementación de Programación Multiobjetivo y Programación por Metas sobre entorno Windows, con un formato de entrada y salida sencillo e intuitivo que hace asequible la resolución de problemas de esta índole en ordenadores personales.

2. Aspectos fundamentales de la situación en estudio

Históricamente, la explotación indiscriminada de los bosques cubanos provocó la desaparición de más del 80 % de la superficie boscosa, tal y como se observa en el siguiente gráfico:

Gráfico 1. Superficie cubierta de bosques.



Por este motivo, en los últimos años, se están realizando grandes esfuerzos en materia de reforestación aunque, no obstante, en la actualidad, cerca de 200 000 hectáreas están aún deforestadas y los bosques cubanos tienen una composición por edades desequilibrada, muy distante de lo que requieren los planes de desarrollo prospectivo del país y la garantía de sostenibilidad. La propia situación de los bosques, los esfuerzos por el restablecimiento de los mismos y el temor a desastres ecológicos mayores, han generado posiciones extremadamente conservacionistas, que hacen que el volumen anual de las cortas proyectadas no rebase el 30 % del incremento medio anual del volumen de masa forestal lo cual, lógicamente, provoca el envejecimiento de las masas, con las consiguientes pérdidas económicas que trae aparejadas, al margen de otros daños.

Como ejemplo de esta situación podemos citar la Unidad Silvícola San Juan y Martínez, perteneciente a la Empresa Forestal Integral Pinar del Río, que ocupa el 44,8 % del área total de la empresa, y cuenta con 3 984,3 *ha* de plantaciones de *Pinus caribaea* manejadas con propósitos de **producción** de madera principalmente. Las características de este área de producción se muestran a continuación:

Tabla 1. Área de producción clasificada por grupos de edades e índices de sitio

Clases de edad		Área (ha)				
Grupo	Años	Índices de sitio				
		V	VI	VII	VIII	Total

1	0-5	30,6	33,5	32,2	0	96,3
2	6-10	78,9	236,8	344,6	0	660,3
3	11-15	130,5	266,7	405,9	198	1001,1
4	16-20	174,4	102	79	188	543,4
5	21-25	89	238,1	135	24,5	486,6
6	26-30	59	434,3	624,6	58,7	1196,6
Total		562,4	1331,4	1621,3	469,2	3984,3

Como se observa si se talan las masas cuando hayan llegado a la clase de edad seis, por sólo citar un ejemplo, en el primer quinquenio se talaría un total de 1 196,6 *ha* que representan el 30 por ciento del total , generando un volumen de 211 226 m³ de madera, y en el quinquenio sexto se talarían 96,3 *ha* que constituyen el 2,4 % del total, obteniéndose un volumen de 19 898 m³ de madera, apenas el 9 % de lo talado en el primer quinquenio y por lo tanto, alrededor del 9 % de los ingresos obtenidos en el quinquenio de referencia.

Esta situación está en total contradicción con lo que hasta ahora se ha discutido. Aplicar el criterio de talar en la edad del turno sólo perpetuaría el desorden y la inestabilidad en la producción, lejos de garantizar los objetivos que demanda la ordenación sostenible de los bosques.

Un bosque se considera normal si existe un equilibrio de edades individuales de árboles y masas, de clases de edad de las masas o de categorías dimensionales. La problemática en cuestión, es tratar de alcanzar esa estructura de bosque normal, preferentemente en el período de un turno, sin descuidar el rol económico fundamental del recurso. Se deben conciliar entonces, objetivos económicos y de conservación del medio ambiente para la ordenación de la plantación, es decir, nos enfrentamos a un problema con múltiples criterios. Así, para lograr este propósito es necesario tener en cuenta los siguientes elementos:

- *Especie y objetivo principal de la plantación*: La selección de la especie y objetivos de la plantación definen el turno de corta, que es el período de planificación que será considerado para la ordenación. Por otra parte, en cuanto al objetivo principal de la plantación, las plantaciones que trabajaremos están incluidas en la categoría de bosques productores.

- *Area por índice de sitio*: El índice de sitio es el indicador de productividad de la plantación, y en definitiva es quien define el volumen de madera que se puede aprovechar. Así, en sitios de mejor calidad (mejor índice de sitio) se obtiene mas volumen por hectárea.

- *Método de ordenación utilizado*: El método de ordenación, entre otros aspectos, determina el período de la regeneración y en que forma se va a dar continuidad a la plantación.

- *Superficie a regenerar de equilibrio*: La superficie a regenerar de equilibrio es una cota que restringe el área que debe ser talada en cada período para mantener o alcanzar el equilibrio de edades deseado en el período de un turno, y se define para cada índice de sitio.

- *Posibilidad volumen*: La posibilidad volumen representa el volumen de madera que se puede aprovechar sin afectar los requerimientos ecológicos y técnico-forestales del bosque.

- *Valor de la hectárea de plantación*: El valor de la hectárea de bosque es el indicador económico principal que se utiliza para seleccionar el tratamiento silvícola, sujeto a otras restricciones técnico-forestales esenciales. Este valor difiere con la edad, el índice de sitio y el tratamiento que se aplique. En nuestro caso, como valor de la hectárea se utilizará el Valor Actual Neto (VAN), que en nuestro problema representará el beneficio económico obtenido de estas acciones forestales.

3. Modelización.

Para la formulación del modelo, además de las condiciones técnicas de un proceso de planificación forestal, se consideraron principalmente las siguientes premisas, valoradas como objetivos fundamentales por el centro decisor:

1. El área cubierta por cada clase de edad debe ser aproximadamente la misma al finalizar el período de planificación.
2. La producción de madera debe ser la misma para cada unidad de tiempo en que se subdivide el plan.
3. Evitar siempre que sea posible, aplicar tala rasa en edades tempranas.
4. El Valor Actual Neto debe estabilizarse en el horizonte de planificación.

Hemos utilizado como variables de decisión el conjunto de variables $\{X_{hijp}\}$, donde:

- h representa el índice de sitio ($h=1, \dots, H$).
- i representa el grupo de edad ($i=1, \dots, I$).
- j representa el tratamiento a realizar ($j=1, \dots, J$).
- p representa el subperíodo de tiempo dentro de la planificación del turno ($p=1, \dots, P$).

Por tanto, la variable X_{hijp} representará el número de hectáreas de índice de sitio h , en el grupo de edad i a las que se le aplica el tratamiento j en el período p .

De forma análoga, el Valor Actual Neto VAN_{hijp} representa el valor de la hectárea si es aprovechada en sitio de índice h en la clase de edad i aplicando el tratamiento j en el período p . Este valor puede ser negativo si el resultado del aprovechamiento no compensa al menos las actividades culturales que ha recibido la hectárea de plantación. La superficie disponible, en hectáreas, correspondiente al índice de sitio h en la clase de edad i se simboliza por S_{hi} , de forma similar representaremos por S_h la superficie total en hectáreas del índice de sitio h y S_i a la superficie total en hectáreas correspondientes al grupo de edad i . Denotaremos por Se_{ph} a la superficie a regenerar de equilibrio en el período p , en el índice de sitio h , que es la que garantiza que se tale y se regenere toda la superficie en un turno.

El volumen por hectárea aprovechada en sitio de índice h , en la clase de edad i con tratamiento j en el período p se representa por V_{hijp} y la posibilidad volumen cosechable en el período p se expresa por V_p .

3.1. Restricciones del modelo.

3.1.1. Restricciones para el control del límite inferior de la superficie de tala.

En cada período de planificación y para cada índice de sitio se debe asegurar que como mínimo se aplique el tratamiento tala rasa ($j = 4$) al 90% de la superficie a regenerar de equilibrio, puesto que de esta manera se garantiza la renovación de la masa arbórea.

$$\sum_{i=1}^5 x_{hi4p} \geq 0.9 S_e \forall h, \forall p$$

3.1.2. Restricciones para el control del límite inferior del VAN:

Este conjunto de restricciones duras tiene como objetivo garantizar que la solución siempre reporte valores de VAN en cada período que superen o al menos igualen el 90% del nivel de aspiración fijado.

$$\sum_h^H \sum_i^I \sum_j^J VAN_{hijp} x_{hijp} \geq 0.9 VAN_p \forall p$$

3.1.3. Restricciones de control de tratamientos por grupo de edad

Estas restricciones son las encargadas de delimitar la cota superior de la superficie en que puede ser aplicado cada tratamiento. Cada fase esta asociada al período de planificación respectivo. Los tratamientos que se aplican están en correspondencia con la edad pero atendiendo a que el objetivo final del modelo es lograr una estructura por edades en equilibrio. Así, en cada grupo de edad se plantean como tratamientos factibles, los que correspondan a su grupo y la tala rasa, siendo este último el único tratamiento que deja el suelo totalmente descubierto. En el primer grupo de edad no se deben realizar tratamientos que aporten volumen aprovechable, por este motivo sólo es posible aplicar tala rasa si fuera necesario para la consecución del objetivo final, pero sería una solución que implica sacrificio económico, silvícola y ecológico.

Así, partiendo de la matriz inicial S_{hi}^0 definida para cada período:

Índices de sitio(h)	Edad (i)			
	1	2	...	I
1	S ₁₁	S ₁₂	...	S _{1i}
2	S ₂₁	S ₂₂	...	S _{2i}
...
H	S _{h1}	S _{h2}	...	S _{hi}

Tenemos el siguiente grupo de restricciones:

$$x_{hijp} \leq S_{hip}^0$$

3.2. Metas del modelo.

El sistema de metas que se establece en esta sección queda definido para cada período de planificación, es decir, tenemos un conjunto de metas para cada uno de los períodos p de planificación.

3.2.1. Metas para la superficie a regenerar de equilibrio:

Estas metas, pretenden mantener la superficie en la que se aplica la tala rasa en niveles próximos a lo silvícola y ecológicamente aceptable, evitando que se supere este nivel (Premisa 1, sección 3). Esta definición se hace para cada índice de sitio h con el fin de estabilizar los niveles de producción en cada período. La variable de desviación que se deseará minimizar será p_i .

$$\sum_{s=1}^I x_{hs4p} + n_i - p_i = Se_h \quad h = 1, \dots, H \quad p = 1, \dots, P \quad Q_1$$

3.2.2. Meta para el control de la posibilidad volumen.

El volumen que se puede extraer sin riesgos de degradación es el que la plantación sea capaz de incrementar en el período correspondiente. Esta meta trata de mantener los niveles de extracción en ese límite, tratando de que no se sobrepase (Premisa 2, sección 3). La variable de desviación que se deseará minimizar será p_i .

$$\sum_h^H \sum_i^I \sum_j^J v_{hijp} x_{hijp} + n_j - p_j = V_p \quad p = 1, \dots, P \quad Q_2$$

3.2.3. Metas para el control de la edad de tala.

En la sección 3.1.3 nos hemos referido a que la tala de árboles jóvenes significa un sacrificio en todos los aspectos; económicos, ecológicos y silvícolas, y por esta razón se definen las metas de esta sección. El primer grupo intentará impedir que se talen árboles de edad inferior al grupo 4, y el segundo tratará de impedir que se talen en edades inferior al grupo 5 (Premisa 3, sección 3). Por tanto, en ambas metas el objetivo es impedir que se talen árboles jóvenes. La variable de desviación que se deseará minimizar será p_i .

3.2.3.1. Metas para impedir que se talen árboles de edad inferior al grupo 4

$$\sum_{h=1}^4 \sum_{i=1}^3 x_{hi4p} + n_k - p_k = 0 \quad p = 1, \dots, P \quad Q_3$$

3.2.3.2. Metas para impedir que se talen árboles de edad inferior al grupo 5

$$\sum_{h=1}^4 \sum_{i=1}^4 x_{hi4p} + n_l - p_l = 0 \quad p = 1, \dots, P \quad Q_4$$

3.2.4. Metas para el control del VAN

El nivel de aspiración de esta meta es un indicador económico de la empresa que se debe cumplir y si fuera posible sobrepasar, aunque lo mas importante será lograr una estabilización a largo plazo de ese valor (Premisa 4, sección 3). La variable de desviación que se deseará minimizar será n_i .

$$\sum_h^H \sum_i^I \sum_j^J VAN_{hijp} x_{hijp} + n_m - p_m = VAN \quad p = 1, \dots, P \quad Q_5$$

3.3. Asignación de las prioridades

Para asignar los niveles de prioridad se interactuó con el centro decisor que estableció el siguiente orden para las metas:

Nivel 1: Superficie a regenerar de equilibrio. Se consideró como primer nivel el cumplimiento de lo normado, que establece que la superficie a talar en cada año debe ser igual a la superficie total multiplicada por el recíproco del turno de la especie y esto se consideró para cada índice de sitio.

Nivel 2: Posibilidad volumen El segundo nivel corresponde al control del volumen, se tratará de talar sólo lo que el bosque es capaz de incrementar pero nunca por encima de este valor porque degradaría la plantación.

Nivel 3: Control de la edad de tala, grupo 4-5. En este nivel se trata de impedir que se talen árboles jóvenes de edades comprendidas hasta el grupo 3.

Nivel 4: Control de la edad de tala, grupo 5. En este nivel, si se cumplen las metas del nivel anterior, entonces se tratará de talar sólo aquellos que estén en el grupo 5, que es la edad del turno.

Nivel 5: Control del VAN. Por último se intentará lograr un nivel de Valor Actual Neto aceptable para cada período.

3.4. Función objetivo

Con todas estas consideraciones, la función objetivo de nuestro problema de Programación por Metas Lexicográficas sería la siguiente:

$$\text{Lex min } a = \sum_{p=1}^5 \left(\sum_{i=1}^4 p_{ip} / Se_i \right), \sum_{p=1}^5 (p_{jp} / Vp), \sum_{p=1}^5 (p_{kp}), \sum_{p=1}^5 (p_{lp}), \sum_{p=1}^5 (n_{mp} / VAN)$$

4. Aplicación del modelo y análisis de la solución.

En nuestro caso en estudio consideraremos cuatro índices de sitio ($H=4$) y cinco clases de edad ($I=5$), puesto que se sumaron las áreas de las clases cinco y seis considerándolas como pertenecientes a la clase cinco. Los tratamientos serán cuatro, ($J=4$), siendo el índice 4 el que corresponde a la corta principal (tala rasa) según establece la Instrucción para la Ordenación del Patrimonio Forestal. El horizonte de planificación es $T=25$ años y la unidad de tiempo (cada período de planificación), cinco años por lo que habrán cinco períodos ($P=5$), se utilizó un submúltiplo del turno para facilitar los cálculos auxiliares y la comprensión de la solución por parte del centro decisor.

Como se había explicado antes, los tratamientos posibles se determinan de acuerdo con la edad de la plantación y se aplica tala rasa si fuera necesario para el propósito final. Así, es posible aplicar tala rasa en todas las edades (aunque no se deseable aplicarla en árboles jóvenes), y además, tratamiento 1 en el grupo de edad 2, tratamiento 2 en el grupo de edad 3 y tratamiento 3 en el grupo de edad 4. Esto hace un total de 160 variables de decisión. La configuración inicial de la unidad forestal de nuestro caso de estudio se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 2: Matriz Inicial S_{hi}^0

Índice de sitio (h)	Grupo de edad (i)					S_h
	1	2	3	4	5	
1	0.0	0.0	198.0	188.0	83.2	469.2
2	32.2	344.6	405.9	79.0	759.6	1621.3
3	33.5	256.8	266.7	102.0	672.4	1351.4
4	30.6	78.9	130.5	174.4	148.0	562.4
Total	96.3	680.3	1001.1	543.4	1663.2	3984.3

4.1. Solución.

Una vez formuladas las metas, con sus correspondientes niveles de aspiración fijados por el centro decisor, se procedió a resolver el problema. Para esta tarea se utilizó el programa PROMO, Caballero y otros (2000), que permite no sólo determinar una solución eficiente, sino además explorar el conjunto de soluciones satisfactorias y eficientes del problema. Así, se comprobó que el problema tenía soluciones satisfactorias, y seguidamente se obtuvieron diversas soluciones eficientes dentro del conjunto de puntos satisfactorios, representando estas una variedad significativa de estrategias de planificación satisfactorias, que fueron propuestas al centro decisor para su análisis y selección definitiva. Esta variedad de soluciones ayudaron al centro decisor a hacerse una idea precisa de las tasas de intercambio entre los distintos criterios a considerar, dentro siempre del conjunto de soluciones satisfactorias. Es decir, aportaron la información necesaria para que el centro decisor estimara que criterios estaban en contradicción y cuanto debía renunciar en algunos de ellos para mejorar en otros, y así poder diseñar una estrategia satisfactoria para sus aspiraciones, eficiente según sus criterios y adaptada a sus preferencias. Estas soluciones se muestran a continuación:

SOLUCIÓN 1

Tabla 3: Superficie en hectáreas sometida a cada tratamiento

Período	Tto.1	Tto.2	Tto.3	Tto.4	VAN
1	315,70	802,40	355,40	756,84	834426
2	30,60	660,30	641,17	762,02	826816
3	671,64	96,30	660,30	770,80	789325
4	668,18	754,84	96,30	770,42	796568
5	112,48	475,65	363,27	796,86	799719
Totales	1798,60	2789,49	2116,44	3856,94	4046854

Tabla 4: Superficie por edad e índice de sitio al finalizar la planificación

	V	VI	VII	VIII	Total / edad
Edad 1	93,84	324,26	266,28	112,48	796,86
Edad 2	93,84	308,37	255,78	112,48	770,47
Edad 3	93,84	308,37	256,114	112,48	770,80
Edad 4	93,84	308,37	252,96	106,85	762,02
Edad 5	93,84	371,93	300,266	118,11	884,15

SOLUCIÓN 2

Tabla 5: Superficie en hectáreas sometida a cada tratamiento

Período	Tto.1	Tto.2	Tto.3	Tto.4	VAN
1	416,91	803,10	355,40	751,47	836009
2	30,60	660,30	663,64	757,32	829327
3	668,18	96,30	660,30	768,02	789916
4	668,18	751,38	96,30	767,73	796790
5	112,48	479,64	359,81	796,86	799409
Totales	1896,35	2790,72	2135,45	3841,40	4051451

Tabla 6: Superficie por edad e índice de sitio al finalizar la planificación

	V	VI	VII	VIII	Total / edad
Edad 1	93,84	324,26	266,28	112,48	796,86
Edad 2	89,14	308,37	257,74	112,48	767,73
Edad 3	89,14	308,37	258,03	112,48	768,02
Edad 4	89,14	308,37	252,96	106,85	757,32
Edad 5	107,94	371,93	296,39	118,11	894,37

SOLUCIÓN 3

Tabla 7: Superficie en hectáreas sometida a cada tratamiento

Período	Tto.1	Tto.2	Tto.3	Tto.4	VAN
1	416,91	803,10	355,40	753,38	836009
2	30,60	660,30	524,52	774,55	816902
3	668,18	96,30	660,30	775,34	786793
4	679,54	751,38	96,30	775,04	793619
5	108,90	481,85	359,81	796,86	799441
Totales	1904,13	2792,93	1996,33	3875,17	4032764

Tabla 8: Superficie por edad e índice de sitio al finalizar la planificación

	V	VI	VII	VIII	Total / edad
Edad 1	93,84	324,26	266,28	112,48	796,86
Edad 2	93,84	320,37	252,96	107,87	775,03
Edad 3	93,84	319,65	252,96	108,89	775,34
Edad 4	93,84	319,73	252,96	108,19	774,72
Edad 5	93,84	337,29	306,24	124,97	862,35

SOLUCIÓN 4

Tabla 9: Superficie en hectáreas sometida a cada tratamiento

Período	Tto.1	Tto.2	Tto.3	Tto.4	VAN
1	660,30	1001,10	457,82	615,93	852438
2	96,30	660,30	1001,10	720,34	850458
3	715,17	96,30	660,30	759,22	791063
4	720,34	715,17	96,30	762,10	793912
5	674,76	720,34	689,95	720,16	853721
Totales	2866,87	3193,21	2905,47	3577,75	4141592

Tabla 10: Superficie por edad e índice de sitio al finalizar la planificación

	V	VI	VII	VIII	Total / edad
Edad 1	84,46	291,83	239,65	101,23	717,17
Edad 2	84,46	298,88	266,28	112,48	762,10
Edad 3	84,46	296,01	266,28	112,48	759,23
Edad 4	84,46	291,83	239,65	104,40	720,34
Edad 5	131,38	442,74	319,54	131,81	1025,46

SOLUCIÓN 5

Tabla 11: Superficie en hectáreas sometida a cada tratamiento

Período	Tto.1	Tto.2	Tto.3	Tto.4	VAN
1	78,90	647,74	276,40	788,22	806714
2	30,60	486,89	397,20	796,86	795441
3	171,99	96,30	660,30	796,86	772982
4	243,57	703,02	96,30	796,86	783706
5	112,48	457,76	378,76	796,86	801793
Totales	637,54	2391,71	1808,96	3975,66	3960636

Tabla 12: Superficie por edad e índice de sitio al finalizar la planificación

	V	VI	VII	VIII	Total / edad
Edad 1	93,84	324,26	266,28	112,48	796,86
Edad 2	93,84	324,26	266,28	112,48	796,86
Edad 3	93,84	324,26	266,28	112,48	796,86
Edad 4	93,84	324,26	266,28	112,48	796,86
Edad 5	93,84	324,26	266,28	112,48	796,86

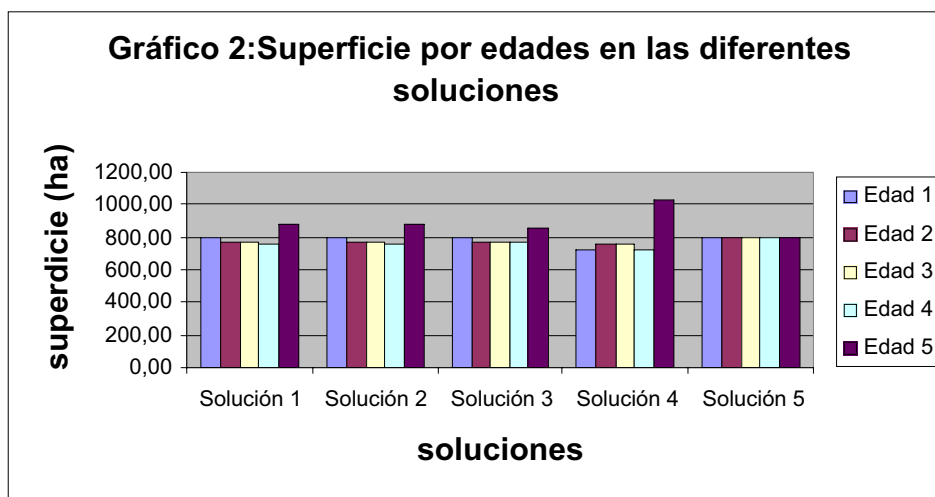
5. Análisis de las soluciones.

A la vista de estas soluciones, el centro decisor emitió sus valoraciones con respecto a las distintas situaciones que representan. Así, las soluciones 1, 2 y 3 (tablas 3-8) no logran una homogeneidad perfecta en cuanto a su distribución de superficies por grupos de edades y los tratamientos abarcan un área de aproximadamente 10.5 miles de hectáreas, el beneficio que se obtiene es 4 046 854; 4 051 451 y 4 032 764 pesos respectivamente. La solución 4 (tablas 9 y 10) es la de máximo VAN, se obtiene un beneficio de 4 141 592 pesos, son sometidas a tratamientos 12.5 miles de hectáreas y la composición de superficie por grupo de edades es la mas alejada del nivel al que se aspira, siendo finalmente una solución ecológicamente inaceptable. La solución 5 es la que ofrece una composición homogénea de áreas por grupo de edades. Sin embargo es la que tiene menos área tratada y también la que aporta un menor beneficio (tablas 11 y 12).

La situación comparativa de las cinco soluciones se puede apreciar en la tabla 13 en la que se muestran las superficies por edades que quedarían al finalizar los 25 años de planificación, si se aplican los tratamientos propuestos en cada una de las soluciones. En el gráfico 2 se aprecia con mayor claridad la comparación de los resultados

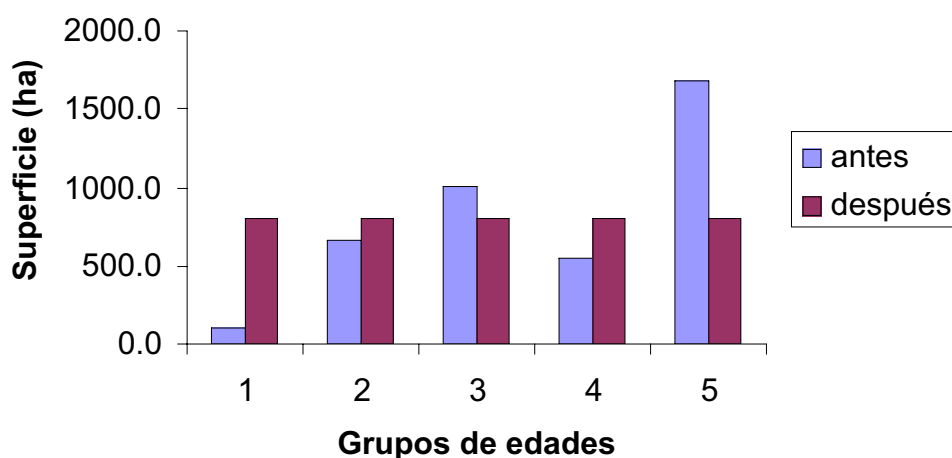
Tabla 13: Superficies por edades con las diferentes soluciones

	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	Solución 5
Edad 1	796,86	796,86	796,86	717,17	796,86
Edad 2	770,47	770,47	775,03	762,10	796,86
Edad 3	770,80	770,80	775,34	759,23	796,86
Edad 4	762,02	762,02	774,72	720,34	796,86
Edad 5	884,15	884,15	862,35	1025,46	796,86



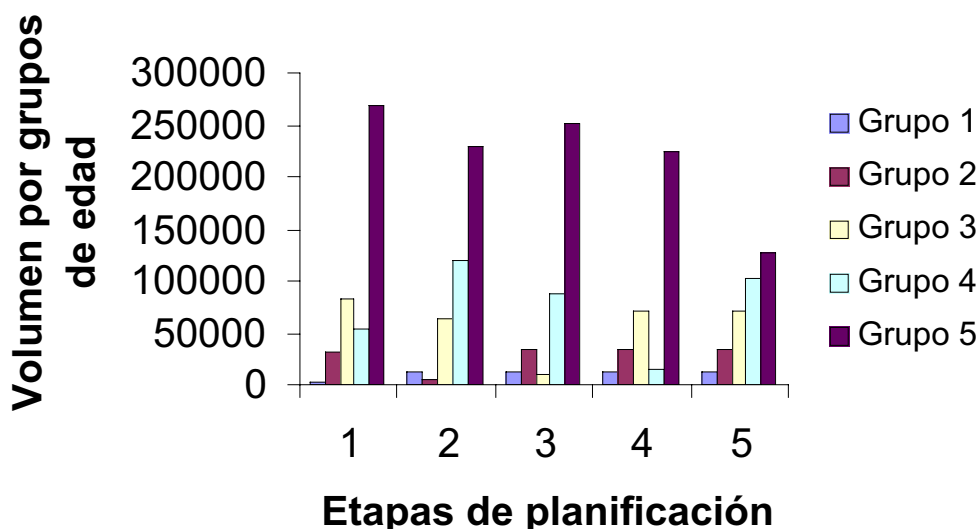
Finalmente, la solución elegida fue la número 5. Con esta solución la empresa forestal, el centro decisor, decidió que se sentía plenamente satisfecha y terminó por tanto el proceso de resolución. El gráfico 3 muestra la situación final por grupos de edad.

Gráfico 3. Superficie por edades e Índice de sitio antes y después de la aplicación del modelo



La composición volumétrica evoluciona en el período de planificación según se muestra en el gráfico 4. Como se puede apreciar se logra la estructura de bosque equilibrado a la que se aspira. Con esta estructura se consigue que las diferencias en volumen sean debido sólo a la diferencia de edades, pero el stock de madera aprovechable será el mismo en cada período, siendo este uno de los objetivos principales que perseguía el centro decisor.

Gráfico 4. Composición volumétrica en el horizonte de planificación



6. Conclusiones

En primer lugar se ha logrado obtener una solución, mediante este modelo económico-matemático, que permite determinar la superficie a talar para cada índice de sitio en cada período, maximizando el beneficio sin deterioro del ecosistema. Además, esta solución obtenida permite también determinar la superficie que debe ser sometida a los diferentes tratamientos para completar el volumen a extraer en cada período de planificación, conocer el Valor Actual Neto que genera el aprovechamiento sugerido por la Ordenación y finalmente disminuir los sacrificios de cortabilidad en el proceso de Ordenación de las plantaciones, satisfaciendo así plenamente los deseos del centro decisor, es decir, resolviendo eficientemente el problema económico en cuestión.

Por otra parte, el modelo de Programación por Metas diseñado en este trabajo es aplicable a plantaciones puras de otras especies con objetivos de producción de madera, siempre que se cuenten con las tablas de producción y el resto de la información necesaria para su formulación particular. Es decir, este modelo es aprovechable para la planificación eficiente de otras zonas forestales, sólomente necesitando una información básica acerca del estado de las mismas.

Finalmente, hemos de señalar que con la aplicación de la solución de este modelo se logra una estructura de edades que incrementa la posibilidad volumen en 11.7% y el VAN en 20.7% respecto a las posibilidades ecológicamente aceptables en la actualidad. Es decir, que este modelo no sólo permite

equilibrar y regenerar la plantación en cuestión, sino que además permite aprovechar económicamente esta plantación de una forma más eficiente.

Bibliografía

1. Ministerio de la Agricultura. Norma Ramal 595. Tratamientos silviculturales. Dirección de Normalización Metrología y Control de la Calidad, 1982.
2. Ballester E. and Romero, C. Multiple Criteria Decision Making and its Applications to Economic Problems. Kluwer Academic Publisher. Netherlands. 1998.
3. Barba – Romero, S. y col. La decisión multicriterio en el análisis y la gestión de los recursos naturales. En Azqueta y col. Análisis económico y gestión de recursos naturales. Alianza Editorial S.A. Madrid, España, 1994.
4. Caballero,R., Luque, M., Molina,J., Ruiz, F. Programación Multiobjetivo (PROMO)
5. Díaz- Balteiro, L. and Romero, C. Timber Harvesting Scheduling Problems: A Compromise Programming Approach. Comunicación personal de Carlos Romero E.T.S. Ingenieros de Montes. Universidad Politécnica de Madrid. España. Abril, 1997.
6. Díaz – Balteiro, L. and Romero, C. Modeling timber harvest scheduling problems with multiple criteria: an application in Spain. Forest Science, 44:47-57, 1998.
7. León, M.A. Modelos de Programación por Metas para la Ordenación Forestal. Memorias del Tercer Evento Internacional Científico Metodológico de Matemática y Computación. Cuba, 1997.
8. Madrigal, A. Ordenación de Montes Arbolados. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. ICONA, Madrid, España, 1995.
9. Romero, C. Multicriteria decision analysis and environmental economics: An approximation. European Journal of Operational Research 96: 81-89, 1996.
10. Romero, C. Economía de los recursos ambientales y naturales. Segunda edición ampliada. Alianza editorial, S.A. Madrid, 1997.

ANEXO I

En la primera fase se ha planteado que la superficie sobre la cual se puede aplicar cada tratamiento no puede superar la disponibilidad. Para el tratamiento correspondiente a la edad se utiliza la primera restricción y para la tala rasa, la segunda. Recuérdese que en los grupos de edad primero y último sólo se aplica tala rasa.

En las fases siguientes las restricciones modelizan la evolución en edad de las masas, considerando que lo talado en el período p pasa a ser la superficie en el grupo de edad 1 del período $p+1$ y la disponibilidad en la clase última en el período $p+1$ es lo que se ha dejado de talar de esa edad en el período p mas lo que había en la clase precedente en ese período. Estas son las restricciones del modelo que representan esta evolución de las edades.

Primera fase ($p = 1$)

$$x_{hij1} \leq S_{hi}^0, i \neq 1, i \neq 5, j \neq 4 \quad \forall h$$

$$x_{hi41} \leq S_{hi}^0 \quad \forall h$$

Segunda fase ($p = 2$)

$$x_{h142} \leq x_{h541} + x_{h441} \quad \forall h$$

$$x_{h542} \leq \sum_{i=4}^5 S_{hi}^0 - x_{h541} - x_{h441} \quad \forall h$$

Tercera fase ($p = 3$)

$$x_{h143} \leq x_{h542} + x_{h442} \quad \forall h$$

$$x_{h213} \leq x_{h541} + x_{h441} \quad \forall h$$

$$x_{h243} \leq x_{h541} + x_{h441} \quad \forall h$$

$$x_{h543} \leq \sum_{i=1}^3 S_{hi}^0 - x_{h541} - x_{h441} - x_{h542} - x_{h442} \quad \forall h$$

Cuarta fase ($p = 4$)

$$x_{h144} \leq x_{h443} + x_{h453} \quad \forall h$$

$$x_{h214} \leq x_{h442} + x_{h542} \quad \forall h$$

$$x_{h244} \leq x_{h442} + x_{h542} \quad \forall h$$

$$x_{h324} \leq x_{h441} + x_{h541} \quad \forall h$$

$$x_{h344} \leq x_{h441} + x_{h541} \quad \forall h$$

$$x_{h544} \leq \sum_{i=1}^4 s_{hi}^0 - x_{h541} - x_{h441} - x_{h542} - x_{h442} - x_{h543} - x_{h443} \quad \forall h$$

Quinta fase (p = 5)

$$x_{h145} \leq x_{h444} + x_{h544} \quad \forall h$$

$$x_{h215} \leq x_{h443} + x_{h543} \quad \forall h$$

$$x_{h245} \leq x_{h443} + x_{h543} \quad \forall h$$

$$x_{h325} \leq x_{h442} + x_{h542} \quad \forall h$$

$$x_{h345} \leq x_{h442} + x_{h542} \quad \forall h$$

$$x_{h435} \leq x_{h441} + x_{h541} \quad \forall h$$

$$x_{h445} \leq x_{h441} + x_{h541} \quad \forall h$$

$$x_{h545} \leq \sum_{i=1}^5 s_{hi}^0 - x_{h541} - x_{h441} - x_{h542} - x_{h442} - x_{h543} - x_{h443} - x_{h544} - x_{h444} \quad \forall h$$

Las variables que no aparecen en esta sección tienen sus cotas superiores según la evolución de las superficies por edades dada en la matriz inicial S_{hi}^0 . Así, la superficie que estaba en edad i en el período p se encuentra en edad $i+1$ en el período $p+1$.