

COMPARACIÓN DEL MÉTODO DEL TRAMO MÓVIL EN REGENERACIÓN CON TÉCNICAS DE PROGRAMACIÓN LINEAL

Felipe Bravo*, María Teresa Ramos**, Angeles Ramírez Estévez** & Jesús Sáez Aguado**

* Departamento de Producción Vegetal y Silvopascicultura. Escuela Universitaria Politécnica Agraria de Palencia. Universidad de Valladolid. Avda. de Madrid, 57. 34071 PALENCIA

** Departamento de Estadística e Investigación Operativa. Escuela Universitaria Politécnica Agraria de Palencia. Universidad de Valladolid. Avda. de Madrid, 57. 34071 PALENCIA

*** Departamento de Estadística e Investigación Operativa. Facultad de Ciencias. Universidad de Valladolid. c/ Prado de la Magdalena, s/n. 47005 VALLADOLID

1. INTRODUCCIÓN

Las técnicas de programación matemática, especialmente las de programación lineal, son habitualmente utilizadas en la planificación forestal en Norteamérica (CLUTTER & *al.*, 1983; LEUSCHNER, 1984; BUONGIORNO & GILLES, 1987; DAVIS & JOHNSON, 1987). Sin embargo, en Europa

no han cuajado las ventajas de este enfoque en la ordenación de montes. Tradicionalmente la programación matemática se ha empleado, en el campo de la ordenación de montes, para maximizar el volumen maderable obtenido o los ingresos económicos, dinerarios o financieros, respetando una serie de restricciones de tipo selvícola y económico. REED (1986) revisó

Tabla 1: Situación inicial del Cuartel

	EDAD (años)	SUPERFICIE (ha)	Nº DE PIES (pies/ha)	VOLUMEN (m ³ /pie)	TRAMO
CALIDAD I	40-49	36,7	264,38	0,5961	B
CALIDAD II		137,2	181,18	0,4893	B
CALIDAD I	50-59	48,1	222,59	0,6826	AM/AZ
CALIDAD II		166,0	159,73	0,4762	AZ/AM
CALIDAD I	60-69				
CALIDAD II		9,6	275,87	0,4919	AM
CALIDAD I	70-79	21,2	184,60	0,7249	AZ
CALIDAD II					
CALIDAD I	80-89				
CALIDAD II		35,7	218,40	0,5399	AZ

los métodos de optimización de la corta y, también, REED (1994) estudió los aspectos económicos de la optimización del turno. Estas técnicas son usadas por el Servicio Forestal de los Estados Unidos para la ordenación de montes (KENT & al., 1991) y es incorporada en la planificación de cortas de masas regulares (GONG, 1990) e irregulares (LOHMANDER, 1990; GONG, 1990).

2. METODOLOGÍA

Se utilizan los datos aportados por el inventario, realizado por la Junta de Castilla y León, del cuartel E del monte «Pinar de Peguerinos», número 80 de U.P. de la provincia de Ávila; este monte, poblado con *Pinus sylvestris*, ha sido ordenado recientemente mediante el método del tramo móvil en regeneración. La tabla 1 refleja las características más importantes de esta ordenación (HERRÁEZ, 1994).

<i>Tabla 2. Situación ideal del Cuartel</i>			
	EDAD (años)	Nº PIES (pies/ha)	VOLUMEN (m ³ /ha)
CALIDAD I	20-29	2100	161,45
CALIDAD II			
CALIDAD I	30-39	1000	224,11
CALIDAD II			
CALIDAD I	40-49	700	325,96
CALIDAD II			
CALIDAD I	50-59	500	369,46
CALIDAD II			
CALIDAD I	60-69	350	372,01
CALIDAD II			
CALIDAD I	70-79	115	161,81
CALIDAD II			
CALIDAD I	80-89	250	221,83
CALIDAD II			
CALIDAD I	90-100	115	131,71
CALIDAD II			

Las restricciones selvícolas que se han impuesto son las siguientes:

a.- Las cortas no superarán la posibilidad en cada período; en un principio se ha tomado como posibilidad inicial 635 m³/año los tres primeros decenios, y de 500 m³/año por encima del indicado en los posteriores, con el fin de facilitar la búsqueda de soluciones al paquete informático utilizado y con la certeza de que en los tres primeros períodos no se supera la posibilidad fijada en el Proyecto de Ordenación original.

b.- Un período abarca un decenio.

c.- La posibilidad anual se incrementa en un 10% en cada decenio, de acuerdo con experiencias dasocráticas previas (VALDÉS & al., 1993).

d.- El monte normal, reflejado en la tabla 2, que se intenta conseguir está basado en las tablas de producción para *Pinus sylvestris* en el Sistema Central (GARCÍA ABEJÓN & GÓMEZ LORANCA, 1984).

e.- El turno se ha fijado en 80 años para la calidad I y en 100 años para la calidad II. En ambos casos el período de regeneración es de 20 años. No se admiten prórrogas a este valor. La entrada en regeneración de la masa puede retrasarse para adecuar el monte a otras restricciones.

f.- El tratamiento selvícola para la regeneración es el de aclareos sucesivos uniformes, en los cuales se obvian las cortas preparatorias; las diseminatorias se realizan en los cinco primeros años del período (se simulan el año 63 para la calidad I y el año 83 para la calidad II); las cortas aclaratorias y finales se realizarán en el último decenio del período de regeneración (la simulación se hace el año 75 para la calidad I y el año 95 para la calidad II). Las simulaciones, y el monte normal, están adelantadas 20 años por el estado actual de la masa. En posteriores revisiones deben fijarse de nuevo estos valores.

g.- La superficie en regeneración no podrá superar la tercera parte de la superficie total.

h.- El horizonte temporal previsto es cien años.

El objetivo es maximizar el volumen maderable.

3. MODELO MATEMÁTICO

3.1. Variables de decisión

Como se ha expuesto anteriormente, tratamos de determinar cuántas hectáreas regeneramos en cada período y en cada clase de edad, de forma tal, que obtengamos el máximo volumen posible.

Fijémonos en la situación inicial del bosque:

De la calidad II, tenemos cinco clases de edad iniciales, a saber: de 40-49, 50-59, 60-69, 70-79, y 80-89. Por tanto, las variables de decisión que hacen referencia a la calidad II serán:

$X_{i,j}$ = número de hectáreas de calidad II de la clase inicial «i» regeneradas en el período «j».

Donde:

- El subíndice «i» denota la clase de edad inicial, y por tanto, podrá tomar los valores 4, 5, 6, 7 y 8.

- El subíndice «j» denota el período en el que realizaremos la regeneración. Como el horizonte de planificación es de 100 años, y la unidad de tiempo elegida es la década, «j» podrá tomar los valores 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10.

Así, por ejemplo, la variable $X_{5,2}$ muestra el número de hectáreas de la clase de edad 50-59, regeneradas en el segundo período del plan. Como la edad máxima permitida para el comienzo de la regeneración es de 140 años, el subíndice «j» no podrá superar cierto valor. Esto es, no podremos comenzar la regeneración de la clase de edad 40-49, antes del quinto período ni podremos retrasarla en exceso. Por tanto, el margen de valores permitido para los subíndices son los siguientes:

$$i = 4, 5, 6, 7, 8;$$

$$j = 9-i, \dots, 15-i.$$

De forma análoga, podemos definir variables para la calidad I:

$Y_{i,j}$ = número de hectáreas de calidad I de la clase inicial «i» regeneradas en el período «j».

Ahora, por la situación inicial del bosque, los subíndices variarán en los siguientes intervalos:

$$i = 4, 5, 6, 7;$$

$$j = 7-i, \dots, 13-i.$$

El rango permitido para el subíndice «j» es debido a la condición de comenzar la regeneración a los 60, 70, ... , 120 años si ello fuera necesario.

Evidentemente, a lo largo de los 100 años de duración del proyecto, nos vamos a encontrar con masa regenerada -tanto de la calidad I como de la calidad II- que entrará de nuevo en regeneración. Se supone que el volumen aportado por un árbol no es económicamente rentable hasta los 20 años para la calidad I y hasta los 30 para la calidad II. Es por esto que el grupo de variables que hace referencia a la nueva masa, tendrá una expresión diferente:

Para la calidad II, tendremos:

$XN_{i,j}$ = hectáreas regeneradas en el período «j» de la masa de calidad II que se incorpora en el período «i»;

Obligaremos a regenerar la masa nueva a los 80 años. Por tanto, solamente la masa que se incorpora en el quinto período podrá comenzar su regeneración dentro de los 100 años de planificación. Por tanto, debemos considerar únicamente la variable $X_{5,10}$.

De forma análoga, podemos definir variables para la masa regenerada de la calidad I, denotando esta condición con la letra «Y». La masa de la calidad I entrará en regeneración a los 60 años. Así, las variables correspondientes estarán denotadas por $YN_{i,j}$ con los valores para los subíndices i, j siguientes:

$$i = 4, 5, 6;$$

$$j = i+4$$

Tabla 3. Superficies en regeneración

		PER.1	PER.2	PER.3	PER.4	PER.5	PER.6	PER.7	PER.8	PER.9	PER.10
CLASE 4: 40-49	CAL. I		17,84			5,04	1,08	12,73		17,84*	
	CAL. II						18,14	31,47			87,57
CLASE 5: 50-59	CAL. I		31,83	7,05			16,99	24,05		31,83*	7,05*
	CAL. II				60,10	51,21		34,96			19,71
CLASE 6: 60-69	CAL. I										
	CAL. II		9,60								
CLASE 7: 70-79	CAL. I	21,20						21,20*			
	CAL. II										
CLASE 8: 80-89	CAL. I										
	CAL. II	2,00	33,69								2,00*
VOL. DECENAL (m ³)		1.506,50	4.483,78	7.657,36	15.078,10	16.585,91	18.244,50	20.068,95	22.075,85	24.283,44	26.711,78
POSI. DECENAL (m ³)		6.358,00	6.993,80	7.693,18	15.117,50	16.629,25	18.292,17	20.121,39	22.133,53	24.346,88	26.781,57

Hectáreas de la clase de edad inicial i-ésima que entran en regeneración en el período j-ésimo.

(*) Hectáreas de la masa nueva que entran en regeneración.

3.2. Función objetivo

Como nuestra meta última es maximizar el volumen maderable obtenido, la función objetivo ha de expresar el volumen total resultante de este plan de gestión. Por tanto, la ecuación matemática que expresa el volumen es:

$$Z = \sum_{i,j} VX_{i,j} \cdot 0.3 \cdot PX_i \cdot X_{i,j} + \sum_{i,j} VX_{i,j+1} \cdot 0.6 \cdot X_{i,j} +$$

$$\sum_{i,j} VY_{i,j} \cdot 0.3 \cdot PY_i \cdot Y_{i,j} + \sum_{i,j} VX_{i,j+1} \cdot 0.6 \cdot PY_{i,j} \cdot Y_{i,j} +$$

$$VNX_5 \cdot 85 \cdot XN_{5,10} + \sum_{i=4}^6 VNY_i \cdot 115 \cdot YN_{i,i+4}$$

donde:

$VX_{i,j}$ = m³/pie de la clase de edad inicial «i» de la calidad II en el período «j».

$VY_{i,j}$ = m³/pie de la clase de edad inicial «i» de la calidad I en el período «j».

VNX_i = m³/pie de la masa nueva que aparece en el período «i» de la calidad II y que entra en regeneración en el período «j».

VNY_i = m³/pie de la masa nueva que aparece en el período «i» de la calidad I y que entra en regeneración en el período «j».

PX_i = pies/ha de la clase de edad inicial «i» de la calidad II en el comienzo de la regeneración.

PY_i = pies/ha de la clase de edad inicial «i» de la calidad I en el comienzo de la regeneración.

Las variables anteriormente citadas son datos conocidos.

3.3. Restricciones

Por un lado, la superficie total regenerada debe ser, precisamente, la superficie total disponible:

$$\forall i = 4, \dots, 8 \quad \sum_{j=9-i}^{15-i} X_{i,j} = SUPX_i$$

$$\forall i = 4, \dots, 7 \quad \sum_{j=7-i}^{13-i} X_{i,j} = SUPY_i$$

donde SUPX y SUPY denotan la superficie de cada clase de edad.

La masa regenerada que se incorpora en el período «i» con 30-39 años para la calidad II, y con 20-29 para la calidad I, es, precisamente, la regenerada cuatro décadas antes para la calidad II, y tres para la I. Esto es:

$$XN_{5,10} = \sum_i X_{i,1}$$

$$YN_{1,1+4} = \sum_i Y_{i,1-3}$$

Además, la superficie en regeneración en un momento dado, no debe superar un tercio de la superficie total. Expresando esta condición en función de las variables, quedará:

$$\forall j = 1, \dots, 6 \quad 90.9 \geq \sum_i X_{i,j} + \sum_i X_{i,j-1} +$$

$$\sum_i X_{i,j+1} + \sum_i Y_{i,j} + \sum_i Y_{i,j-1} + \sum_i Y_{i,j+1} ;$$

$$\forall j = 7, \dots, 10 \quad 90.9 \geq \sum_i X_{i,j} + \sum_i X_{i,j-1} +$$

$$\sum_i X_{i,j+1} + \sum_i Y_{i,j} + \sum_i Y_{i,j-1} + \sum_i Y_{i,j+1} +$$

$$\sum_i XN_{1,j} + \sum_i YN_{1,j}$$

Y, por último, el volumen extraído en cada período no debe superar la posibilidad, esto es:

$$\forall j = 1, 2, 3 \quad \sum_i V X_{i,j} \cdot 0.3 \cdot P X_i \cdot X_{i,j} +$$

$$\sum_i V X_{i,j+1} \cdot 0.6 \cdot X_{i,j} + \sum_i V Y_{i,j} \cdot 0.3 \cdot P Y_i \cdot Y_{i,j} +$$

$$\sum_i V Y_{i,j+1} \cdot 0.6 \cdot P Y_i \cdot Y_{i,j} \leq 6350 \cdot I \cdot I^{j-1}$$

$$\forall j = 3 \dots 10 \quad \sum_i V X_{i,j} \cdot 0.3 \cdot P X_i \cdot X_{i,j} +$$

$$\sum_i V X_{i,j+1} \cdot 0.6 \cdot X_{i,j} + \sum_i V Y_{i,j} \cdot 0.3 \cdot P Y_i \cdot Y_{i,j} +$$

$$\sum_i V Y_{i,j+1} \cdot 0.6 \cdot P Y_i \cdot Y_{i,j} + V N X_5 \cdot 85 \cdot X N_{5,10} +$$

$$\sum_{i=4}^6 V N Y_1 \cdot 115 \cdot Y N_{i,i+4} \leq 11350 \cdot I \cdot I^{j-1}$$

Este modelo matemático ha sido resuelto con el paquete informático LINGO, quedando los resultados obtenidos reflejados en la tabla 3.

4. CONCLUSIONES

Los resultados aportados por este trabajo deben considerarse como una primera aproximación al problema de la ordenación de montes, y no pueden ser aplicados, aún, a la práctica dasocrática; las numerosas simplificaciones selvícolas que se han realizado (no se incluyen cortas de mejora, la posibilidad aumenta linealmente, no se hacen indicaciones sobre el alargamiento del período de regeneración en caso de necesidad, ...) impiden que los resultados se trasladen al trabajo diario de los gestores forestales. Sin embargo, permite mostrar el interés de la programación lineal en la ordenación de montes, técnica aún no explotada en este campo.

En el Proyecto de Ordenación original, mediante el tramo móvil en regeneración, se incluyen en el tramo azul 117.8 ha, mientras que utilizando la programación lineal la incorporación de la masa al tramo en regeneración es más gradual: 23,2 ha en el primer período y 67,53 ha (lo que hace un total de 90,73 ha) en el segundo; en estos dos primeros períodos no se supera la posibilidad fijada en el proyecto de ordenación original. La tabla 3 muestra la evolución de la masa en regeneración en cada período: queda de manifiesto que se consigue la regularidad de las rentas de forma aceptable. También se muestra la posibilidad en cada decenio. A partir del tercero se supera la posibilidad; este hecho tiene una importancia relativa pues la necesaria revisión del año 20 reconducirá excesos de previsión en la posibilidad.

En este programa falta, además de prescripciones más precisas de tipo selvícola, incluir

factores que tengan en cuenta posibles situaciones no previstas: incendios forestales, vendavales, plagas, cortas extraordinarias, etc. La inclusión de éstos convertirá el programa en uno de tipo no lineal o estocástico, lo que escapa de las pretensiones de este trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BOUNGIORNO, J. & J.K. GILLES; 1987. *Forest management and economics*. Macmillan Pub Co. New York.
- CLUTTER, J.L., J.C. FORSTON, L.V. PIENAAR, G.H. BRISTER & R.L. BAILEY; 1983. *Timber management. A quantitative approach*. Wiley & Sons. New York.
- DAVIS, L.S. & K.N. JOHNSON; 1987. *Forest management*. McGraw-Hill. New York.
- GARCÍA ABEJÓN, J.L. & J.A. GÓMEZ LORANCA; 1984. *Tablas de producción de densidad variable para Pinus sylvestris L. en el Sistema Central*. Com. INIA. Serie Recursos Naturales, 29. Madrid.
- GONG, P.; 1990. *Adaptative decisions in even-aged stand management*. Arbetsrapport, 127. Umea..
- HERRÁEZ, F.; 1994. *Revisión de la Ordenación del monte nº 80 del Catálogo de los de U.P. de la provincia de Ávila*. Trabajo Fin de Carrera inédito. E.U.P.A. de Palencia. Universidad de Valladolid. Palencia.
- JOHNSON, K.N. & H.L. SCHEURMAN; 1977. *Techniques for prescribing Optimal Timber Harvest and Investment under Different Objectives. Discussion and Synthesis*. Forest Science Monograph, 18.
- LEUSCHNER, W.A.; 1984. *Introduction to forest resource management*. Wiley & Sons. New York.
- LINGO; 1994. *Optimization Modeling Language*. Lingo Systems Inc.
- LOHMANDER, P.; 1990. *Economics two stage multi species management in a stochastic environment: the case of selective thinning options and stocjastic growth parameters*. Arbetsrapport, 112. Umea.
- KENT, B., B. BARE, R. FIELD & G. BRADLEY; 1991. *Natural resource land management planning using large-scale linear programs: The USDA Forest Service experience with FORPLAN*. *Operations Research*, 39(1): 13-27.
- REED, W.J.; 1986. *Optimal harvesting models in forest management: A survey*. *Natural Resources Model.*, 1: 55-79.
- REED, W.J.; 1994. *Modelos de gestión forestal*. En: AZQUETA & FERRERO (eds.); *Análisis económico y gestión de recursos naturales*. Alianza Editorial. Madrid: 181-192.
- VALDÉS, C., A. ROJO & G. MONTERO; 1993. *Intervención dasocrática en los pinares de Cercedilla y Navacerrada pp. 693-703*. En: & SILVA-PANDO, F.J. & G. VEGA (eds.); *Congreso Forestal Español. Proceedings. Tomo III*. Xunta de Galicia. Vigo: 693-703.