

DETERMINACIÓN DE UN PLAN DE CORTAS ÓPTIMO PARA *Pinus hartwegii* Lindl., AL UTILIZAR PROGRAMACIÓN LINEAL*.

Reygadas Prado Diego D. **
Rivero Baños D. Pioquinto***

RESUMEN.

En este trabajo se emplea el modelo de programación lineal como herramienta de planeación forestal en la determinación de un plan de cortas de madera, en el cual se consideran los métodos de tratamiento matarrasa y "árboles padre", puestos en marcha a través de setenta regímenes (alternativas) de manejo.

Se prevén los siguientes objetivos: 1. Maximación del rendimiento en volumen (m^3r). 2. Maximización de ganancias ($\$/m^3r$); ambos bajo los esquemas "Sin" y "Con" rendimiento sostenido, para el área comprendida por la Estación Experimental de Enseñanza e Investigación Forestal Zoquiapan, de la Universidad Autónoma de Chapingo.

Los resultados indican que para el caso del primer objetivo se deben poner en marcha los regímenes de manejo 60 y 63 bajo el esquema "Sin" rendimiento sostenido y los regímenes 43, 47, 48, 51, 52, 56, 59 y 63 para el esquema "Con" rendimiento. Se observa un rendimiento en volumen máximo de 3 733 811.214 metros cúbicos en rollo (m^3r) y 3 733 811.212 m^3r , en ambos casos.

Para el segundo objetivo, el esquema "Sin" rendimiento sostenido sugiere la aplicación de los regímenes de manejo 43 y 44, mientras que bajo el esquema "Con" rendimiento sostenido, la solución indica la aplicación de los regímenes de manejo 1, 2, 9, 15, 21, 26, 45, 46, 47, 48, 52, 59, 60, 63 y 64.

Se obtiene un beneficio (ganancia) máximo de \$2 981 925 723.00 y \$2 019 704 265.73 (viejos pesos), para el primer y segundo caso, respectivamente.

* Parte de la tesis del primer autor.

** Investigador Titular del CENID-COMEF. INIFAP-SARH.

*** M Sc. Profesor-Investigador de la División de Ciencias Forestales de la UACH.

Adicionalmente, se observa que el análisis de sensibilidad realizado no produce cambios en las variables de decisión asociadas a los objetivos.

Palabras clave: Silvicultura, plan de cortas, programación lineal, bosques de pino, *Pinus hartwegii*.

ABSTRACT.

In this work a linear programming model was used as a forest planning tool on the determination of a cut plan of wood, which considered methods of treatments of clear-cut and "parent trees", implemented through 70 regimes (alternatives), of management.

Taking into account the following objectives: 1. Increase of volumen yield (m^3r). 2. Increase of profits ($\$/m^3r$); both under the "without" and "with" sustained yield schemes, for the area of the Zoquiapan Estacion Experimental de Enseñanza e Investigacion Forestal.

The results showed that for the first objective, the 60 and 63 regimes of management must be implemented under the "without" sustained yield scheme, and regimes 43, 47, 48, 51, 52, 56, 59 and 63 under the "with" sustained yield scheme, having a yield in maximum volumen of 3 733 811.214 round cubic meters (m^3r) and 3 733 811.212 m^3r , respectively, in both cases.

On the other hand, for the second objective, the "without" sustained yield scheme suggested the application of the 43 and 44 regimes of management, and under the "with" sustained yield scheme, the solution indicate the application of 1, 2, 9, 15, 21, 26, 45, 46, 47, 48, 52, 59, 60, 63 and 64 regimes of management, having a maximun benefit (profit), of \$2 981 925 723.00 and \$2 019 704 265.23 (viejos pesos), for the first and second case, respectively.

Additionally, it was observed that the analysis of sensibility carried out, did not produce changes on the decision variables associated to the established objectives.

Key words: Silviculture, cutting plan, linear planning, pine forests, *Pinus hartwegii*.

INTRODUCCIÓN.

Se ha mencionado que los procedimientos tradicionales de regulación forestal se caracterizan por basarse en la consecución de un bosque meta (bosque normal), así como

en el mantenimiento de la estructura que se asume necesaria para los objetivos de manejo, sin dar flexibilidad al administrador para un manejo inteligente de las estructuras del recurso sujeto a aprovechamiento¹ ; ².

Sin embargo, las bases de estos métodos de regulación tradicionales, los criterios financieros, la utilización de las técnicas de investigación de operaciones y el empleo del cómputo electrónico, han formado las premisas sobre las cuales se han desarrollado nuevos métodos de regulación que permiten una amplia gama de alternativas de manejo forestal.

De entre las técnicas de investigación de operaciones, la programación lineal es una herramienta de gran utilidad en la planeación forestal, ya que permite el análisis de un gran número de alternativas en la realización de una actividad.

OBJETIVO.

Al considerar la importancia de los aspectos mencionados y al atender la necesidad cada vez más imperante, de la formulación de planes de manejo congruentes con nuestra realidad económica y social, en el presente trabajo se plantean como objetivos:

- Formular un modelo que permita la asignación de alternativa(s) óptima(s) para la regulación de masas coetáneas de *Pinus*, a través de la técnica de programación lineal.
- Aplicar el modelo generado para determinar un plan óptimo de cortas que permita maximizar el volumen (m³/ha) y ganancias (\$/ha) para la Estación Experimental Forestal Zoquiapan.
- Mostrar la eficacia del uso de la programación lineal como técnica alternativa en la formulación de planes de manejo, bajo consideraciones silvícolas y económicas.

ANTECEDENTES.

La programación lineal se ha utilizado ampliamente en el ámbito forestal en países con

¹ Clutter, J. L. et al. 1983. Timber management: a quantitative approach.

² Riveró, B, D. P. 1984. Modelo para la regulación de la corta en bosques coetáneos de clima templado-frío.

un desarrollo forestal avanzado, obteniéndose un aprovechamiento más eficiente de los recursos forestales.

Así, por ejemplo, en Estados Unidos se ha empleado tanto en actividades de recreación³, aprovechamientos maderables⁴, regulación forestal^{5,6}, como en la planeación⁷. A continuación se presentan algunas aportaciones recientes del uso del modelo de programación lineal en el área forestal.

Lyon y Sedjo⁸ aplicaron un modelo de control óptimo de maximización económica, utilizado para examinar a largo plazo la oferta potencial de madera.

Rivero, *op. cit.*, formula un ensayo sobre un modelo para la regulación de corta en bosques coetáneos, el cual pretende maximizar ganancias actualizadas y volumen, bajo un esquema de rendimiento sostenido, al tener como variable decisional la superficie de las unidades de corta en el área de estudio.

Moreno⁹ utilizó el modelo de programación lineal en la planeación de las labores de abastecimiento de la Unidad Industrial de Explotación Forestal (U I E F) Atenquique, Jalisco, consistente en la asignación óptima y maximización de rendimientos de los materiales y equipo, que se usaron en las labores de abastecimiento.

Wijngaard y Reinders¹⁰ desarrollaron un modelo para la planeación de redes óptimas de caminos forestales, que puede ser empleado en terrenos planos y accidentados.

Guzmán¹¹ realizó un estudio en Atenquique, Jalisco, basado en el modelo de transporte, con el cual se minimizan los costos de abastecimiento de materia prima en función de la disponibilidad de recursos (vehículos y posibilidades maderables), y la época de trabajo en el área.

García¹² empleó el modelo de programación lineal para minimizar costos de transporte

³ Navon, D. I. 1971. Timber R A M... a long-range planning method for comercial timber land under multiple-use management.

⁴ Loucks, D. P. 1964. "The development of an optimal program for sustained yield management". pp. 485-490.

⁵ Kidd, W. E. Jr. *et al.* 1966. "Forest regulation by linear programming: A case study". pp. 611-613.

⁶ Leak, W. B. and Filip, S. M. 1970. Cutting strategies and timber yields.

⁷ Barros, O. and Weintraub, A. 1981. "Planning in forest enterprises". pp. 150-163.

⁸ Lyon, K. and Sedjo, R. 1983. "An optimal control model to estimate the regional Long-Term supply of timber". pp. 798-812.

⁹ Moreno, S. R. 1984. Modelo de programación lineal para la planeación de labores de abastecimiento forestal.

¹⁰ Wijngaard, P. and Reinders, M. 1985. "Optimization of forest road network". pp. 175-179.

¹¹ Guzmán, Z. D. 1985. Aplicación de la programación lineal en la solución de un problema de transporte.

¹² García, A. D. 1987. Determinación de un sistema de transporte forestal en la región Costa Grande del estado de Guerrero.

de trocería, considerando tipo de vehículo, destino y procedencia de la madera, así como período de trabajo durante el año.

MATERIALES Y MÉTODOS.

Materiales.

En el presente trabajo se utilizaron como materiales:

- Las tablas de rendimiento de densidad variable para *Pinus hartwegii* Lindl., elaboradas por Torres¹³.
- Fotografías aéreas de la Estación Experimental Zoquiapan.
- Información de precios y costos de elaboración de madera.
- Índices del consumidor del Banco de México.

Métodos

Se empleó el modelo de programación lineal, concebido como una herramienta que permite la asignación de recursos escasos entre actividades competitivas, para tender a un óptimo.

Modelo que está dado por:

$$\begin{array}{l} \text{MAX} \\ \text{o } Z = C_1 X_1 + C_2 X_2 + C_3 X_3 + \dots + C_n X_n \quad (1) \\ \text{MIN} \end{array}$$

sujeto a :

$$a_{11} x_1 + a_{12} x_2 + a_{13} x_3 + \dots + a_{1n} x_n \leq b_1 \quad (2)$$

$$a_{21} x_1 + a_{22} x_2 + a_{23} x_3 + \dots + a_{2n} x_n \leq b_2$$

.

.

.

$$a_{m1} x_1 + a_{m2} x_2 + a_{m3} x_3 + \dots + a_{mn} x_n \leq b_m \quad (3)$$

¹³ Torres, R, J. M. 1984. Tablas de rendimiento de densidad variable para *Pinus hartwegii* Lindl., en la Estación Forestal Experimental Zoquiapan, estado de México.

En el cual la expresión (1) se conoce como función objetivo; (2), como las restricciones de funcionalidad del modelo; (3), como la restricción de no negatividad.

Para la aplicación del modelo previsto se consideraron los aspectos que se mencionan a continuación.

Beneficios y costos.

Los beneficios (precios), derivados de la corta, así como los costos implicados en ésta, necesarios ambos para la evaluación de las alternativas de manejo consideradas, fueron los prevalecientes en la zona donde se ubica el área de estudio.

Tasa de interés.

En los cálculos efectuados en este estudio se consideró una tasa "real" de interés -libre de inflación- del 3%, obtenida a través de la relación:

$$i = \frac{1+n}{1+f} - 1$$

donde:

i = tasa real de interés

n = tasa de interés nominal

f = tasa de inflación

Período de planeación.

Para la determinación de la longitud del período de planeación, el cual representa el tiempo a lo largo del cual se prevén y planean los regímenes de manejo, fue necesario calcular el turno, empleando para esto último los volúmenes correspondientes a la calidad de sitio III, de las tablas de rendimiento aludidas, así como costos, precios y tasa de interés señalados.

El turno se obtuvo al utilizar el criterio valor esperado del suelo (V E S) determinándose un turno de 70 años.

Se definió así un período de planeación de dos veces la longitud del turno, *i e.* 140 años.

Que, de acuerdo con Clutter y coautores *op. cit.*, se recomienda emplear en la evaluación de prácticas de manejo silvícolas.

Unidades de corta.

Las unidades de corta están representadas por áreas geográficas identificables y excluyentes con respecto a otras y que permiten la ejecución de los regímenes de manejo, Rivero *op. cit.*

Se delimitaron al tomar como referencia cada una de las tres calidades de estación para las cuales están elaboradas las tablas de rendimiento mencionadas.

Regímenes de manejo, métodos de tratamiento y cortas intermedias.

Los regímenes de manejo, entendidos como una serie de estrategias posibles de ejecutar, que involucran actividades de cosecha y prácticas silvícolas (cortas intermedias), a efectuarse a lo largo del período de planeación, según lo señalan Clutter y colaboradores *op. cit.*

Que fueron establecidas al tener como base los métodos de tratamiento matarrasa y “árboles padre”, así como varias cortas intermedias de aclareo.

RÉGIMEN DE MANEJO	PERÍODO DE PLANEACIÓN (Décadas)													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	CF			P	A1	A2	A3	CF			P	A1	A2	A3
2	CF			P	A1	A2		CF			P	A1	A2	
3	CF			P	A1			CF			P	A1		
4	CF				A1	A2	A3	CF				A1	A2	A3
5	CF				A1	A2		CF				A1	A2	
6	CF	CF			A1			CF				A1		
7		CF			P	A1	A2	A3	CF			P	A1	A2
8		CF			P	A1	A2		CF			P	A1	A2
9		CF			P	A1			CF			P	A1	
10		CF				A1	A2	A3	CF				A1	A2
11		CF				A1	A2		CF				A1	A2
12		CF				A1			CF				A1	
13			CF			P	A1	A2	A3	CF			P	A1
14			CF			P	A1	A2		CF			P	A1
15			CF			P	A1			CF			P	A1
16			CF				A1	A2	A3	CF				A1
17			CF				A1	A2		CF				A1
18			CF				A1			CF				A1
19				CF			P	A1	A2	A3	CF			P
20				CF			P	A1	A2		CF			P
21				CF			P	A1			CF			P
22				CF				A1	A2	A3	CF			
23				CF				A1	A2		CF			
24				CF				A1			CF			

CF = corta final CS = corta de semillación P = preclareos AJ = aclareo j = 1º, 2º, 3º

Los regímenes de manejo 1 - 42 corresponden al método de regeneración de matarrasa y los regímenes 43-70 corresponden al método de regeneración de "árboles padre".

Cuadro N° 1. Identificación de los regímenes de manejo.

Continuación del cuadro N° 1...

RÉGIMEN DE MANEJO	PERÍODO DE PLANEACIÓN (Décadas)													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
25					CF			P	A1	A2	A3	CF		
26					CF			P	A1	A2		CF		
27					CF			P	A1			CF		
28					CF				A1	A2	A3	CF		
29					CF				A1	A2		CF		
30					CF				A1			CF		
31						CF			P	A1	A2	A3	CF	
32						CF			P	A1	A2		CF	
33						CF			P	A1			CF	
34						CF				A1	A2	A3	CF	
35						CF				A1	A2		CF	
36						CF				A1			CF	
37							CF			P	A1	A2	A3	CF
38							CF			P	A1	A2		CF
39							CF			P	A1			CF
40							CF				A1	A2	A3	CF
41							CF				A1	A2		CF
42							CF				A1			CF
43	CS	CF		P	A1	A2	CS	CF		P	A1	A2	CS	CF
44	CS	CF		P	A1		CS	CF		P	A1		CS	CF
45	CS	CF			A1	A2	CS	CF			A1	A2	CS	CF
46	CS	CF			A1		CS	CF			A1		CS	CF
47		CS	CF		P	A1	A2	CS	CF		P	A1	A2	CS
48		CS	CF		P	A1		CS	CF		P	A1		CS

C F = corta final C S = corta de semillación P = preclareos A J = aclareo j = 1°, 2°, 3°

Los regimenes de manejo 1 - 42 corresponden al método de regeneración de matarrasa y los regimenes 43-70 corresponden al método de regeneración de "árboles padre".

Cuadro N° 1. Identificación de los regimenes de manejo.

Continuación del cuadro N° 1...

RÉGIMEN DE MANEJO	PERÍODO DE PLANEACIÓN (Décadas)													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
49	CS	CF				A1	A2	CS	CF			A1	A2	CS
50	CS	CF				A1		CS	CF			A1		CS
51		CS	CF			P	A1	A2	CS	CF		P	A1	A2
52		CS	CF			P	A1		CS	CF		P	A1	
53		CS	CF				A1	A2	CS	CF			A1	A2
54		CS	CF				A1		CS	CF			A1	
55			CS	CF			P	A1	A2	CS	CF		P	A1
56			CS	CF			P	A1		CS	CF		P	A1
57			CS	CF				A1	A2	CS	CF			A1
58			CS	CF				A1		CS	CF			A1
59				CS	CF			P	A1	A2	CS	CF		P
60				CS	CF			P	A1		CS	CF		P
61				CS	CF				A1	A2	CS	CF		
62				CS	CF				A1		CS	CF		
63					CS	CF			P	A1	A2	CS	CF	
64					CS	CF			P	A1		CS	CF	
65					CS	CF				A1	A2	CS	CF	
66					CS	CF				A1		CS	CF	
67						CS	CF			P	A1	A2	CS	CF
68						CS	CF			P	A1		CS	CF
69						CS	CF				A1	A2	CS	CF
70						CS	CF				A1		CS	CF

CF = corta final CS = corta de semillación P = preclareos AJ = aclareo j = 1°, 2°, 3°

Los regímenes de manejo 1 - 42 corresponden al método de regeneración de matarrasa y los regímenes 43-70 corresponden al método de regeneración de "árboles padre".

Cuadro N° 1. Identificación de los regímenes de manejo.

Distribución de productos.

Se consideraron dos tipos de productos:

- Madera para aserrió
- Madera para material celulósico.

Debido a que éstas son las principales materias primas que utiliza la industria forestal en la región.

Con este tipo de productos se manejaron dos distribuciones de productos:

- 60-30
- 70-20.

Expresados porcentualmente y en las cuales los valores más elevados, en ambos casos, se refieren a la madera para aserrió, y los valores menores a madera para material celulósico.

Al atender a los objetivos planeados, maximización de rendimientos volumétricos y maximización de ganancias y de acuerdo a la forma del modelo utilizado, se obtuvieron las siguientes formulaciones.

1. Maximización del rendimiento en volumen

$$\text{MAX. } M = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{70} V_{ij} X_{ij}$$

sujeto a las restricciones de:

- a) Superficie

$$\sum_{i=1}^{70} X_{ij} \leq A_i$$

en donde:

$$i = 1, 2, 3.$$

b) Rendimiento sostenido

$$\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{70} \sum_{l=1}^{13} V_{ij} X_{ij} (1-0.10) \leq \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{70} \sum_{l=1}^{13} V_{ij} (1+1) X_{ij}$$

Límite inferior

$$\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{70} \sum_{l=1}^{13} V_{ij} X_{ij} (1+0.10) \geq \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{70} \sum_{l=1}^{13} V_{ij} (1+1) X_{ij}$$

Límite superior

en donde:

- i = 1, 2, 3. unidades de corta
- j = 1, 2, . . . , 70 regímenes de manejo
- l = 1, 2, . . . , 13 períodos de corta.

2. Maximización de ganancias

$$\text{Max. G.} = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{70} \sum_{k=1}^2 G_{ijk} X_{ijk}$$

sujeto a:

$$\sum_{j=1}^{70} \sum_{k=1}^2 X_{ijk} \leq A_i$$

en la cual:

- i = 1, 2, 3 unidades de corta
- j = 1, 2, . . . , 70 regímenes de manejo
- k = 1, 2. distribución de productos

Análisis de sensibilidad.

El análisis de sensibilidad se realizó al cambiar los valores de los beneficios (\$/ha) y la tasa de interés establecidas con anterioridad, empleando las combinaciones que se muestran a continuación.

Beneficio*		Tasa de interés
\$2 150.00**	\$ 875.00***	2%
\$ "	"	3%
\$ "	"	4%
\$4 300.00**	\$1 750.00***	2%
\$ "	"	3%
\$ "	"	4%
\$9 675.00**	\$3 940.00***	2%
\$ "	"	3%
\$ "	"	4%

RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

Se presentan los resultados de las dos formulaciones definidas:

1. Maximización del rendimiento en volumen

2. Maximización de ganancias.

Que bajo la consideración (restricción), de manejo "Sin" y "Con" rendimiento sostenido así como con la tasa de interés de 3% y los precios de \$4 300.00* para madera aserrada y \$1 250.00* para material celulósico, y la distribución de productos de 60% y 32% para aserrío y material celulósico, respectivamente, integran los escenarios centrales del modelo planteado.

1. Maximización del rendimiento en volumen.

a) Sin la restricción de rendimiento sostenido.

Para esta formulación y bajo este esquema, la solución factible óptima indica que el total

* Viejos pesos.

* Aserrío.

** Material celulósico.

de la superficie de la unidad de corta 1, debe asignarse al régimen de manejo N° 60. Para las unidades de corta 2 y 3, se debe asignar toda la superficie disponible de éstas al régimen de manejo N° 63. Estas asignaciones permiten obtener un rendimiento en volumen máximo de 3 733 811.214 m³r.

Se observa que en esta solución, los regímenes de manejo asignados, corresponden al método de tratamiento de "árboles padre" indicado en el cuadro 1 *vid., supra*.

Se apunta también que por cada unidad, sea positiva o negativa, que se destine a la superficie de las unidades de corta 1, 2 y 3, el rendimiento en volumen total se incrementa o decrementa en 2 546.674 m³r, 1 773.877 m³r y 1 662.864 m³r, respectivamente, *i.e.* los precios sombra a las superficies asignadas en la solución óptima.

b) Con la restricción de rendimiento sostenido.

Cuando se decide seguir la política de manejo de tener rendimiento sostenido, la asignación de regímenes de manejo y sus correspondientes superficies, es la que se indica en el cuadro 2.

UNIDAD DE CORTA	SUPERFICIE ASIGNADA (ha)	RÉGIMEN DE MANEJO
1	110 736 91	48
	114 900 14	52
	236 362 95	56
2	259 496 14	43
	92 010 45	47
	160 537 63	51
	1 399 62	56
	98 556 15	63
3	219 727 61	47
	345 407 01	59
	319 865 38	63

Cuadro N° 2. Asignación de superficie entre regímenes de manejo, por unidad de corta, al maximizar rendimiento en volumen, con la restricción de rendimiento sostenido.

Las asignaciones anteriores implican obtener un rendimiento en volumen (m^3r) máximo, durante el período de planeación de 3 733 811.212 $m^3 r$.

Los precios sombra asociados a las superficies de corta en esta solución, se comportan de igual manera que en el esquema anterior, es decir, los mismos valores para cada unidad de corta.

2. Maximización de ganancias.

a) Sin la restricción de rendimiento sostenido.

Para este caso, la solución óptima señala que el total de la superficie correspondiente a la unidad de corta 1, debe asignarse al régimen de manejo N° 48, en tanto que el total de la superficie perteneciente a las unidades de corta 2 y 3, sea asignada al régimen de manejo N° 44.

Con esta asignación se obtiene una ganancia máxima (en valor neto actual), a lo largo del período de planeación de \$2 981 925 723.00*.

La solución indica, además, que por cada unidad que se asigne (positiva o negativa), a la superficie considerada en las unidades de corta 1, 2 y 3, el valor de la función objetivo se incrementa o decrecienta en los valores de \$2 597 409.00*, \$971 075.00* y \$1 341 949.00*, respectivamente, para cada unidad de corta.

b) Con la restricción de rendimiento sostenido.

Si la política de manejo se orienta hacia un rendimiento sostenido cuando se tiene como objetivo la maximización de ganancias, la solución óptima indica que la asignación debe ser la presentada en el cuadro 3.

Con esta solución se tiene entonces una ganancia máxima de \$2 019 704 265.23*.

Los precios sombra asociados a cada una de las unidades de corta son \$1 730 212.00* para la unidad de corta 1, \$795 536.00* para la unidad de corta 2 y \$828 788.00* para la unidad de corta 3.

Esta solución sugiere la aplicación del método de tratamiento de matarrasa cuando se asignan los regímenes de manejo 1, 2, 9, 15, 25 y 26, así como el método de "árboles padre" al asignar los regímenes 45, 46, 47, 48, 52, 59, 60, 63 y 64.

* Viejos pesos.

UNIDAD DE CORTA	SUPERFICIE ASIGNADA (ha)	RÉGIMEN DE MANEJO
1	19 086 26	1
	73 207 35	2
	19 561 48	21
	260 403 11	45
	89 741 80	47
2	72 044 30	26
	89 623 06	45
	162 722 46	46
	253 752 29	59
	33 857 89	63
3	122 860 54	9
	263 240 01	15
	122 669 29	48
	264 826 77	52
	71 724 06	60
	39 679 34	64

Cuadro N° 3. Asignación óptima de superficie entre regímenes de manejo, por unidad de corta, cuando se maximizan ganancias con la restricción de rendimiento sostenido.

En la presente formulación (maximización de ganancias), la previsión de los esquemas "Sin" y "Con" rendimiento sostenido, implica cambios considerables en la asignación de los regímenes de manejo y beneficios derivados de tales asignaciones.

Se tiene que, en relación a los beneficios "Con" rendimiento sostenido, implica tener un nivel de beneficio (ganancias), de \$962 221 457.77* por abajo de los beneficios obtenidos con el esquema "Sin" rendimiento sostenido.

Análisis de sensibilidad.

El análisis de sensibilidad efectuado no produjo cambios en la asignación de superficies y regímenes de manejo, dados en la solución óptima para el escenario central aludido.

* Viejos pesos.

En adición al análisis de sensibilidad mencionado, se efectuó a través del paquete de cómputo empleado, un análisis de sensibilidad en torno a los escenarios centrales discutidos con anterioridad, y se observó de manera sobresaliente lo siguiente:

Rango de factibilidad.

Nivel en que se puede "mover" el coeficiente del lado derecho de las restricciones sin tener que cambiar de base.

En el presente estudio se refiere a los límites en que se puede "mover" o variar la cantidad de tierra de cada unidad de corta, sin que la variable elegida deje de formar parte activa en la solución óptima.

Rango de optimización.

Nivel en que se puede "mover" el costo o beneficio sin que la variable(s) asignada(s) en la solución óptima se sustituya(n) por otra.

En este caso, se refiere a los rangos de producción y ganancias de las formulaciones consideradas.

Los cuadros 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 y 11 muestran los rangos de factibilidad y de optimización asociados a los esquemas planteados en las formulaciones previstas.

1. Maximización del rendimiento en volumen.

a) Sin la restricción de rendimiento sostenido.

UNIDAD DE CORTA	SUPERFICIE ASIGNADA (ha)		
	Solución óptima	Límite inferior	Límite superior
1	462	no existe	infinito
2	612	no existe	infinito
3	885	no existe	infinito

Cuadro N° 4. Rangos de factibilidad asociados a la superficie por unidad de corta, cuando se maximiza el rendimiento en volumen sin rendimiento sostenido.

VARIABLE ASIGNADA	BENEFICIO ACTUAL	RANGO	VARIABLE QUE INGRESA A LA BASE
X_{160}	2 546.673 83	2 546.673 83 2 546.673 83	X_{144}
X_{263}	1 773.876 95	1 773.876 95 1 773.876 95	X_{243}
X_{363}	1 662.863 89	1 662.863 89 1 662.863 89	X_{343}

Cuadro N° 5. Rango de optimización de las variables asignadas en la solución óptima al maximizar rendimiento en volumen sin rendimiento sostenido.

b) **Con la restricción de rendimiento sostenido.**

UNIDAD DE CORTA	SUPERFICIE ASIGNADA (ha)		
	Solución óptima	Límite inferior	Límite superior
1	462	231.973 69	469.623 58
2	612	603.068 59	643.057 66
3	885	868.693 49	1 012.876 01

Cuadro N° 6. Rangos de factibilidad asociados a la superficie por unidad de corta, cuando se maximiza el rendimiento en volumen con rendimiento sostenido.

VARIABLE ASIGNADA	BENEFICIO ACTUAL	RANGO	VARIABLE QUE INGRESA A LA BASE
X ₁₄₈	2 546.67383	2 546.67335 2 546.67404	X ₁₆₀ X ₃₅₁
X ₁₅₂	2 546.67383	2 546.67356 2 546.67509	X ₃₅₁ X ₃₄₃
X ₁₅₆	2 546.67383	2 546.67288 2 546.67658	X ₃₅₁ REMA 22
X ₂₄₃	1 773.87695	1 773.87667 1 773.87795	X ₃₄₃ X ₃₅₁
X ₂₄₇	1 773.87695	1 773.87672 1 773.87722	REMA 22 X ₃₄₃
X ₂₅₁	1 773.87695	1 773.87679 1 773.87739	X ₃₅₁ REMA 22
X ₂₅₆	1 773.87695	1 773.87471 1 773.87700	X ₂₅₅ REMA 6
X ₂₆₃	1 773.87695	1 773.87684 1 773.87756	X ₂₅₉ REMA 22
X ₃₄₇	1 662.86389	1 662.86381 1 662.86407	X ₃₅₁ X ₁₆₀
X	1 662.86389	1 662.86380 1 662.86445	X ₂₅₉ REMA 22
X ₃₆₃	1 662.86389	1 662.86368 1 662.86397	REMA 22 X ₂₅₉

Cuadro N° 7. Rango de optimización de las variables asignadas en la solución óptima al maximizar rendimiento en volumen, con rendimientos sostenidos.

2. Maximización de ganancias.

a) Sin la restricción de rendimiento sostenido.

UNIDAD DE CORTA	SUPERFICIE ASIGNADA (ha)		
	Solución óptima	Límite inferior	Límite superior
1	462	no existe	infinito
2	612	no existe	infinito
3	885	no existe	infinito

Cuadro N° 8. Rangos de factibilidad asociados a la superficie por unidad de corta, cuando se maximizan ganancias sin rendimiento sostenido.

VARIABLE ASIGNADA	VALOR ACTUAL (viejos pesos)	RANGO	VARIABLE QUE INGRESA A LA BASE
X_{143}	2 597 408.00	2 587 273.00 infinito	X_{144} no hay
X_{244}	971 075.00	964 492.00 infinito	X_{243} no hay
X_{344}	1 341 949.00	1 335 754.00 infinito	X_{343} no hay

Cuadro N° 9. Rango de optimización de las variables asignadas en la solución óptima al maximizar ganancias sin rendimiento sostenido.

b) Con la restricción de rendimiento sostenido.

UNIDAD DE CORTA	SUPERFICIE ASIGNADA (ha)		
	Solución óptima	Límite inferior	Límite superior
1	462	427.061 86	617.742 61
2	612	550.595 17	705.466 02
3	885	743.552 25	934.752 14

Cuadro N° 10. Rangos de factibilidad asociados a la superficie por unidad de corta, cuando se maximizan ganancias con rendimiento sostenido.

VARIABLE ASIGNADA	BENEFICIO ACTUAL	RANGO	VARIABLE QUE INGRESA A LA BASE
X ₁₁	2 256 493.00	2 255 162.146 48 2 262 862.112 30	X ₁₄ REMA 15
X ₁₂	2 248 849.00	2 241 928.968 36 2 253 404.146 48	REMA 25 X ₁₄
X ₁₂₁	910 420.00	83 139.250 00 1 239 684.250 00	REMA 21 REMA 5
X ₁₄₅	2 548 940.00	2 506 023.742 19 2 557 057.041 02	X ₁₄₃ REMA 21
X ₁₄₇	1 928 736.00	1 921 149.000 98 2 022 837.828 12	X ₁₄₈ REMA 14
X ₂₂₆	241 232.00	193 230.500 00 335 308.179 69	REMA 3 REMA 8
X ₂₄₅	869 089.00	858 471.976 56 937 457.625 00	REMA 21 X ₁₄
X ₂₄₆	874 926.00	837 699.453 13 937 457.625 00	REMA 21 X ₁₄
X ₂₅₃	382 116.00	376 409.101 56 416 102.625 00	REMA 21 X ₂₂₇
X ₂₆₃	204 154.00	176 834.726 56 207 496.930 42	X ₂₂₇ REMA 21
X ₃₃	816 421.00	801 194.798 83 995 860.421 88	REMA 21 REMA 25
X ₃₁₅	602 746.00	576 177.656 25 778 377.187 50	REMA 21 X ₂₆₀
X ₃₄₈	994 037.00	965 909.171 88 1 005 546.096 68	X ₃₅₀ REMA 21
X ₃₅₂	735 158.00	702 306.968 75 752 561.515 63	X ₃₅₁ REMA 21
X ₃₆₀	399 192.00	389 871.308 59 405 690.917 97	X ₃₅₉ REMA 21
X ₃₆₄	292 537.00	287 406.274 90 324 822.468 75	REMA 21 X ₂₂₇

Cuadro N° 11. Rango de optimización de las variables asignadas en la solución óptima al maximizar ganancias con rendimiento sostenido.

CONCLUSIONES.

Para las condiciones de este trabajo y de acuerdo con los resultados presentados, se establecen las siguientes conclusiones:

- Las condiciones de optimización, asociadas a los objetivos previstos, presentan diferencias entre si.

- Para cualesquiera de los escenarios previstos, la solución óptima sugiere utilizar toda la superficie disponible de las tres unidades de corta que integran el área de estudio.

- La no consideración de un esquema de rendimiento sostenido permite, para los dos objetivos planteados, el incremento ilimitado del recurso suelo, sin tener que cambiar las asignaciones dadas en la solución óptima.

- La elección de la política de rendimiento sostenido, implica una disminución importante en los niveles de beneficio, en términos financieros.

- El esquema sin rendimiento sostenido, excluye la posibilidad de asignar regímenes de manejo asociados con el método de tratamiento de matarrasa.

- La solución óptima es muy inestable en relación a los coeficientes técnicos de beneficios.

BIBLIOGRAFÍA.

Barros, O. and Weintraub, A. 1981. "Planning in forest enterprises". In: Symposium on Forest management planning; present, practice and future decisions. Blacksbur, Virginia School of Forestry and Wildlife Resources. pp. 150-163.

Clutter, J. L.; Forston, J. C; Pienaar, L. V; Brister, G. H. and Bayley, R. L. 1983. Timber management: a quantitative approach. Ed John Wiley & Sons. New York. 333 p.

García, A. D. 1987. Determinación de un sistema de transporte forestal, en la región Costa Grande del estado de Guerrero. Tesis Profesional. Especialista en Bosques. U A C H. Chapingo, México.

- Guzmán, Z. D. 1985. Aplicación de la programación lineal en la solución de un problema de transporte. Tesis Profesional. Especialista en Bosques. U A C H. Chapingo, México. 145 p.
- Kidd, W. E. Jr; Thompson, E. F. and Hoepner, P. H. 1966. "Forest regulation by linear programming: A case study". *Journal of Forestry*. 64 (9). pp. 611-613.
- Leak, W. B. and Filip, S. M. 1970. Cutting strategies and timber yields. Upper Derby, Pacific Northeast Forest Experiment Station Resources. Pa. N E. N° 53. 19 p.
- Loucks, D. P. 1964. "The development of an optimal program for sustained yield". *Management Journal of Forestry*. N° 62. pp. 485-490.
- Lyon, K. and Sedjo, R. 1983. "An optimal control model to estimate the regional Long-Teim supply of timber". *U S A. Forest Science* 29(4). pp. 798-812.
- Moreno, S. R. 1984. Modelo de programación lineal para la planeación de labores de abastecimiento forestal. Tesis Profesional. Especialista en Bosques U A C H. Chapingo, México. 179 p.
- Navon, D. I. 1971. Timber RAM. . . a long-range planning method for comercial timber land under multiple use management. Pacifics Southwest Forest and Range Experiment Station. Berkeley, U S A.
- Rivero, B. D. P. 1984. Modelo para la regulación de la corta en bosques coetáneos de clima templado-frío. Tesis Profesional. Especialista en Bosques. U A C H. Chapingo, México. 115 p.
- Torres, R. J. M. 1984. Tablas de rendimiento de densidad variable para *Pinus hartwegii* Lindl., en la Estación Forestal Experimental Zoquiapan, estado de México. Tesis Profesional. Especialista en Bosques. U A C H. Chapingo, México. 278 p.
- Wijngaard, P. and Reinders, M. 1985. "Optimization of forest road network". *Netherlands Journal of Agriculture Sciences*. 33(2). pp. 175-179.