Optimización de redes de carreteras forestales para uso múltiple de caza y silvicultura

Tiare Cristell Camacho Medina
Instituto Tecnológico Superior de Comalcalco
camacho.tiare@gmail.com
Roger Z. Ríos Mercado
División de Posgrado de Ingeniería en Sistemas, FIME, UANL
roger.rios@uanl.edu.mx
María Gabriela Sandoval Esquivel
Universidad de las Américas de Puebla, UDLAP
maria.sandovalel@udlap.mx

RESUMEN

En este artículo se muestra la aplicación de un modelo matemático que permite la toma de decisiones en un ambiente de gestión forestal, donde del problema se conoce cuáles segmentos de caminos forestales conectan a cada proyecto potencial, para obtener una red de caminos bien diseñada. El objetivo es maximizar el beneficio neto dado por los ingresos del proyecto, menos el costo de construcción de los caminos para proporcionar al menos una cantidad razonable de días de caza, así como días para cosechar madera anualmente. Este problema de optimización de redes de caminos para uso múltiple de caza y silvicultura es modelado como un programa lineal entero mixto. Se presenta un ejemplo y casos de estudio que ilustran la utilidad del modelo. Este se resuelve con GAMS / CPLEX, software del estado del arte para la resolución de problemas de optimización.

PALABRAS CLAVE

Investigación de operaciones, gestión forestal, programación lineal entera, diseño de red de carreteras.

ABSTRACT

This article illustrates the application of a mathematical model that allows decision making in a forest management environment, where it is known which segments of forest roads connect to each potential project to obtain a well-designed road network. The objective is to maximize the net benefit given by the project income minus the cost of building the roads to provide at least a reasonable amount of hunting days per year as well as days to harvest timber. This problem of optimization of road networks for multiple hunting and forestry use is modeled as a mixed integer program. We present an example and a case studies that illustrate the utility of the model. The model is solved with GAMS / CPLEX, a which is state-of-the-art software for solving optimization problems.

KEYWORDS

Operations research, forest management, integer linear programming, road forest network.

INTRODUCCIÓN

Las primeras actividades formales de investigación de operaciones (IO) se iniciaron en Inglaterra durante la Segunda Guerra Mundial, cuando un equipo de científicos empezó a tomar decisiones con respecto a la mejor utilización del material bélico. Al término de la guerra, las ideas formuladas en operaciones militares se adaptaron para mejorar la eficiencia y productividad en el sector civil.

La consideración de la IO por las matemáticas como una de sus ramas, lleva a entenderla como el uso de modelos matemáticos, estadística y algoritmos, para auxiliar procesos de toma de decisiones. Dentro de este campo generalmente se la asocia con la programación lineal (PL), cuyos orígenes algunos autores inclusive los remontan a los siglos XVII y XVIII, con los aportes de Newton, Leibnitz, Bernoulli, Lagrange, hasta Fourier a principios del XIX. Sin embargo, los aportes de matemáticos y economistas como Von Neumann, Koopmans, y Kantoróvich, entre otros, fueron los que comenzaron a darle forma consistente a esta disciplina, hasta que el físico y matemático George Dantzig propusiera en 1947 el algoritmo simplex para resolver problemas de programación lineal.[1]

La programación lineal está enfocada en modelos con funciones objetivo y restricciones lineales. Otras técnicas incluyen la programación entera (en la cual las variables asumen valores enteros), la programación dinámica (donde el modelo original puede descomponerse en subproblemas más pequeños y manejables). La programación de red (en la cual el problema puede modelarse como una red), y la programación no lineal (en la que las funciones del modelo son no lineales). Éstas son sólo algunas de las muchas herramientas de IO con que se cuenta. Una peculiaridad de la mayoría de las técnicas de IO es que por lo general las soluciones no se obtienen en forma cerrada (como si fueran fórmulas), sino que más bien se determinan mediante algoritmos. Éstas proporcionan reglas fijas de cálculo que se aplican en forma repetitiva al problema, y cada repetición (llamada iteración) acerca la solución a lo óptimo. En general, la metodología de solución sigue los siguientes pasos:

- Definición del problema
- Construcción del modelo

- Solución del modelo
- Validación del modelo
- Implementación de la solución

La investigación de operaciones se ha aplicado ampliamente en áreas tan diversas como la fabricación, el transporte, la construcción, las telecomunicaciones, la planificación financiera, la atención médica, los servicios públicos, y la gestión de recursos forestales, por nombrar solo algunos. Por lo tanto, la amplitud de la aplicación es bastante extensa.[1]

El manejo de recursos forestales tiene como base el concepto de rendimiento sostenido, que se refiere a la capacidad de las áreas boscosas de proveer de manera permanente y óptima los múltiples bienes y servicios que la sociedad demanda.[2]

Los bosques son complejos sistemas abiertos con múltiples funciones; para mantener altos estándares y la credibilidad de la opinión pública, los responsables del manejo de recursos forestales requieren integrar la experiencia de diferentes disciplinas científicas, incluyendo las humanidades, la física, la ingeniería y las ciencias biológicas, aunque no necesariamente en ese orden. Con frecuencia se postula que el manejo forestal debe ser sustentable, basarse en resultados de investigación validados y ser acorde con estándares ambientales aceptables.[3]

La decisión sobre la construcción de carreteras específicas para acceder a las áreas de cosecha se inició a mediados de los 70's[4] y fue necesaria a las necesidades económicas y sociales del manejo forestal, Desde hace algunas décadas, el manejo forestal considera tres factores en el proceso de toma de decisiones: el económico, el social y el ecológico, que orientan la cosecha de productos o la provisión de servicios ambientales de acuerdo con las capacidades de los ecosistemas. En este sentido, se toma en cuenta la relación que existe entre el bienestar social y la preservación de los ecosistemas forestales.[5]

El manejo forestal estratégico hace referencia a que las agencias gubernamentales y las empresas privadas suelen utilizar la programación lineal para gestionar a largo plazo, por ejemplo, 200 años de planificación. Durante el horizonte de planeación, los modelos abordan dos o tres rotaciones de árboles de 80 años.

Para la planeación es necesario considerar las políticas silvícolas y la recolección agregada que se consideran como preocupaciones ambientales y de producción.[6]

Fue entonces hasta el siglo XXI que la tendencia de manejar el bosque se dio en el marco de una visión ecosistémica, paisajista, integral, participativa y de uso múltiple. Todo esto orientado a la obtención del rendimiento sostenido de los diversos productos, bienes y servicios que ofrece, con el fin de mejorar las condiciones y calidad de vida de la sociedad, dando origen al concepto de Manejo Forestal Sustentable o Manejo Forestal Sostenible (MFS).

El manejo forestal sustentable moderno se concibe entonces, como un sistema de toma de decisiones multiobjetivo que atiende los factores ecológico, económico y social. Lejos ha quedado el concepto de considerar la madera como único bien aprovechable y, como indicador de buen manejo, el minimizar los impactos ambientales de la cosecha.[5] Un ejemplo claro del manejo forestal es la gestión de los recursos mismos, ya que ésta es la ciencia de tomar decisiones con respecto a la organización, el uso y la conservación de los bosques y los recursos relacionados. Los bosques pueden ser gestionados de forma activa en busca de madera, agua, vida silvestre, recreación o una combinación de los mismos. La administración también incluye la alternativa de "no intervención": dejar que la naturaleza siga su curso. Los administradores de los recursos forestales deben tomar decisiones que afectan tanto al futuro a muy largo plazo es decir a 5 o hasta más de 20 años como lo son las actividades cotidianas del bosque. Las decisiones pueden tratar con sistemas forestales muy complejos o con partes simples; el área geográfica de preocupación puede ser un país entero, una región, un solo grupo de árboles o una instalación industrial.

DESCRIPCION DEL PROBLEMA

Las carreteras son un gran problema en el sector forestal, ya que la necesidad de acceso debe equilibrarse con los efectos ambientales negativos de las carreteras y su construcción, por lo tanto, a menudo es necesario diseñar redes de carreteras lo más económicamente posible al tiempo que se cumplen diversos objetivos de gestión. Los métodos de optimización pueden ser de gran ayuda en este proceso, debido a que cada sección de carretera debe construirse para conectar dos ubicaciones o no construirse en absoluto, la programación entera con variables (0, 1) es una forma natural de abordar tales problemas.[7]

Este problema se basa en el estudio del diseño de redes viales eficientes para proporcionar acceso a proyectos de cacería y producción de madera, al construir una red de caminos forestales, los segmentos de caminos generalmente deben vincular puntos específicos en una red continua. Construir sólo una porción de una sección de camino sería inútil.

En el problema bajo estudio, se consideran quince proyectos de uso múltiple los cuales proporcionarían madera y caza. Asimismo, los proyectos están representados en la figura 1 por letras (nodos) donde estos son las intersecciones o puntos de unión de la red. Cada proyecto debe estar conectado por una carretera a la carretera existente que se muestra como una línea continua. Las líneas punteadas son los arcos, es decir, los segmentos de camino que

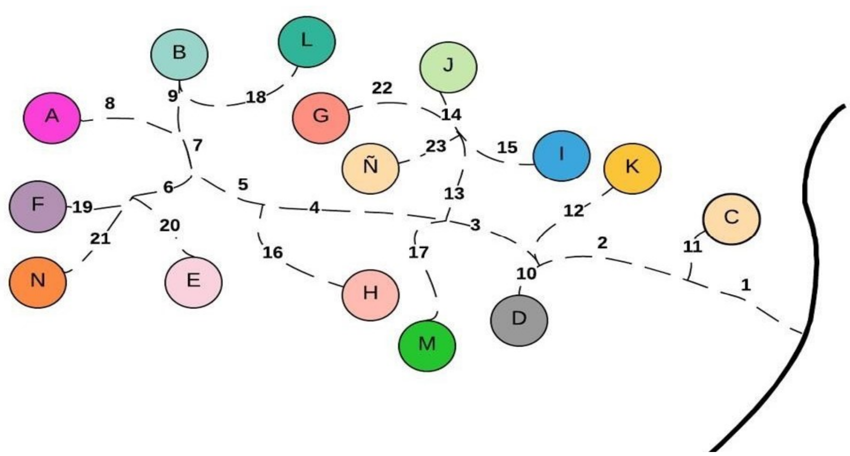

Fig. 1. Red de caminos para el desarrollo forestal de uso múltiple. Las líneas punteadas indican los segmentos de caminos para cada proyecto.

podrían construirse, tales líneas conectan a los nodos, que en este caso, son los proyectos. Cada segmento de camino se identifica por un número con el que podemos identificarlo en la tabla I donde se les asigna un costo de construcción, cada proyecto debe hacerse por completo o no hacerse en absoluto. De los 15 proyectos solo deben llevarse a cabo 10 como máximo, ya que esta es una de las condiciones que se da en el planteamiento del problema; por lo tanto, no se puede usar el método simple del árbol de expansión o métodos semejantes.

Por otro lado, los proyectos que se realizan deben estar conectados a la carretera existente la que se indica con una línea sólida en la figura 1, porque requerirán algún tipo de acceso por carretera. El costo de construir un proyecto dependerá totalmente de los ingresos, ingreso estimado que proporcionaría cada uno, así como de las ganancias que dejaría el construir dicho proyecto.

Para dar solución al problema se tomaron en cuenta los siguientes parámetros mostrados en las tablas I y II.

Por ejemplo, si se quiere construir el proyecto A, es especialmente costoso porque incluye varios segmentos de camino como lo son 1, 2, 3, 4, 5, 7 y 8 con un costo de $495,000 dólares. Los ingenieros civiles adjuntos al proyecto han estimado los costos de cada segmento de camino, que se muestran en la tabla I.

Estos costos son el costo acumulativo de construir y mantener las carreteras durante toda la vida del proyecto. La tabla II nos indica los beneficios de construir cada proyecto. Entonces, el objetivo del problema es maximizar el beneficio neto obtenido de los suficientes ingresos de los proyectos para cubrir los costos totales de la construcción de carreteras.

Tabla I. Costos de construir y mantener cada segmento de camino

Costos de cada segmento												
Segmentos de camino	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Costos ($\$10^3$)	90	75	80	70	90	70	50	40	60	50	65	70

Costos de cada segmento											
Segmentos de camino	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Costos ($\$10^3$)	85	60	50	40	90	65	45	70	75	20	25

Tabla II. Los beneficios con respecto a cada proyecto.

Proyecto	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	Ñ
Días de caza (100/y)	2	3	1	1	2	3	1	3	1	2	1	1	2	3	2
Madera ($10^3 m^3$/y)	6	9	13	10	8	3	6	8	5	11	9	10	6	13	8
Ingresos ($\$10^3$)	70	130	140	130	110	100	140	70	90	110	100	150	80	130	120

A continuación se plantea un modelo de programación entera mixta para este problema. Primero definimos las variables de decisión. Las variables de decisión están dadas por: $y_j = 1$, si el proyecto j se lleva a cabo, = 0 de otro modo; $x_i = 1$, si el segmento de camino i se construye, = 0, de otro modo, donde claramente, el índice j denota cada uno de los proyectos y el índice i denota los segmentos de camino.

Ahora bien, el modelo se plantea como sigue:

Maximizar:

$$z = \sum_{j=1}^{a} r_j y_j - \sum_{i=1}^{b} c_i x_i$$

Sujeto a:

$$\sum_{j=1}^{a} h_j y_j \geq d$$

$$\sum_{j=1}^{a} t_j y_j \geq e$$

$$\sum_{j=1}^{a} y_j \geq f$$

$$\sum_{i \in \delta(j)} x_i \geq |\delta(j)| y_j \qquad j = 1, \ldots, a$$

$$x_i \in \{0,1\} \qquad i = 1, \ldots, a$$

$$y_j \in \{0,1\} \qquad j = 1, \ldots, b$$

donde:

a=Número total de proyectos

j= Índice asociado al conjunto de proyectos

r_j=Ingreso del proyecto j

b=Número de segmentos de caminos

i=Índice asociado al conjunto de segmentos de caminos

c_i=costos de construir el segmento de camino i

d=Minímo número de días de caza al año

h_j=Días de caza requeridos por el proyecto j

e=Mínimo número de metros para cosechar madera al año

t_j=Volumen de madera requeridos por el proyecto j

f=Máximo número de proyectos al año

$\delta(j)$= conjunto de segmentos de caminos necesarios para el proyecto j

Donde el objetivo es maximizar el beneficio neto dado por los ingresos del proyecto menos el costo de construcción de la carretera. La segunda restricción nos dice que se deben proporcionar al menos 800 días de caza al año.

La tercera restricción indica que se deben cosechar al menos 60,000 m^3 de madera anuales. El mayor número de proyectos a realizar debe cumplir con la cuarta restricción. Por último, la quinta restricción establece la relación entre las variables x_i y y_j, es decir, si y_j=1, esto obliga a que todos los segmentos asociados al proyecto *j* se construyan.

Este es un modelo de programación lineal entera dado que las restricciones y la función objetivo son funciones lineales y las variables de decisión requieren ser enteras.

Tenemos que en el ejemplo dado anteriormente, los parámetros quedarían de la siguiente manera:

a=15 proyectos

b=23 segmentos de carreteras

d=Mínimo de 800 días de caza al año

e=Mínimo 60,000 m^3 de madera al año

f=Máximo 10 proyectos al año

METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN

El modelo de este problema se resuelve mediante GAMS, el cual es un software de modelación algebráica con interfaz a varios métodos de solución u optimizadores. En este caso, por tratarse de un problema de programación entera, se recurre a resolverlo con el método de ramificación y acotamiento, el cual es un algoritmo que consiste en efectuar una enumeración inteligente, de todas las combinaciones diferentes que pueden tomar las variables enteras. En particular, se hace uso del módulo optimizador GAMS/CPLEX. CPLEX es una colección de algoritmos de optimización del estado del arte.

El software utilizado es GAMS (General Algebraic Modeling System) el cual es un entorno para definir, analizar y resolver problemas de optimización. GAMS fue desarrollado para mejorar diversas situaciones, por ejemplo:

- Proporcionar un lenguaje de alto nivel para la representación compacta de modelos grandes y complejos.
- Posibilitar cambios en las especificaciones del modelo de forma sencilla y segura.
- Permitir declaraciones inequívocas de relaciones algebraicas.
- Admitir descripciones de modelo que son independientes de los algoritmos de solución.

EXPERIMENTACIÓN COMPUTACIONAL

Al resolver el ejemplo anterior, se obtiene como solución que los ingresos fueron mayores que los costos de construir los segmentos de carreteras con un superávit de $345,000 teniendo 1,600 días de caza al año y 87,000 m^3 de madera al año.

Para ilustrar mejor el proceso, recurrimos ahora a una instancia de mucho mayor tamaño. Por ejemplo, ahora se consideran 50 proyectos de los cuales solo se pueden poner en marcha solo 40 de ellos, donde los segmentos de camino ahora

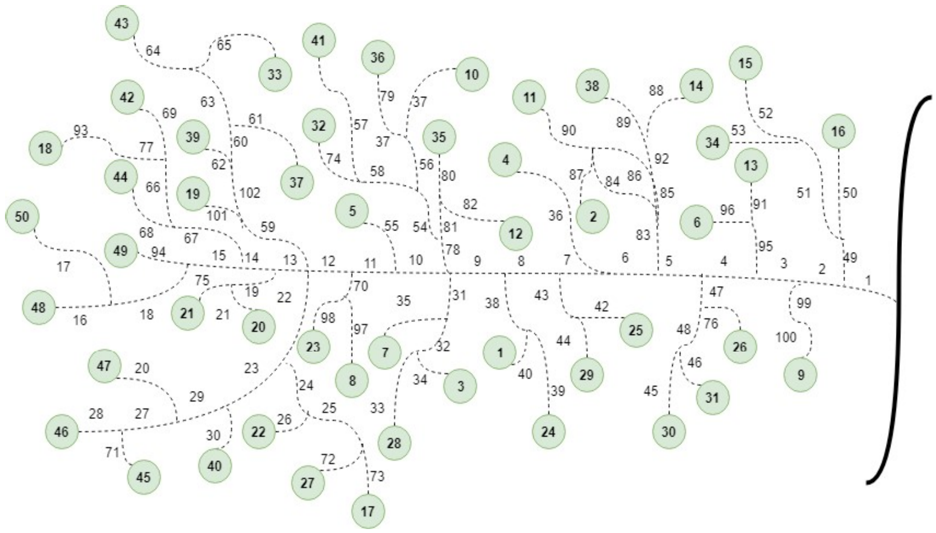

Fig. 2. Modelo de red de caminos de mayor escala.

aumentan a 102, entonces tendríamos el siguiente modelo de red representado por la figura 2.

Asimismo, teniendo el mismo enfoque de maximizar las ganancias, pero que los objetivos de gestión sí cambien, ahora se quiere alcanzar el objetivo de caza sea 32,000 días al año o el objetivo de producción de madera sea de 240,000 m^3 al año. Esta situación se puede representar cambiando la producción de madera y las limitaciones de recreación de la siguiente manera:

a= 50 proyectos

b= 102 segmentos de carreteras

d= Mínimo 70,000 días de caza al año

e= Mínimo 300,000 m^3 de madera al año

f= Máximo 40 proyectos al año

El análisis se llevó acabo en una computadora Intel R Celeron R porcessor 2957U con 1.4 GHz. Donde el programa que se utiliza es GAMS/CPLEX.

Los resultados en GAMS / CPLEX nos establecieron automáticamente la mejor solución para el problema. Si observamos dentro del análisis que nos proporciona GAMS la solución que ofrece es óptima porque posteriormente nos indica que solo se llevarán a cabo 40 proyectos dando como resultado 78,000 días de caza al año y 314,000 m^3 de madera anuales.

En la tabla III se muestran los valores de la solución para las variables y_j que determinan los proyectos que se llevarán a cabo para los múltiples usos de este problema de gestión forestal. Por ejemplo, construir el proyecto 1 generará 200 días de caza anuales y 4,000 m^3 de volumen para cosechar madera anualmente, de tal proyecto obtendrían ingresos de $1,020,000.

En la figura 3 podemos observar de color rojo los nodos que simbolizan los proyectos que se llevarán a cabo, mientras que de color verde permanecen los nodos que simbolizan los proyectos que no se construirán. Las líneas punteadas nos indican cuáles son las carreteras que no se llevarán a cabo y las líneas sólidas indican las que sí se construirán.

Es esencial tener en cuenta que una buena red vial dentro de un bosque estatal, permite reducir las distancias promedio, y garantiza que las diferentes actividades asociadas a la cosecha forestal y la caza que no se beneficien en función de los costos, así como los rendimientos.

La metodología que se presenta, desarrolla una solución óptima al problema del diseño de la red vial para estas labores. De este modo, se define la combinación de posibles conexiones entre todos los nodos (proyectos), con arcos no dirigidos (en este caso los segmentos de camino), cuyo valor es el costo de construcción. El conjunto de segmentos logran unirse para la construcción de uno de los proyectos. Finalmente, la vía establecida se anexa a una red vial ya existente, en este caso la que se indica en una línea sólida en la figura 3.

Como resultado de GAMS/CPLEX que se presenta en la tabla III nos indican que sólo se llevarán a cabo 40 proyectos dando como resultado 78,000 días de caza al año y 314,000 m^3 de madera anuales y obteniendo ganancias máximas de $41,093,000.

Dado el resultado de nuestro problema, surge la duda en qué pasaría si cambiamos algunas de las restricciones. Por ejemplo, si consideramos cambiar la restricción del parámetro *d*, la cual nos habla de los días de caza al año, ésta podría afectar en gran medida la solución óptima y por consiguiente mejorar las ganancias. Las siguientes tablas nos muestran de qué manera cambia el resultado anterior si variamos las restricciones de los parámetros *d*, *e* y *f*. Así, con este análisis se podría considerar alguna otra alternativa para la solución del problema.

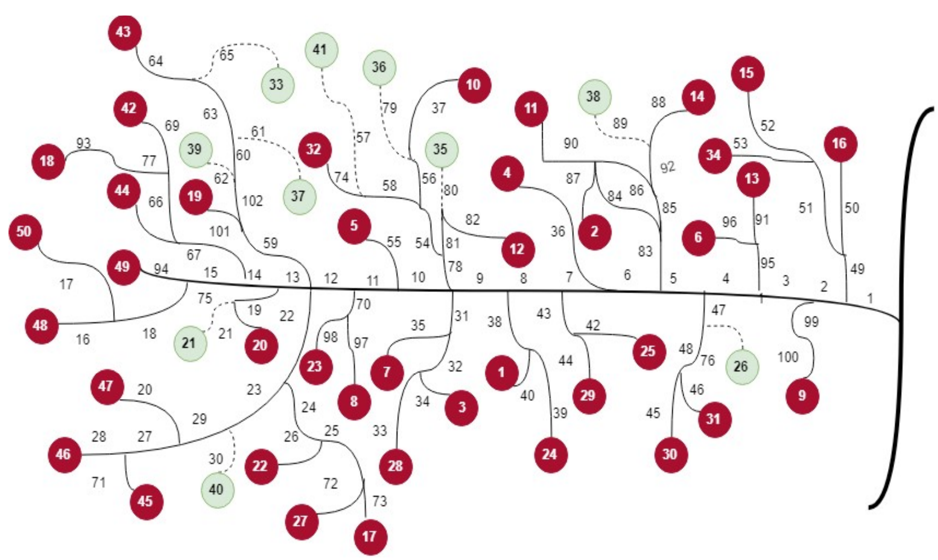

Fig. 3. Red de proyectos finales.

Tabla III. Proyectos que se llevarán a cabo.

Proyectos	Días de caza (100/y)	Madera ($10^3 m^3$/y)	Ingresos ($\$10^3$)	Proyectos	Días de caza (100/y)	Madera ($10^3 m^3$/y)	Ingresos ($\$10^3$)
1	2	4	1,020	22	3	4	1,390
2	1	11	900	23	1	11	1,160
3	2	14	1,090	24	2	11	970
4	3	6	1,110	25	3	14	1,180
5	1	6	1,100	27	2	13	1,240
6	3	9	1,500	28	1	15	1,070
7	3	5	1,210	29	1	5	710
8	3	12	1,140	30	1	14	1,420
9	3	7	780	31	3	4	1,100
10	2	10	1,250	32	3	10	760
11	3	7	710	34	3	13	970
12	1	4	1,490	42	1	5	1,220
13	3	5	1,250	43	2	4	1,500
14	1	3	800	44	1	5	1,340
15	1	7	1,290	45	2	13	840
16	2	6	1,110	46	2	6	1,440
17	1	6	1,180	47	2	15	1,100
18	2	6	1,130	48	1	4	1,500
19	2	6	750	49	1	13	1,050
20	2	3	920	50	1	6	880

Fijando los datos como se plantean al principio del problema con 40 proyectos autorizados como máximo y 300,000 m^3 de madera al año como mínimo; tenemos que solamente varía el valor del parámetro (*d*) dándonos ahora como mínimo de días de caza al año de 70,000 y este va hasta 100,000. De tal manera haremos un análisis de cómo cambia el valor objetivo del problema. Estos resultados se muestran en la tabla IV y figura 4.

Tabla IV. Resultados del experimento variando la restricción de días de caza.

(d) (100/y)	Solución óptima	Días de caza (100/y)	Volumen de madera ($10^3 m^3$/y)	(f)	(e) (m^3/y)
70	$ 41,093	78	314	40	300
80	$ 41,093	78	314	40	300
90	$ 41,016	80	316	40	300
100	$ 40,245	85	304	40	300
110	Infactible	Infactible	Infactible	40	300
120	Infactible	Infactible	Infactible	40	300
130	Infactible	Infactible	Infactible	40	300

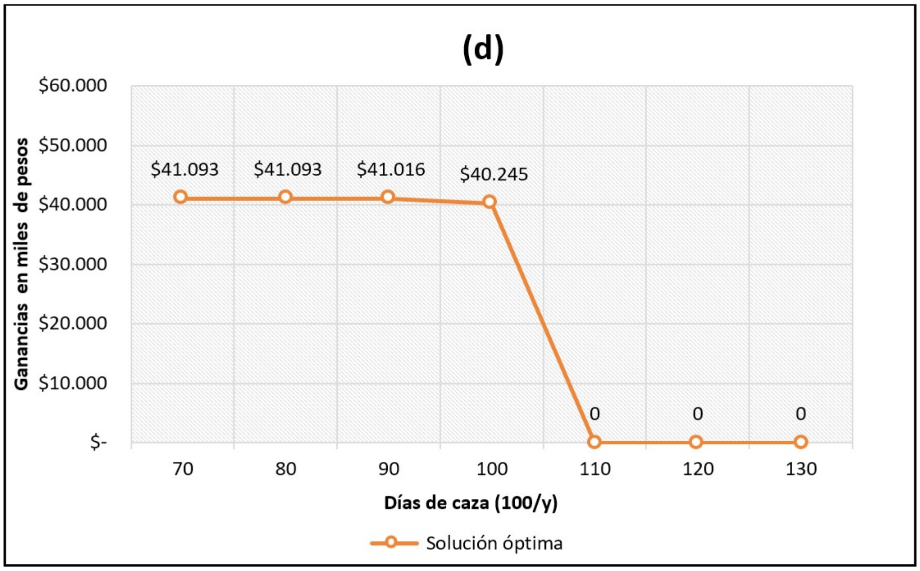

Fig. 4. Gráfica del experimento variando el parámetro *d*.

Podemos observar en la tabla IV que la restricción de días de caza al año no varía tanto, es decir, se mantiene con los mismos resultados hasta casi al final, donde disminuyen las ganancias hasta volverse infactible, lo cuál podemos observar en la figura 4.

Ahora pasando a un nuevo experimento consideramos cambiar el valor del parámetro *e*, que son los m^3 de madera al año, pero siguiendo con el resto de los datos fijos, es decir *f* en 40 proyectos y *d* en 70,000 días de caza al año. Entonces se toma el dato de 300,000 m^3 hasta 370,000 m^3 podremos observar y hacer análisis en como varía la solución óptima en estos diferentes rangos. Los resultados se muestran en la tabla V y figura 5.

Tabla V. Resultados del experimento variando la restricción de volumen en m^3 de madera.

(e) (10^3m^3/y)	Solución óptima	Días de caza (100/y)	Volumen de madera (10^3m^3/y)	(f)	(d) (100/y)
300	$ 41,093	78	314	40	70
310	$ 41,093	78	314	40	70
320	$ 40,957	79	320	40	70
330	$ 40,731	78	331	40	70
340	$ 39,792	78	340	40	70
350	$ 36,730	81	350	40	70
360	Infactible	Infactible	Infactible	40	70
370	Infactible	Infactible	Infactible	40	70

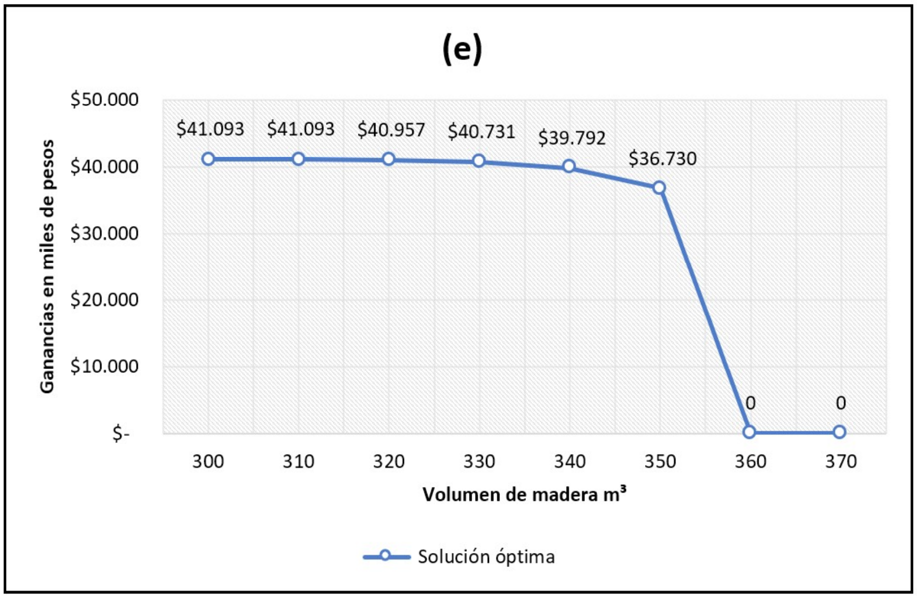

Fig. 5. Gráfica del experimento variando el parámetro *e*.

Luego tenemos en la tabla V que de acuerdo a los resultados en GAMS se obtendrían mayores ganancias si se tomaran los datos dados en el problema con (f) con un máximo de 40 proyectos autorizados, (e) con 300,000 m^3 al año de madera como mínimo y con (d) en 70,000 días de caza al año obteniendo los siguientes resultado, ganancias de $41,093 con 78,000 días de caza al año y 314,000 m^3 de madera al año. Al igual se puede observar en la figura 5 que apartir de 360 GAMS nos indica que no se encuentra solución factible.

Teniendo como último experimento la variación del parámetro *f*, el cual se refiere al total de proyectos autorizados, es decir siguiendo con los datos originales donde se tiene como mínimo 70,000 días de caza al año y 300,000 m^3 de madera al año, pero cambiando la restricción de 40 proyectos como máximo a 20, 25, 30, 35, 40, 45 e incluso todos los 50 proyectos. Los resultados se muestran en la tabla VI y figura 6.

Tabla VI. Resultados del experimento variando el parámetro *f*.

(f)	Solución óptima	Días de caza al año	Volumen de madera (10^3m^3/y)	(d) (100/y)	(e) (10^3m^3/y)
20	Infactible	Infactible	Infactible	70	300
25	Infactible	Infactible	Infactible	70	300
30	Infactible	Infactible	Infactible	70	300
35	$ 36,031	70,000	300,000	70	300
40	$ 41,093	78,000	314,000	70	300
45	$ 44,479	88,000	351,000	70	300
50	$ 47,698	99,000	389,000	70	300

En la tabla VI podemos observar a la restricción (f), donde se considero desde 20 hasta los 50 proyectos como máximo para el problema.

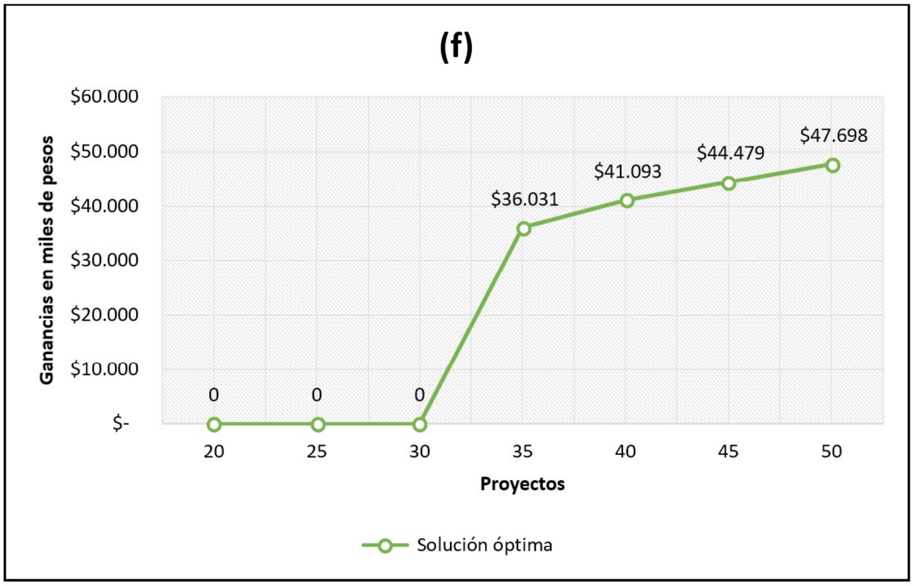

Fig. 6. Gráfica del experimento variando *f*.

Podemos observar en la Ilustración 7 que en 20, 25 y 30 la solución es infactible y en 45 o 50 los proyectos aumentan las ganancias siendo mejores opciones para dicha restricción. Entonces tenemos que 45 proyectos generen una solución óptima de $44,479 como ganancias considerando 88,000 días de caza y 351,000 m^3 de madera anuales. Si se toman en cuenta todos los proyectos se obtendrian ganancias de $47,698 con 99,000 días de caza y 389,000 m^3 de madera anuales.

CONCLUSIONES

El manejo forestal incluye decisiones en diferentes niveles, tanto espaciales como temporales, la planificación estratégica tiene un horizonte de tiempo largo, a menudo varias rotaciones que dan más de cien años. Debido al tamaño del problema, las decisiones a menudo se agregan en términos de áreas, características y acciones a tomar. Los planes estratégicos de manejo forestal apuntan a maximizar los volúmenes de cosecha sostenidos y preferiblemente constantes. Los modelos incluyen un objetivo de patrimonio neto actual que se debe maximizar sujeto a restricciones lineales, basadas en la disponibilidad de recursos, la estabilidad del flujo de cosecha, la demanda industrial y las preocupaciones ambientales, entre otros. Los modelos son generalmente modelos de programación entera y han estado en uso durante al menos dos décadas, los problemas típicos involucran varios cientos a miles de áreas y diez a cincuenta períodos de tiempo. Esto, junto con diferentes alternativas asociadas con cada área, a menudo resulta en problemas con varios miles de restricciones y varios cientos de miles de variables.[8]

Por ello es importante tomar en cuenta la variación en alguno de los datos del problema, para tomar en cuenta cómo se afecta su solución. Los grandes problemas de programación entera mixta pueden ser difíciles de resolver, incluso con un número modesto de variables binarias (0,1). Por lo tanto, en modelos grandes, la posibilidad de trabajar con programación lineal ordinaria y redondear la solución final no debe descuidarse, siempre que se tenga en cuenta la posibilidad real de obtener soluciones subóptimas o no factibles. El método simplex y sus variantes, siguen siendo los algoritmos de programación matemática más potentes para resolver problemas, con múltiples restricciones cuando las decisiones no son enteras, sino continuas.[7]

El modelo matemático presentado y los resultados de optimización, permiten solucionar el problema de gestión forestal y sus intersecciones, sobre toda el área del bosque estatal, indicando los días de caza y de cosecha de madera requeridos para generar mayores ganancias en cada proyecto, y en los totales a costo mínimo de construirlos. Si los resultados se presentan en tablas, se pueden evaluar los proyectos más rentables, los cuales pueden servir como guías para planificar los objetivos en un bosque estatal, teniendo en cuenta las prioridades ambientales de sus elementos al igual que su rentabilidad. En futuras investigaciones se podrían detallar estos parámetros, con el consecuente incremento en tiempo computacional y consumo de recursos por parte del algoritmo.

En conclusión se puede proporcionar una amplia visión general de la silvicultura, al usar la investigación de operaciones para mejorar la gestión del bosque, ya que la silvicultura se encuentra en medio de un importante trastorno en muchas partes del mundo. Dada la urgente necesidad de involucrar a muchos públicos diversos en los procesos de planificación de la gestión forestal, el complejo proceso económico, social, económico y ecológico que envuelve y constituye componentes esenciales de nuestros bosques, y el hecho de que los planes de gestión forestal tienen implicaciones que se extienden ampliamente en el tiempo y el espacio. Ciertamente vale la pena intentarlo.[9]

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue apoyado por la Academia Mexicana de Ciencias en el XXVIII Verano de la Investigación Científica, al igual que por la beca otorgada por el Centro de Ciencias y Tecnología del Estado de Tabasco (CCYTET) y por la oportunidad de participar en el verano científico en el PISIS-UANL. Se agradecen también los comentarios de los revisores anónimos, los cuales ayudaron a mejorar la presentación del artículo.

REFERENCIAS

1. F.S. Hillier y G. J. Lieberman. Introduction to Operations Research. McGraw-Hill, New York, EUA, 1990.
2. O.A. Aguirre Calderón. Hacia el manejo de ecosistemas forestales. Madera y Bosques, 3(2):3-11, 1997.
3. K. von Gadow, S. Sánchez Orois y O.A. Aguirre Calderón. Manejo forestal con bases científicas. Madera y Bosques, 10(2): 3-16, 2004.
4. A. Weintraub. Integer programming in forestry. Annals of Operations Research, 149(1): 209-216, 2007.
5. O.A. Aguirre Calderón. Manejo forestal en el siglo XXI. Madera y Bosques, 21(2):17-28, 2015.

6. T. Bjørndal, I. Herrero, A. Newman, C. Romero y A. Weintraub. Operations research in the natural resource industry. International Transactions in Operational Research, 19(1-2): 39–62, 2012.
7. J. Buongiorno y J.K Gilless. Decision Methods for Forest Resource Management. Academic Press, San Diego, EUA, 2003.
8. M. Rönnqvist. Optimization in forestry. Mathematical Programming, 97(1-2): 267-284, 2003.
9. D.L. Martell, E.A. Gunn y A. Weintraub. Forest management challenges for operational researchers. European Journal of Operational Research, 104(1):1-17, 1998.