

ARTICULOS

Sistema de apoyo a la toma de decisiones de establecimiento de plantaciones forestales

Support system for decisions making for the establishment of forest plantations

PATRICIO ALEJANDRO TAPIA TORO¹, MANUEL CEPEDA JUNEMANN²

Departamento de Ingeniería Industrial, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción, Chile.

¹Casilla 1448, Los Angeles, Chile, Fono: +56-43-405300. Fax: +56-43-312701.
email: patricio.tapia@forestal.cmpc.cl

²Universidad Católica de la Santísima Concepción, Alonso de Rivera 2850, Concepción, Chile.
email: mcepeda@ucsc.cl

SUMMARY

Forest companies are currently investing strong amount of money in establishment of plantations, that implies the carrying out of various kinds of silviculture-based works or procedures, these bring about additional costs to the plantation, and if being suitable for the site, they shall generate income increase by the time the forest is harvested. In this context, decisions to be made by the time a plantation is establish turn out to be critical with respect to the business income-yield capacity. Therefore, and due to economic restraints, available resources have to be properly allotted in order to achieve improvement regarding forest business income-yield capacity, in the case of a group of forest stands that feature their own productivity, localization and gathering. The purpose of this current research work has been to improve the forest business income-yield capacity, by developing a support system regarding silviculture-based decision making in the establishment of forest plantations (PROYMAN). By means of the use of this model a solution showing no establishment taking part, against a current silviculture decision, and one achieved by the decision making support system. Outcomes showed that better general results were obtained by PROYMAN, in terms of Land Expected Value (LEV). Besides, it is important to stand out that key variables parameterization with respect to the establishment process turns out to be a necessary characteristic. Likewise, it is quite important for a decision making support system, since the proper management of such decisions shall bring about the suitable and right solutions.

Key words: LEV, solution, decision variables, costs, incomes.

RESUMEN

Las empresas forestales invierten fuertes sumas de dinero en establecimiento de plantaciones, en la ejecución de una serie de intervenciones silvícolas que agregan costos a la plantación y, si éstas son adecuadas al sitio, generarán un aumento de los ingresos a obtener al momento de la cosecha del bosque. En este contexto, las decisiones que se tomen son determinantes en la rentabilidad del negocio forestal. Debido a esto y a la existencia de restricciones económicas, es necesario hacer una buena asignación de los recursos disponibles para lograr una mejora en la rentabilidad, para un conjunto de rodales con características propias de productividad, localización y agrupamiento. Con el objetivo de mejorar la rentabilidad del negocio forestal, se desarrolló un sistema de apoyo a la toma de decisiones de establecimiento de plantaciones (PROYMAN). Mediante el empleo de este modelo, se comparó una solución sin intervenciones de establecimiento versus una decisión silvicultural actual y una obtenida por el sistema. En general, PROYMAN obtuvo mejores soluciones en términos de Valor Potencial del Suelo (VPS). Es importante destacar que la parametrización de variables claves en el proceso de establecimiento es una característica necesaria y muy importante para un sistema de apoyo a la toma de decisiones, ya que de un adecuado manejo de éstas dependerá la bondad de las soluciones que genere.

Palabras clave: VPS, solución, variables de decisión, costos, ingresos.

INTRODUCCION

El establecimiento de plantaciones forestales representa una alta inversión, en la que incurren las empresas forestales cada año. Estas plantaciones se realizan sobre diversas condiciones edafoclimáticas, las cuales constituyen un sitio con un cierto potencial productivo, que será alcanzado por una plantación en la medida que sea sometida a las intervenciones silvícolas adecuadas. El establecimiento de plantaciones implica la ejecución de una serie de faenas o intervenciones silvícolas, las cuales agregan costos a la plantación y, si éstas son adecuadas al sitio, generarán un aumento de los ingresos a obtener al momento de la cosecha del bosque. Las intervenciones de establecimiento más comunes son preparación de suelo, control de malezas herbáceas pre y posplantación, control de malezas arbustivas y fertilización al establecimiento. Adicionalmente, existen las faenas de manejo que incluyen podas y raleos, agrupadas en esquemas de manejo, las cuales determinan qué volumen por tipo de producto se obtendrá al momento de la cosecha del rodal o plantación. La decisión de qué esquema de manejo aplicar está determinada por las características de crecimiento alcanzadas por la plantación al término del establecimiento, producto de las condiciones inherentes del sitio y de la respuesta del rodal a las intervenciones silvícolas de establecimiento aplicadas. Dado que las decisiones en el establecimiento de plantaciones son determinantes en la rentabilidad del negocio y debido a restricciones económicas, es necesario hacer una buena asignación de los recursos disponibles, para lograr una mejora en la rentabilidad del negocio forestal, considerando a un conjunto de rodales con características propias de productividad, localización y agrupamiento.

El objetivo que se busca alcanzar con la resolución del problema descrito es mejorar la rentabilidad del negocio forestal, mediante la asignación de recursos a distintas faenas de establecimiento, sujeto a restricciones tanto técnicas como económicas. Esto implica desarrollar un sistema de apoyo a la toma de decisiones silviculturales de establecimiento de plantaciones forestales, que permita obtener una buena estrategia, para un conjunto de rodales a establecer, que tienda a maximizar la rentabilidad. Entendiéndose por estrategia a la combinación de faenas de establecimiento a aplicar a un rodal.

El desarrollo de modelos de apoyo a la toma de decisiones de establecimiento de plantaciones forestales ha sido estudiado por diversos autores (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8), los cuales abordan distintos tipos de problemas, pero desde la óptica de un único rodal o unidad de bosque. El desarrollo de un apropiado esquema de actividades, a aplicar a un rodal, que permita la maximización del retorno financiero de la inversión, se conoce como problema de optimización de rodal (9). La resolución de este problema para rodales particulares se ha resuelto a través de diversas formas: Programación Dinámica, Programación No Lineal, Programación Entera (Branch and Bound) (2, 9, 10, 11). Estas técnicas presentan limitaciones, dada la complejidad que actualmente tiene el establecimiento de plantaciones forestales, es decir, dada la alta cantidad de intervenciones posibles de aplicar a un rodal y las distintas oportunidades a lo largo de su vida en que se pueden realizar. Otra forma de resolver problemas de alta complejidad es mediante técnicas metaheurísticas, tales como Tabu Search (7, 12, 13), Simulated Annealing (2, 7, 14), Algoritmo Genético, entre otras.

Para la rentabilidad del negocio forestal se desarrolló un sistema de apoyo a la toma de decisiones de establecimiento de plantaciones (PROYMAN). Mediante el empleo de este modelo se comparó una solución sin intervenciones de establecimiento versus una decisión silvicultural actual y una obtenida por el sistema.

MATERIALES Y METODO

El problema considera un conjunto de sitios, en donde se ha decidido establecer plantaciones de *Pinus radiata* D. Don, los cuales se encuentran en distintas ubicaciones geográficas y presentan diverso grado de agrupación. La importancia del grado de agrupación radica en el hecho de que en algunas faenas, como es el caso de preparación de suelo, la decisión de realizarla puede depender de la decisión que se haya tomado para un rodal vecino, dado que existe un costo asociado al traslado de equipos, el cual tiene un fuerte impacto sobre el costo por unidad de superficie de la faena, especialmente cuando el rodal es de superficie pequeña. La decisión a nivel de rodal o sitio se aborda de la siguiente forma: cada sitio tiene asociada un área de productividad y ésta determina

su índice de sitio. Las faenas de establecimiento que se aplican a un rodal generarán una ganancia en el índice de sitio (6, 15, 16, 17, 18, 19, 20) y un costo producto de su aplicación. La resolución del problema implica generar soluciones que incluyan una combinación de faenas de establecimiento. El índice de sitio resultante, de la aplicación de las faenas de establecimiento, prescribe el esquema de manejo para el rodal, es decir, la combinación de podas y raleos a realizar. El esquema de manejo determina, en última instancia, los productos madereros a obtener al momento de la cosecha del rodal, es decir, los ingresos que se percibirán.

Para evaluar cada solución se utiliza el VPS, el cual está determinado, tanto por el costo de las faenas de establecimiento y manejo aplicadas, los costos de producción, y otros costos, así como por los ingresos que se obtengan de los productos madereros del bosque, durante el o los raleos y la cosecha final. Las ganancias esperadas, por la aplicación de las distintas intervenciones de establecimiento, se basan en el conocimiento existente. En la actualidad en Chile existe una amplia base de conocimiento para el sustento de la toma de decisiones (1).

La ampliación del problema de optimización de rodal, que se plantea, permite obtener soluciones a nivel de grupo de rodales. Este mismo problema en forma más agregada podría ser aplicado a un programa de plantación anual. Por otro lado, la atomización del problema, resolviendo separadamente para cada rodal, presenta las siguientes limitaciones:

- El óptimo para cada rodal puede no ser aplicable, dada la limitación de recursos. Es decir, el óptimo para el conjunto de rodales puede requerir decisiones subóptimas para algunos rodales.
- El óptimo para un rodal individual puede no ser óptimo para rodales que se presenten geográficamente cercanos.

En relación a este último punto, cabe señalar que si existen costos fijos, como el costo asociado al traslado de equipos, en el caso de la preparación de suelo, la decisión para un rodal puede estar influenciada por la decisión aplicada a un

rodal vecino. El siguiente ejemplo explica esta situación: consideremos dos fundos en un mismo sector, uno de 100 hectáreas, otro de 5 hectáreas. Si para el primer fundo se decide hacer subsolado, se trasladarán los equipos de preparación de suelo al sector. La decisión individual de subsolar en el fundo de 5 ha podría ser no efectuarlo, dada la alta incidencia del traslado en el costo total de la faena por unidad de superficie. Sin embargo, si el equipo ya fue trasladado al sector, para realizar la faena en el fundo de 100 ha, entonces subsolar se hace atractivo para el fundo de 5 ha, debido a que el costo relevante disminuye, por lo que la decisión podría ser realizarlo. De lo anterior se desprende que la resolución del problema a nivel de rodal no considera esta situación.

Las faenas de establecimiento consideradas son: preparación de suelo, control de malezas, fertilización, cada una en sus distintas oportunidades. Los esquemas de manejo considerados son tres: Manejo Pulpable, que se caracteriza por no incluir podas ni raleos y proporciona principalmente madera de tipo pulpable; Manejo Multipropósito, que considera dos podas y un raleo comercial, su objetivo es proporcionar principalmente madera de tipo estructural; Manejo Intensivo, que considera tres podas y dos raleos comerciales, su objetivo es proporcionar principalmente madera de alto valor, es decir, madera libre de nudos. Cada una de estas faenas ocurre a distintas edades dependiendo del índice de sitio resultante.

MODELO DE PROGRAMACION MATEMATICA

La resolución del problema consiste en decidir, para cada rodal, el tipo de intervención a realizar y la oportunidad en que se aplicará, lo cual se hace mediante variables binarias (cuadro 1).

Costos de establecimiento. Cada faena de establecimiento aporta un costo al rodal, además del costo de plantación y el gasto de administración anual, que son fijos. Los siguientes son los costos de aplicación de cada una de las faenas definidas como variables de decisión y están dados para el momento de la ejecución de las faenas y expresados por unidad de superficie (cuadro 2).

CUADRO 1

Variables de decisión.
 Variables of decision.

Variable	Descripción
Y_{js}	Traslado de equipos, esta variable está dada para un sector o grupo de fundos.
S_{jk} (año 0)	Preparación de suelo tipo j aplicada al rodal k.
P_{jk} (año 0)	Control de malezas herbáceas pre-plantación tipo j aplicado al rodal k.
M_{ijk} (año i)	Control de malezas herbáceas post-plantación tipo j aplicado al rodal k.
A_{ijk} (año i)	Control de malezas arbustivas tipo j aplicado al rodal k.
F_{ijk} (año i)	Fertilización de establecimiento tipo j aplicada al rodal k.
R_{ijk} (año i)	Fertilización de mitad de rotación tipo j aplicada al rodal k.
RP_k (año 1)	Replante del rodal k.

Nota: 1 si la faena es aplicada; 0 en caso contrario.

CUADRO 2

Costos de establecimiento.
 Costs of establishment.

Variable	Descripción
CY_{js} (año 0)	Costo de traslado del equipo de preparación de suelo tipo j al sector s (US\$/km).
CS_{jk} (año 0)	Costo de preparación de suelo tipo j aplicado en el rodal k (US\$/ha).
CP_{jk} (año 0)	Costo de control de malezas herbáceas pre-plantación tipo j aplicado en el rodal k (US\$/ha).
CM_{ijk} (año i)	Costo de control de malezas herbáceas post-plantación tipo j aplicado en el rodal k (US\$/ha).
CA_{ijk} (año i)	Costo de control de malezas arbustivas tipo j aplicado en el rodal k (US\$/ha).
CF_{ijk} (año i)	Costo de fertilización de establecimiento tipo j aplicado en el rodal k (US\$/ha).
CR_{ijk} (año i)	Costo de fertilización de mitad de rotación tipo j aplicado en el rodal k (US\$/ha).
CRP_k (año 1)	Costo de replante del rodal k (US\$/ha).

La descripción de los costos agregados se presenta en el cuadro 3. El costo agregado al rodal k por la ejecución de faenas de establecimiento

[1] y el costo de traslado de equipos [2] es el siguiente:

$$CE_k = \left(\sum_{j=1}^{n_s} CS_{jk} \times S_{jk} + \sum_{j=1}^{n_p} CP_{jk} \times P_{jk} + \sum_{i=0}^4 \sum_{j=1}^{n_m} \frac{CM_{ijk} \times M_{ijk}}{(1+r)^i} + \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^{n_a} \frac{CA_{ijk} \times A_{ijk}}{(1+r)^i} + \sum_{i=0}^4 \sum_{j=1}^{n_f} \frac{CF_{ijk} \times F_{ijk}}{(1+r)^i} + \sum_{i=9}^{18} \sum_{j=1}^{n_k} \frac{CR_{ijk} \times R_{ijk}}{(1+r)^i} + \frac{CRP_k \times RP_k}{(1+r)} \right) B_k \quad [1]$$

$$CT_s = \sum_{j=1}^{n_s} CY_{js} \times Y_{js} \times D_s \quad [2]$$

Restricción presupuestaria. El costo total de la aplicación de las faenas descritas, en las variables de decisión y que tienen lugar entre el año 0 y año 4 de edad de la plantación, se describe en la ecuación [3].

$$CE04 = \sum_{i=0}^4 \frac{C_i}{(1+t)^i} \quad (\text{US\$/ha}) \quad [3]$$

Donde i es la edad a la que se realiza la intervención, C el costo de las intervenciones de establecimiento y t la tasa de descuento.

El costo total 0-4 años presenta dos tipos de restricción presupuestaria, por una lado está limitado por el costo máximo admisible, definido por rodal, para una determinada área de productividad:

$$CE04_k \leq CMA_k \quad (\text{US\$/ha}) \quad [4]$$

CUADRO 3

Descripción de costos agregados.
 Description of added costs.

Variable	Descripción
CE_k	Costo de establecimiento del rodal k (US\$).
CT_s	Costo traslado de equipos al sector s (US\$).
$CE04_k$	Costo de establecimiento año 0-4 del rodal k (US\$/ha).
CMA_k	Costo máximo admisible del rodal k (US\$/ha).
PP_s	Presupuesto para el grupo del sector s (US\$).
n_s	Número de tipos de preparación de suelos.
n_p	Número de tipos de control de malezas preplantación.
n_M	Número de tipos de control de malezas herbáceas post plantación.
n_A	Número de tipos de control de malezas arbustivas.
n_F	Número de tipos de fertilizaciones de establecimiento.
n_R	Número de tipos de fertilizaciones de mitad de rotación.
B_k	Superficie del rodal k (ha).
D_s	Distancia traslado de equipos al sector s (km).
s	Sector que contiene al rodal k.
R	Cantidad de rodales del sector s.
r	Tasa de descuento (%)

Por otra parte, para cada sector o grupo de rodales existe un presupuesto o costo máximo a alcanzar en el total de rodales del grupo:

$$\sum_{k=1}^R CE04_k \times B_k \leq PP_s \quad (\text{US\$}) \quad [5]$$

Restricción para preparación de suelo. Solo puede ser aplicada durante el año 0 y un tipo por rodal.

$$\sum_{j=1}^{n_s} S_{jk} \leq 1 \rightarrow k = 1, \dots, R \quad [6]$$

Restricción para control de malezas preplantación. Aplicada durante el año 0 y un tipo por rodal.

$$\sum_{j=1}^{n_p} P_{jk} \leq 1 \rightarrow k = 1, \dots, R \quad [7]$$

Restricción para control de malezas herbáceas post-plantación. Máximo un tipo por rodal por año.

$$\sum_{j=1}^{n_M} M_{ijk} \leq 1 \rightarrow i = 0, \dots, 4 \text{ y } k = 1, \dots, R \quad [8]$$

Si no se realiza este control durante el año 0 se debe efectuar replante durante el año 1.

$$\sum_{j=1}^{n_M} M_{ijk} + RP_k = 1 \rightarrow i = 0 \text{ y } k = 1, \dots, R \quad [9]$$

Restricción para control de malezas arbustivas. Máximo un tipo por rodal por año.

$$\sum_{j=1}^{n_A} A_{ijk} \leq 1 \rightarrow i = 0, \dots, 4 \text{ y } k = 1, \dots, R \quad [10]$$

Restricción para fertilización de establecimiento. Máximo un tipo por rodal por año.

$$\sum_{j=1}^{n_F} F_{ijk} \leq 1 \rightarrow i = 0, \dots, 4 \text{ y } k = 1, \dots, R \quad [11]$$

Restricción para fertilización de mitad de rotación. Máximo un tipo por rodal por año.

$$\sum_{j=1}^{n_R} R_{ijk} \leq 1 \rightarrow i = 9, \dots, 18 \text{ y } k = 1, \dots, R \quad [12]$$

Restricción de traslado de equipos. Considera que si los equipos de preparación de suelo son trasladados al sector o grupo de rodales, puede hacerse preparación de suelo en él, en caso contrario no es posible realizar dicha faena.

$$S_{jk} \leq Y_{js} \rightarrow j = 1, \dots, n_s \forall k \in \text{al sector } S. \forall S \quad [13]$$

Costos de faenas de manejo. Estos costos corresponden a las podas y raleos que se apliquen a un

rodal y dependen del índice de sitio resultante, es decir, de la ganancia alcanzada por el índice de sitio, producto de las condiciones inherentes del sitio y de la combinación de las intervenciones de establecimiento o variables de decisión aplicadas.

Poda (US\$/ha). De acuerdo al esquema de manejo correspondiente, ocurren desde el año 4 al 9.

Raleo (US\$/ha). De acuerdo al esquema de manejo correspondiente, ocurren desde el año 8 al 15.

Costos de producción. Los costos de producción tienen una relación muy compleja con las variables de decisión, surgen a consecuencia de éstas, a través de la proyección de crecimiento y rendimiento, dado por el índice de sitio alcanzado por el rodal y el esquema de manejo aplicado. Su valor está determinado por el costo unitario de aplicar la faena y por la proyección de crecimiento y rendimiento.

Construcción de caminos (US\$/ha). Este ocurre a la edad de cosecha.

Cosecha (US\$/ha). Este ocurre a la edad de corta del rodal.

Transporte aserrable (US\$/m³/km). Por tipo de carpeta, ya sea ripio o pavimento. Este ocurre a la edad de corta del rodal.

Transporte pulpable (US\$/m³/km). Por tipo de carpeta, ya sea ripio o pavimento. Este ocurre a la edad de corta del rodal.

La distancia por tipo de carpeta, desde cada fundo a centro de consumo, considera todos los centros de consumo actuales, tanto para productos aserrables como para productos pulpables. La selección del centro de consumo, al que se transportarán los productos, se hace de acuerdo a la menor distancia entre el fundo y el centro de consumo.

OTROS ANTECEDENTES A CONSIDERAR EN LA EVALUACION

Tasa de impuesto (%). Corresponde a la tasa de impuesto sobre las utilidades. Se aplica en los años en que los ingresos son mayores que los costos.

Tasa de descuento (%). En las evaluaciones realizadas se considera una tasa de descuento del 10%.

Ingresos. Al igual que los costos de producción, los ingresos están relacionados con las variables

de decisión, a través del modelo de proyección de crecimiento y rendimiento, el cual determina los volúmenes a obtener del rodal, de acuerdo al índice de sitio alcanzado por éste y el esquema de manejo aplicado. Su valor está determinado por el precio unitario de los productos a obtener y por la proyección de crecimiento y rendimiento.

Raleos. Dado por el volumen pulpable, a extraer en el o los raleos que se realicen al rodal, según el esquema de manejo correspondiente y a la proyección de crecimiento y rendimiento, por el precio del producto pulpable. Ocurren desde el año 8 al 15.

Cosecha. Dada por el volumen de productos madereros a extraer en la cosecha final del bosque, de acuerdo a la proyección de crecimiento y rendimiento, por el precio de cada producto. Este ocurre a la edad de corta.

Los productos a obtener de un rodal, tanto en los raleos como en la cosecha final del mismo, están contenidos en un esquema de trozado, éste indica el tipo de producto, especificaciones de diámetros y largos, calidad, método de cubicación. Adicionalmente cada producto tiene un precio asociado.

Ganancias e interacciones. La ganancia, debido a la aplicación de las distintas faenas de establecimiento, es particular para cada una de las condiciones edafoclimáticas en la que crece un rodal y para el tipo y oportunidad de intervención a aplicar. La ganancia se expresa en términos porcentuales sobre el índice de sitio. De lo señalado hasta aquí, se desprende que existe una relación no lineal entre las variables de decisión y los costos e ingresos, detallados en los puntos precedentes y, en última instancia, con el VPS. Además se debe considerar una serie de interacciones, que se generan producto de la combinación de distintas intervenciones de establecimiento, lo cual también implica una no linealidad adicional entre las variables de decisión y VPS.

Función objetivo. El objetivo es maximizar el VPS involucrando la totalidad de los rodales de un grupo o sector.

$$\sum_{k=1}^R VPS_k = \sum_{t=0}^E \frac{V_t(x) - C_t(x)}{(1+r)^t - 1} + C_t(x) \quad [14]$$

Donde VPS_k es el VPS del rodal k (US\$/ha); V_t es el ingreso en el período t (US\$/ha); C_t corresponde al costo en el período t (US\$/ha); r es la tasa de descuento (%); t es el número de períodos (años); E la edad de rotación (años) y x vector de variables de decisión. Cabe hacer notar que tanto los ingresos como los costos son funciones que dependen del vector x de una forma compleja, que se estima a través del Modelo de Proyección de Crecimiento y Rendimiento Radiata 5.4 (21).

La función objetivo considera, por un lado, los ingresos a obtener por raleos y por la corta final del rodal, éste se obtiene a partir de los volúmenes por producto a cosechar, en cada una de estas intervenciones, por el precio respectivo. El modelo de proyección de crecimiento y rendimiento entrega los volúmenes por tipo de producto a obtener en cada oportunidad. El modelo consiste en una serie de funciones, que toma los parámetros iniciales del rodal y los proyecta a través de distintos procesos, dependiendo de una serie de variables de control, como, por ejemplo, la zona donde se encuentre creciendo, el índice de sitio del rodal, los esquemas de manejo que correspondan aplicar, etc., a partir de esto genera resultados. El volumen por tipo de producto y la edad a la que se obtiene no está regido directamente por el valor que tome una o más variables de decisión, pero sí son consecuencia de éstas, es decir, la aplicación de cada una de las faenas, que considere una solución particular, aportará un nivel de ganancia al índice de sitio del rodal, dependiendo a su vez del área de productividad donde esté localizado, lo cual en su conjunto generará un índice de sitio resultante para ese rodal en particular. Lo anterior determinará el esquema de manejo correspondiente, es decir, las podas y raleos que se deben aplicar y la edad a la que éstas ocurren, también indicará la edad a la que se debe cosechar el bosque, es decir, la edad a la que se producen los ingresos. Por otro lado, la función objetivo incorpora un componente de costos, que incluye los de establecimiento, los cuales están directamente relacionados con las decisiones que se tomen a través del modelo planteado. Además, lleva una serie de otros costos que no están regidos directamente por el valor que tome una o más variables de decisión, pero sí son consecuencia de éstas, éstos son costos de manejo, de construcción de camino, de cosecha, de transporte, estos últimos dependen de los volúmenes por tipo

de producto a obtener en la cosecha del bosque. La función objetivo también incluye otros costos, que son independientes de las decisiones que se tomen, estos son el costo de plantación y el gasto de administración anual. Para efectos de la resolución de este problema el Modelo de Proyección de Crecimiento y Rendimiento Radiata 5.4 constituye una caja negra.

Por lo explicado anteriormente y por las interacciones mencionadas, que se producen entre las variables de decisión, la función objetivo no es lineal, ni existe una forma cerrada de la misma, sino que depende de una serie de otros componentes de difícil estimación. Esto obliga a utilizar técnicas de optimización explícita o numérica, donde sólo se requiere poder evaluar una función objetivo en cualquier punto de la región factible, pero no se requiere conocer la forma cerrada de la función.

PROCESO DE SOLUCION DEL PROBLEMA. Este proceso incluye las siguientes etapas:

Grupo de fundos. Dado que la formulación define un problema separable por sector, se plantea resolver el problema a nivel de un conjunto de rodales o fundos agrupados, identificados como un sector. Este grupo de fundos incluye sus respectivas superficies. A cada uno se le asocia el área de productividad en la que se encuentra localizado, su densidad de plantación y el correspondiente índice de sitio base. El grupo está constituido por fundos ubicados geográficamente cercanos, lo cual permite evaluar el efecto de la asignación de costos correspondientes a traslado de equipos de preparación de suelo, cuando corresponda.

Generar solución. Mediante el empleo de una heurística con componentes aleatorios, se obtiene un conjunto de soluciones genéricas, las que son posteriormente evaluadas en cada rodal. Una solución corresponde a un vector de 39 componentes binarios, cada uno de los cuales indica si una intervención dada se realiza o no.

Aplicar solución a fundos. Una vez que se tiene un conjunto de soluciones, éstas se asocia a cada fundo. Dependiendo del área de productividad en donde se localice el fundo, será la ganancia y las interacciones que le correspondan, dado por las

intervenciones que indica la solución. Con la ganancia final, producto de la aplicación del conjunto de intervenciones de establecimiento que indica cada solución, se determina el esquema de manejo a aplicar. La ganancia se expresa en términos porcentuales sobre el índice de sitio y se basa en el conocimiento silvícola actual. La implementación de esta evaluación tiene la flexibilidad necesaria para actualizar las ganancias e interacciones mencionadas, en la medida en que la base de conocimientos vaya mejorando.

Asociar parámetros iniciales para proyección de cada rodal. Para efectuar la proyección de crecimiento se emplea el Modelo de Proyección de Crecimiento y Rendimiento Radiata 5.4, para lo cual se requiere conocer los parámetros dasométricos de cada plantación, a la edad de 4 años, que es la edad a la cual se inicia el modelo. Estos valores se obtienen a partir de la densidad inicial, los tratamientos silviculturales aplicados y las condiciones edafoclimáticas, del lugar en que será establecida la plantación. Cada uno de estos parámetros se basa en el conocimiento actual y son fácilmente actualizables, en la medida en que se cuente con mejor información. Los parámetros iniciales para proyección son edad (4 años), densidad (árboles/ha), área basal (m²/ha) e índice de sitio (m).

Proyectar crecimiento de cada rodal. Las soluciones asociadas a los fundos del grupo, las ganancias, interacciones y parámetros iniciales se envían al modelo de proyección de crecimiento y rendimiento, el cual proyecta el crecimiento del rodal en evaluación. Los productos a obtener al momento de la cosecha se especifican en un esquema de trozado. La proyección de crecimiento entrega los volúmenes por tipo de producto a obtener, tanto en los raleos como en la corta final del rodal.

Evaluar solución. Una vez que se tiene la proyección de crecimiento, es posible evaluar la solución generada, para cada uno de los fundos, para lo cual se requiere determinar los costos e ingresos de ésta. La evaluación se realiza mediante el VPS.

Selección de soluciones. Finalmente, se tiene un conjunto de soluciones para cada fundo, de las cuales se selecciona una por fundo. La solución al

problema incluye una solución por fundo, la que detalla las intervenciones a realizar a lo largo de la vida del rodal, el VPS para cada fundo, el costo de establecimiento de implementar cada solución y el VPS y costo total para el grupo de fundos.

Implementación del sistema de apoyo a la toma de decisiones de establecimiento (PROYMAN). El sistema se implementó mediante Visual Basic 6.0, poniendo especial énfasis en la parametrización de todos aquellos factores que son actualizables, en la medida en que la base de conocimientos vaya mejorando. La resolución del problema se inicia con la generación de soluciones, mediante una heurística con componentes aleatorios. Las soluciones generadas son interpretadas por PROYMAN, aplicando las ganancias e interacciones, correspondientes a las intervenciones que indica realizar dicha solución, y generando los parámetros dasométricos necesarios, para efectuar la proyección de crecimiento y rendimiento. Además indica el esquema de manejo a aplicar y el esquema de trozado, con los productos madereros que interesa evaluar. Las ganancias son aplicadas sobre el índice de sitio, la implementación considera un índice de sitio máximo a alcanzar, a fin de evitar resultados irreales, este valor máximo ha sido parametrizado para cada área y subárea de productividad, pudiendo actualizarse a voluntad del usuario, inicialmente se considera un valor arbitrariamente alto de 42 m. De acuerdo a lo anterior, se genera la base de datos que requiere el modelo de proyección, luego de lo cual ejecuta el modelo, para posteriormente rescatar los archivos con los resultados de las proyecciones, es decir, los volúmenes por producto en cada oportunidad. PROYMAN se encarga de aplicar cada solución a cada fundo y evaluarla mediante el VPS.

Selección de soluciones. La selección de soluciones se realiza por grupo de fundos.

- A. Si el grupo está constituido por un solo fundo, se elige la solución de mayor VPS.
- B. Si el grupo está constituido por más de un fundo se evalúan dos alternativas:

Alternativa 1: Considera el traslado de equipos de preparación de suelo, esto implica que es posible preparar todos los suelos del grupo. El costo de traslado de equipos se carga al fundo de

mayor superficie del grupo, de esta forma el resto de los fundos para los cuales se elija una solución con preparación de suelo no llevará este costo. Los pasos a seguir son los siguientes: comenzar por el fundo de mayor superficie del grupo, seleccionando la solución que entregue el mayor VPS con traslado de equipos. Seguir con el segundo fundo, en cuanto a superficie, seleccionando la solución de mayor VPS, sin considerar traslado de equipos, incluso cuando la solución incluya preparación de suelo, dado que el traslado de equipos ya fue cargado al fundo de mayor superficie del grupo. Continuar con el proceso con los siguientes fundos sucesivamente hasta el último del grupo.

Alternativa 2: Esta alternativa considera que no se trasladan equipos de preparación de suelo, por lo tanto, no es posible preparar suelos en el sector. Los pasos a seguir consisten en elegir para todos los fundos del grupo soluciones sin preparación de suelo, partiendo por las soluciones de mayor VPS.

C. Obtener el VPS de la alternativa 1 y el de la alternativa 2. Seleccionar la que presente el mayor VPS.

Para todos los casos se considera el presupuesto del grupo analizado, así al agregar una solución se compara el costo de establecimiento acumulado, de los fundos analizados, con el presupuesto del grupo, si éste es menor o igual al presupuesto se selecciona, en caso contrario se pasa a la siguiente solución (de menor costo) y así sucesivamente. Asimismo, aquellas soluciones cuyo costo por hectárea exceda al costo máximo admisible por rodal no son seleccionables.

Procedimiento para la generación de soluciones. Se realiza mediante una heurística con componentes aleatorios, el cual consiste en cubrir el espacio solución desde puntos aleatorios y desde éstos se visitan vecinos, se busca cubrir el espacio solución factible lo mejor posible, para ello se intensifica y se diversifica. Posteriormente el conjunto de soluciones generadas son evaluadas mediante el VPS, a través de los procesos descritos previamente. La razón por la cual la evaluación de soluciones se realiza una vez que el conjunto de soluciones ha sido generado, se debe a limitaciones en los tiempos de proceso, especialmente en lo referido a la conexión con el modelo de

proyección de crecimiento y rendimiento. Las etapas involucradas en este proceso son las siguientes:

Generar solución inicial. La generación de soluciones se realiza mediante una heurística con componentes aleatorios. Esta consiste en generar cada uno de los 39 componentes del vector inicial, mediante números aleatorios entre 0 y 1. Así, si el número aleatorio está entre 0 y 0.5, entonces el componente toma el valor 0, en caso contrario el componente toma el valor 1. Esta operación se realiza para cada uno de los 39 componentes del vector. Un valor 1 indica que la faena se realiza, un valor 0 indica que no se realiza.

Verificar factibilidad. Para cada uno de los grupos de faenas representados por 2 ó más componentes del vector debe haber a lo más un valor 1. Existen otras faenas que no tienen esta restricción, dado que están representadas sólo por un componente en el vector, es decir, sólo podrán ser 0 ó 1. Al realizar esta verificación, si el vector es factible se almacena, si no lo es, se refactibiliza. Se verifica que el vector sea distinto a otros vectores previamente almacenados.

Refactibilizar. Todos aquellos tipos de intervención que al presentar más de un componente con el valor 1 hace infactible la solución, se refactibilizan, haciendo cero $n-1$ de los valores 1 que aparecen en el tipo de intervención. Los componentes del tipo de intervención, que se hacen cero, se eligen aleatoriamente en cada ocasión. Una vez realizada la refactibilización se almacena el vector. Al almacenar el vector se verifica que éste sea distinto a otros vectores previamente almacenados.

Cantidad de vectores factibles. El proceso anterior se realiza tantas veces como sea necesario, para completar un total de v vectores distintos entre sí, definidos por el usuario al momento de procesar.

Vecindad. Se define un vecino de una solución s , una solución que puede ser obtenida a partir de s , cambiando exactamente un componente del vector solución. Cada vecindad estará compuesta de 40 vecinos, es decir, la solución s más un vector por cada cambio en un componente, de los 39 que

forman el vector. Estos vecinos no necesariamente serán factibles.

Intensificación. Si después de i iteraciones (generación de vectores) no se logra generar un vector distinto a los almacenados, se realiza una movida de intensificación. El número de iteraciones para obtener nuevos vectores es definido por el usuario, al momento de procesar. Esta movida consiste en cambiar 1 componente del vector, localizado en forma aleatoria y asegurando su factibilidad. Esta movida se realiza con cada uno de los vectores almacenados o hasta que se completen los v vectores distintos (1 vecino por vector, de ser necesario se genera más de un vecino por vector).

Diversificación. Si después de haber realizado la movida de intensificación aún no se ha logrado generar los v vectores distintos, se realiza una movida de diversificación, consistente en cambiar c componentes de cada uno de los vectores generados, hasta completar la meta. La localización de los componentes a modificar se realiza en forma aleatoria y asegurando su factibilidad. El número de componentes para diversificar es definido por el usuario, al momento de procesar. De ser necesario se combina diversificación con intensificación, es decir, se genera la movida de diversificación y sobre el nuevo vector se generan sus vecinos, refactibilizando si es necesario. Adicionalmente se realiza un tipo particular de diversificación, esta consiste en hacer cero los cinco primeros componentes de cada vector generado, de modo tal de tener una copia de cada vector, pero sin preparación de suelo. El objeto de esta diversificación es asegurar que se explora esa parte del espacio solución. Esta diversificación tenderá a duplicar la cantidad de vectores que se busca encontrar.

Finalización del proceso. El proceso de generación de soluciones concluye con la generación de v soluciones distintas, las que serán evaluadas por PROYMAN.

RESULTADOS Y DISCUSION

Comparación de situaciones. Se trabajó sobre la base de un grupo de 7 fundos localizados geográficamente cercanos, el cual cuenta con una superfi-

cie de 920 hectáreas. Para efectos de evaluar la bondad de las respuestas del sistema implementado, se compararon las siguientes situaciones:

- Solución *Sin Intervenciones*.
- Solución *Actual*, que corresponde a lo que se haría con los procedimientos en uso.
- Solución *PROYMAN*, que corresponde a la solución entregada por el sistema de apoyo a la toma de decisiones.

Para cada solución se entrega como resultado el VPS de la solución, el costo de silvicultura y la distribución de superficie de plantaciones por esquema de manejo. El costo de silvicultura se refiere a la aplicación de faenas definidas como variables de decisión. La proporción de superficie por esquema de manejo está dada por las condiciones naturales del sitio, más las faenas de establecimiento, si la solución las incluye.

Solución Sin Intervenciones. No considera intervenciones de establecimiento. El resultado para el grupo de fundos es el siguiente: Superficie de plantación de 920 ha; VPS de la solución de US\$ 604.968; Costo de silvicultura de US\$ 0. La siguiente es la distribución de la superficie de plantaciones (920 ha) por esquema de manejo: manejo pulpable de 197 ha (21%); manejo multipropósito de 710 ha (77%); manejo intensivo de 13 ha (2%).

Solución Actual. Esta solución se obtiene con los procedimientos actualmente en uso. El resultado para el grupo de fundos es el siguiente: Superficie de plantación de 920 ha; VPS de la solución de US\$ 817.366; costo de silvicultura de US\$ 613.778. La siguiente es la distribución de la superficie de plantaciones (920 ha) por esquema de manejo: manejo pulpable de 0 ha (0%); manejo multipropósito de 0 ha (0%); manejo intensivo de 920 ha (100%).

Solución PROYMAN. Esta solución corresponde a un promedio entre 50 soluciones, proporcionadas por el sistema de apoyo a la toma de decisiones. Esta misma comparación se realiza con la mejor solución de entre las 50 soluciones mencionadas. La peor solución encontrada corresponde a la misma solución sin intervenciones presentada anteriormente.

El resultado con solución promedio PROYMAN es el siguiente: superficie de plantación 920 ha; VPS de la solución de US\$ 949.958; costo de silvicultura US\$ 434.511. La siguiente es la distribución de la superficie de plantaciones por esquema de manejo: manejo pulpable de 197 ha (21%); manejo multipropósito de 0 ha (0%); manejo intensivo de 723 ha (79%). El resultado con mejor solución PROYMAN es el siguiente: Superficie de plantación de 920 ha; VPS de la solución US\$ 1.280.188; costo de silvicultura de US\$ 417.432. La siguiente es la distribución de la superficie de plantaciones por esquema de manejo: manejo pulpable y manejo multipropósito de 0 ha (0%); manejo intensivo de 920 ha (100%).

Comparación soluciones PROYMAN versus actual. En general PROYMAN obtuvo mejores resultados (80% de los casos) que la solución *Actual*. En las figuras 1 y 2 se muestran los resultados obtenidos.

Cabe destacar que todos los costos obtenidos por PROYMAN se encuentran por debajo de la solución *Actual*, lo que se explica por las restricciones presupuestarias consideradas.

Una solución sin intervenciones silvícolas, para el grupo de fundos planteado en este trabajo, es decir, para las condiciones particulares de productividad que presenta, con un costo de silvicultu-

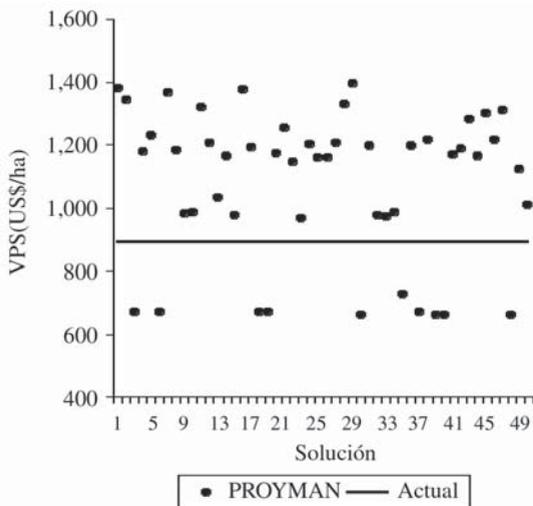


Figura 1. Comparación Valor Potencial del Suelo en soluciones PROYMAN versus solución *Actual*.
 Comparison Bare Land Value in solutions PROYMAN versus solution *Present*.

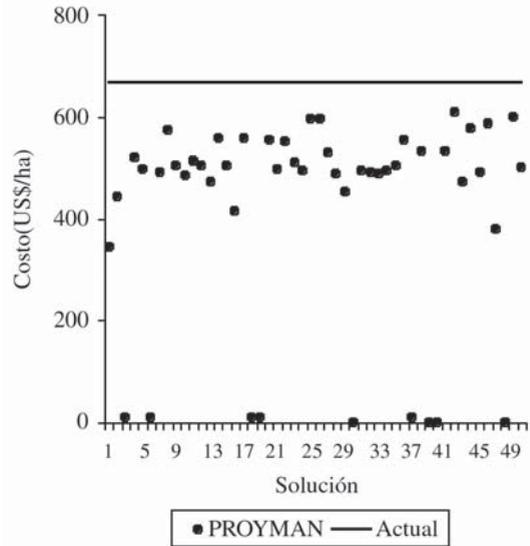


Figura 2. Comparación Costo de Establecimiento en soluciones PROYMAN versus solución *Actual*.
 Comparison Cost of Establishment in solutions PROYMAN versus solution *Present*.

tura de US\$ 0, entrega un VPS de US\$ 604.968, con un promedio de 658 US\$/ha. El manejo multipropósito concentra la mayor proporción de superficie, seguido por el manejo pulpable, siendo el manejo intensivo marginal en su participación.

Una solución más ajustada a la realidad actual entrega un costo de silvicultura de US\$ 613.778, lo cual genera un VPS de US\$ 817.366, con un promedio de 888 US\$/ha. El manejo intensivo concentra el 100% de la superficie del grupo.

El promedio de 50 soluciones, entregadas por el sistema de apoyo a la toma de decisiones desarrollado, significa un costo de silvicultura de US\$ 434.511, lo cual entrega un VPS de US\$ 949.958, con un promedio de 1.033 US\$/ha. El manejo intensivo concentra un 79% de la superficie del grupo y el manejo pulpable un 21%.

La mejor de 50 soluciones, entregadas por el sistema de apoyo a la toma de decisiones desarrollado, significa un costo de silvicultura de US\$ 417.432, lo cual entrega un VPS de US\$ 1.280.188, con un promedio de 1.392 US\$/ha. El manejo intensivo concentra un 100% de la superficie del grupo.

Al comparar la solución promedio, entregada por el sistema de apoyo a la toma de decisiones

PROYMAN, versus la solución *Actual* se tiene un incremento del 16% en el VPS. Si la comparación es con respecto a la solución sin intervenciones el incremento es de un 57%.

Al comparar la mejor solución, entregada por el sistema de apoyo a la toma de decisiones PROYMAN versus la solución *Actual* se tiene un incremento del 57% en el VPS. Si la comparación es con respecto a la solución sin intervenciones el incremento es de un 112%.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Al aplicar silvicultura de establecimiento se produce una importante mejora en la rentabilidad del negocio forestal. No obstante, esto no tiene un comportamiento lineal, ya que una silvicultura adecuada al sitio podrá ser menos intensiva (de menor costo), pero de mayor rentabilidad, dado que apunta a aquellos factores que generan un mayor VPS.

La parametrización de variables clave en el proceso de establecimiento es una característica necesaria y muy importante para un sistema de apoyo a la toma de decisiones, ya que de un adecuado manejo de éstas dependerá la bondad de las soluciones que genere. Es decir, las ganancias deben reflejar los factores limitantes que presenta un sitio. En otras palabras, si un determinado sitio presenta limitaciones nutricionales, la respuesta a una fertilización será mayor que aquellos que no presente esta limitación, en forma tan marcada, de lo cual se desprende la importancia de una precisa definición de áreas homogéneas de productividad.

En general, el sistema de apoyo a la toma de decisiones PROYMAN, versus la solución *Actual*, entregó mejores resultados en términos de Valor Potencial del Suelo. Esto podría evidenciar la dificultad de manejar, en forma "manual", la gran cantidad de variables del establecimiento de plantaciones y los consecuentes resultados en la rentabilidad del negocio forestal.

La agrupación de fundos no tuvo efecto sobre la decisión de realizar preparación de suelo, dado que ninguna de las soluciones seleccionadas por PROYMAN incluía esta faena, debido a su menor VPS en relación a soluciones sin preparación de suelo, probablemente por la escasa ganancia que ésta presenta, la cual aparentemente no com-

pensaría el costo de realizarla. Por otro lado, PROYMAN privilegia faenas de menor costo y de mayor aporte al VPS, por restricciones presupuestarias.

La agrupación de fundos tuvo efecto en la decisión sobre rodales vecinos, por restricción de presupuesto, en el caso de fundos que quedaron sin intervenciones.

La resolución del problema planteado considera el uso de una heurística simple, la cual es mejorable, no obstante ésta entrega resultados satisfactorios. Las futuras mejoras que se realicen deben considerar la aplicación de alguna metaheurística, para lo cual se requiere reducir los tiempos de proceso, especialmente en lo referido a la conexión con el modelo de proyección de crecimiento y rendimiento.

REFERENCIAS

- (1) ALVAREZ, J. Diseño, construcción y evaluación de un modelo de apoyo a la toma de decisiones en control químico de malezas, en plantaciones de *Pinus radiata* D. Don. Tesis MSc Economía Agraria. Pontificia Universidad Católica de Chile, 2001, 94 p.
- (2) ERIKSSON, L.O. Two methods for solving stand management problems based on a single tree model. *Forest Science*, 1994, vol. 40, p. 732-758.
- (3) MASON, EUAN G. Decision-support systems for establishing radiata pine plantations in the Central North Island of New Zealand. In: *Forestry*, 1992. Christchurch: University of Canterbury, p. 301.
- (4) MASON, EUAN G. Decision tools for establishment forest plantations. In: *Second International Conference on Forest Vegetation Management*, 1995. Rotorua, New Zealand, March 20-24.
- (5) MASON, EUAN G. A plantation establishment decision-support system. In: *School of Forestry. University of Canterbury*, 1996, Christchurch, New Zealand.
- (6) MASON, E., A.G.D. WHYTE, R.C. WOOLLONS, B. RICHARDSON. 1997. A model of the growth of juvenile radiata pine in the Central North Island of New Zealand: Links with older models, and rotation length analyses of the effects of site preparation. *Forest Ecology and Management*, 1997, vol. 97, p. 187-195.
- (7) MONTES, C. A silvicultural decision support system for loblolly pine plantations. Tesis MSc Forestry. North Carolina State University, 2001, 151 p.
- (8) VARMA, V.K., I. FERGUSON, I. WILD. Decision support systems for the sustainable forest management. *Forest Ecology and Management*, 2000, vol. 128, p. 49-55.
- (9) ROISE, J.P. A nonlinear programming approach to stand optimization. *Forest Science*, 1986, vol. 32, p. 735-748.
- (10) AMIDON, E.L., G.S. AKIN. Dynamic programming to determine optimum levels of growing stock. *Forest Science*, 1968, vol. 14, p. 287-291.
- (11) ROISE, J.P. An approach for optimizing residual diameter class distributions when thinning even-aged stands. *Forest Science*, 1986, vol. 32, p. 871-881.

- (12) GLOVER, F., M. LAGUNA. *Tabu Search*. Massachusetts. Kluwer Academic Publishers, 1997. 382 p.
- (13) WIKSTRÖM, P., L. ERIKSSON. Solving the stand management problem under biodiversity related considerations. *Forest Ecology and Management*, 2000, vol. 126, p. 361-376.
- (14) KIRKPATRICK C.D., JR. GELATT, M.P. VECCHI. Optimization by Simulated Annealing. *Science*, 1983, vol. 220, p. 671-680.
- (15) COOPS, N. New tool for predicting forest growth. *Onwood CSIRO*, 2000, vol. 30, p. 2-3.
- (16) LANDSBERG, J.J., R.H. WARING. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. *Forest Ecology and Management*, 1997, vol. 95, p. 209-228.
- (17) MASON, E.G., P.G. MILNE. Effects of weed control, fertilization, and soil cultivation on the growth of *Pinus radiata* at midrotation in Caterbury, New Zealand. *Canadian Journal of Forest Research*, 1999, vol. 29, p. 985-992.
- (18) PIENAAR, L.V., J.W. RHENEY. Modeling stand level growth and yield response to silvicultural treatments. *Forest Science*, 1995, vol. 41, p. 629-638.
- (19) SANDS, P.J., M. BATTAGLIA, D. MUMMERY. Application of process-based models to forest management: experience with PROMOD, a simple plantation productivity model. *Tree Physiology*, 2000, vol. 20, p. 383-392.
- (20) SNOWDON, P. Modeling Type 1 and Type 2 growth responses in plantations after application of fertilizer or other silvicultural treatments. *Forest Ecology and Management*, 2002, vol. 163, p. 229-244.
- (21) FUNDACION CHILE. *Manual de Usuario del Simulador Radiata Plus versión 5.4*. Proyecto Modelo Nacional de Simulación de Pino Radiata. Fundación Chile. Concepción. Chile. 2002. 54 p.

Recibido: 19.04.04
Aceptado: 28.07.05