

Instrumentalización de un uso múltiple y sustentable de recursos forestales mediante modelos estratégicos de planificación

Horacio Bown¹ y Salvador Gezán²

*Departamento de Manejo de Recursos Forestales, Universidad de Chile¹
CEFOR, Universidad Austral de Chile²*

RESUMEN

Se propone un modelo para la programación del manejo de bosques, considerando múltiples objetivos y restricciones económicas, sociales y ambientales (de flujo no decreciente). Se desarrolló un caso de estudio considerando un patrimonio de 15.000 ha formado por tres macro-rodajes de Roble, Raulí y Coigüe, ubicados en la Comuna de Panguipulli, Provincia de Valdivia en Chile. Los regímenes silviculturales fueron una combinación del método silvicultural (talarrasa o cortas de protección) y el área máxima de cosecha (<25 ha, 25-50 ha, >50 ha). El modelo fue corrido para un horizonte de planificación de cien años, agregando el tiempo en periodos de diez.

Se analizaron siete escenarios considerando los perfiles de diferentes tomadores de decisiones. El perfil fue definido por el peso relativo que cada tomador de decisiones asignó a los objetivos económicos, sociales y ambientales. El objetivo económico se representó por el Valor Presente Neto (VPN), mientras que el objetivo social por el nivel de empleo. El objetivo ambiental fue representado a través de un índice de pérdida de suelos basado en el factor de cobertura (C) de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos. De esta forma, se determinó el nivel de logro para cada objetivo respecto del ideal para cada perfil de tomador de decisiones.

Aquellos tomadores de decisiones que ponderan el objetivo económico diez veces más importante que los sociales y ambientales (logro del 87 %, 38 % y 46 % respectivamente), adoptan la postura de cosechar principalmente mediante talarrasa en grandes superficies (>50 ha), reemplazando gradualmente la práctica, y hacia el final del horizonte de planificación, por cortas de protección dispersas en áreas pequeñas (<25ha).

Aquellos tomadores de decisiones que ponderan el objetivo social diez veces más importante que los económicos y ambientales (logro del 93%, 30% y 79% respectivamente), adoptan la postura de cosechar principalmente mediante cortas de protección dispersas en áreas pequeñas (<25ha), a lo largo de la totalidad del horizonte de planificación.

Aquellos tomadores de decisiones que ponderan el objetivo ambiental diez veces más importante que los económicos y sociales (logro del 92%, 20% y 20 % respectivamente), adoptan la postura de reducir significativamente la tasa de cosecha en relación con los dos escenarios precedentes, y cosechar mediante cortas de protección dispersas en áreas pequeñas (<25ha).

En contraste a los perfiles extremos, definidos por los autores como aquellos con logros de cualquier objetivo de menos del 50%, los perfiles no-extremos acertaron las distancias entre los niveles de logro e hicieron más probable transar y alcanzar compromisos entre los distintos tomadores de decisiones. Se propone definir perfiles no-extremos basados en

modelación por múltiples objetivos, y buscar aquellos aspectos relevantes que explican diferencias significativas en los niveles de logro. Estos son precisamente los aspectos en los cuales se debieran centrar las negociaciones.

Palabras claves: *planificación por múltiples objetivos, manejo sustentable, análisis de compromiso*

SUMMARY

A model is proposed for the management scheduling of a forest state considering multiple objectives and economic, social and environmental constraints (non-decreasing yield). A case study was developed regarding a forest estate (15.000 ha) made up by three croptypes of three native beech species located in the Comuna of Panguipulli, Province of Valdivia in Chile. The management regimes were a combination of silvicultural methods (clearfelling or shelterwood system) and size of the maximum area harvested (<25ha, 25-50 ha, >50ha). The model was run for a planning horizon of hundred years, and time was aggregated in periods of ten years.

Seven scenarios were analysed considering the profile of different decisions makers. The profile was defined by the relative weight each decisions maker assigned to the economic, social and environmental objective. The economic objective was represented by the Net Present Value (NPV), while the social objective by the level of employment. The environmental objective was represented through an index of soil loss based on the Cover Factor (C) of the Universal Soil Loss Equation. Thus, the level of achievement of each goal was determined for each decisions maker profile.

For those decision makers that weight the economic objective ten times over the social and environmental ones (achievement of 87%, 38 % and 46 % respectively), the decision of harvesting was mainly on clearfelling in large areas (>50 ha), replacing gradually by the end of the planning horizon for the shelterwood system in small areas (<25 ha).

For those decision makers that weight the social objective ten times over the economic and environmental ones (achievement of 93, 30% and 79 % respectively), the decision of harvesting was mainly on shelterwood system in small areas (<25 ha) through the whole planning horizon.

For those decision makers that weight the environmental objective ten times over the economic and social ones (achievement of 92 %, 20%, 20% respectively), the decision was on reducing significantly the rate of harvesting in relation to both scenario discussed above and on using the shelterwood system in small areas (<25 ha).

In contrast to extreme profiles, defined arbitrarily as those with an achievement of any goal of less than 50 %, non-extreme profiles shortened the distances between levels of achievement and did more likely to find trade-offs between decisions makers. We propose to define non-extreme profiles based on multiple-objective modelling, searching for those relevant issues which account for significant differences in levels of achievement of economic, social and environmental objectives. These are precisely the issues that should be compromised.

Key words: *Multiple-objective planning, Sustainable Management, trade-off analysis*

INTRODUCCIÓN

En nuestro entorno económico, social y ambiental actual, los recursos naturales y físicos de nuestro país, se encuentran cada vez con mayores presiones de uso y desarrollo. Como resultado de ello, observamos una mayor preocupación por el ambiente y un aumento en el número y complejidad de los conflictos ambientales. Estos conflictos surgen como resultado, de las diferentes perspectivas de uso y de valores de los distintos actores sociales, en relación con el uso y desarrollo de los recursos naturales y físicos.

En términos simplificados, se puede decir que los conflictos ambientales surgen entre aquellas personas u organizaciones que desean usar los recursos, y aquellas que quieren verlos preservados; de manera que, el manejo de los recursos naturales, hoy en día, es en gran parte acerca de la resolución de conflictos, transando y alcanzando acuerdos entre las partes involucradas.

El manejo sustentable es un concepto central en el uso y desarrollo de los recursos naturales, y posee un carácter económico, social, ambiental e incluso puede involucrar aspectos culturales y espirituales; especialmente cuando reconocemos explícitamente al hombre como parte integrante del ambiente. La condición de sustentabilidad viene dada por una tasa de cambio positiva en los objetivos anteriormente descritos, al considerar un horizonte de planificación relativamente largo. El Proceso Pan-Europeo (Helsinki) definió el concepto de manejo sustentable como el compromiso y uso de los bosques y de las tierras forestales de una manera y a un ritmo tal, que estos fuesen capaces de mantener su biodiversidad, productividad, capacidad de regeneración, vitalidad y potencial para desempeñar, en el presente y en el futuro, las funciones pertinentes de orden ecológico, económico y social, a escala local, nacional y mundial, y además sin causar daños a otros ecosistemas.

En la actualidad, las herramientas de planificación en el ámbito forestal de Chile dan cuenta de objetivos económicos, con una escasa o nula participación de objetivos sociales o ambientales. Por lo general, dichas herramientas se concentran en la generación de madera y finalmente dinero, con poca participación de otros bienes y servicios que también se generan de los bosques, como son la producción de aguas, la protección de los suelos, la recreación, la producción de frutos y la mantención de la biodiversidad, entre otros. Estos modelos tampoco dan cuenta de aspectos sociales, tales como la calidad de vida de las personas, la distribución del ingreso y la condición de pobreza, entre otras. Por lo anterior, se requiere de herramientas de planificación que consideren objetivos económicos, sociales y ambientales simultáneamente, encontrando compromisos entre ellos que permitan alcanzar acuerdos entre los diferentes actores sociales que intervienen en dichos conflictos.

El objetivo fundamental de este trabajo, es proponer un modelo estratégico de planificación que considere objetivos económicos, sociales y ambientales; y que permita instrumentalizar un uso múltiple y sustentable de los recursos forestales, aplicando dicha metodología en un caso de estudio.

PLANIFICACIÓN FORESTAL

La planificación en el ámbito forestal ha evolucionado de acuerdo a los cambios en los objetivos de la sociedad con relación a los bosques. Por muchas décadas, los forestales estuvieron preocupados por la continuidad en la satisfacción de la demanda de los productos forestales y por tanto la planificación forestal tradicionalmente evolucionó por los temores de no ser capaces de satisfacerla. Estos temores de producción futura inadecuada indujeron un enfoque riguroso a la regulación forestal en Europa (*Davis & Johnson, 1987; Johnson, 1989*). Tradicionalmente, un bosque regulado fue entendido como un bosque en el cual las clases de edad y tamaño de los árboles estaban representadas en tal proporción y se encontraban creciendo a tasas tales, que se obtenía un rendimiento volumétrico y calidad de productos aproximadamente igual en forma periódica y permanente en el tiempo (*Dykstra, 1984; Davis & Johnson, 1987*). Tradicionalmente este concepto se ha conocido con el nombre de rendimiento sostenido, pero es análogo al concepto de sustentabilidad y manejo sustentable, y considera a los bosques como una fuente renovable de bienes tangibles e intangibles, y no sólo madera como algunas veces se considera. Existen múltiples razones por las cuales se hace deseable obtener un rendimiento periódico del bosque en el tiempo, algunas de las cuales se enuncian a continuación:

- (i) Se cuenta con un rendimiento periódico relativamente uniforme en el tiempo; e.g. volumen de madera de similar tamaño, calidad y valor, lo cual provee las bases para un negocio forestal estable.
- (ii) Se utiliza el bosque a plena capacidad productiva.
- (iii) Se facilita el manejo financiero mediante un balance razonable entre costos e ingresos en forma periódica.
- (iv) Se logra mayor higiene y seguridad frente a incendios, insectos, enfermedades y otros peligros debido a que el bosque se mantiene creciendo vigoroso, y usualmente bien distribuido en cuanto a edades
- (v) Se presenta la máxima compatibilidad entre producción maderera y otros usos como la recreación, la protección de cuencas y del suelo, y la producción de forraje, entre otros.
- (vi) Se genera continuidad de empleo

A saber, el enfoque tradicional a la regulación forestal contemplaba dos categorías fundamentales; (i) regulación por área y (ii) regulación por volumen. En la regulación por área, un bosque no regulado era transformado en un bosque regulado mediante cosecha y regeneración de la misma superficie cada año. Esta área es la misma que sería cosechada y regenerada una vez que se alcanzara un bosque completamente regulado. Mediante control por área se puede lograr la regulación al final de la primera rotación, pero usualmente al costo de un flujo desigual de madera a lo largo de la rotación. En la regulación por volumen, el mismo volumen era cosechado cada año y su correspondiente área regenerada, obteniendo un flujo de madera relativamente constante a lo largo del tiempo pero al costo de no lograr que el bosque se encontrara completamente regulado al final de la primera rotación (*Davis & Johnson, 1987*).

Aún cuando las técnicas tradicionales tienen un inmenso valor histórico y educacional, usualmente ellas no pueden ser usadas en forma exitosa en situaciones del mundo real, debido a la obsolescencia del concepto de bosque completamente regulado. Además, el manejo forestal moderno considera objetivos más amplios y mayores cantidades de

información para apoyar los procesos de toma de decisiones que en el pasado. Esto último se debe al mejoramiento y mayor disponibilidad de tecnología computacional. Por estas y otras razones, es que se han desarrollado diferentes y variados enfoques para la modelación del patrimonio forestal.

El Problema de Programación de Cosecha

El problema de programación de cosecha consiste en decidir *Cuándo, Dónde y Cuánto* cortar, para satisfacer a niveles aceptables, los objetivos del manejo de un bosque o patrimonio. Las decisiones que se toman con relación al problema de programación de cosecha usualmente tienen un gran impacto económico sobre las inversiones, las ganancias y las actividades industriales (*Villanueva, 1992*).

La programación de la secuencia de cortas en el tiempo es una tarea compleja, porque involucra el análisis de numerosos factores atribuibles al bosque, a la industria y al mercado, existiendo una gran cantidad de posibles soluciones. Además, los sistemas forestales consideran un alto grado de incertidumbre debido al horizonte de tiempo de la producción maderera (*Davis & Johnson, 1987*).

Los Modelos de Patrimonio

Los modelos de planificación en el sistema productivo forestal pueden ser divididos básicamente en dos categorías: los modelos de crecimiento; y los modelos de patrimonio (o modelos de programación de cosecha). La diferencia entre estos dos grupos es el nivel al cual ellos trabajan. Los modelos de crecimiento y rendimiento trabajan a nivel del árbol o del rodal individual donde los modelos de patrimonio lo hacen a nivel del bosque o patrimonio (una agregación de rodales de diferentes especies, edades, productividades y regímenes de manejo). Estos modelos se requieren porque las estrategias óptimas de manejo a nivel del rodal individual son raramente óptimas a nivel del patrimonio forestal (*Johnson, 1989*).

Un modelo de patrimonio es una representación matemática del sistema productivo forestal, el cual es usado para planificar la cosecha y otras actividades silviculturales de un conjunto de rodales que conforman el patrimonio de una organización, de una región o de un país. En este contexto, el tomador de decisiones posee una herramienta para determinar *Cuándo, Dónde y Cuánta* materia prima cortar para satisfacer los objetivos del manejo, basado en restricciones del bosque, de la industria y del mercado. También pueden ser utilizados para explorar los efectos de determinadas estrategias de manejo sobre el desempeño financiero, social o medioambiental de la organización.

Las herramientas más comúnmente utilizadas en modelación de patrimonio son la Programación Lineal (PL) y la Simulación. Generalmente, los modelos de programación lineal requieren de una considerable simplificación de los objetivos del manejo y del número de variables consideradas. En contraste, los modelos de simulación pueden trabajar a un nivel más detallado, pero evaluando sólo una reducida proporción del universo de posibilidades, con el consecuente peligro de no considerar aquella que sea más rentable (*García, 1984*).

No obstante lo anterior, la programación lineal y la simulación se consideran herramientas complementarias más que competitivas (*García, 1984*). Esto se debe a que

un modelo de programación lineal puede reducir el universo de posibilidades a un nivel macro, lo que posteriormente puede ser explorado a un nivel más detallado usando simuladores (*Bown, 1996*). En la práctica, sin embargo, usualmente no es tan fácil alterar debido a los diferentes modelos conceptuales del bosque y los diferentes requerimientos de información (*García, 1984*).

Modelos de Optimización

Se han utilizado diferentes enfoques para la modelación del problema de programación de cosecha desde la década de los sesenta. Los primeros escritos fueron propuestos por *Curtis (1962)*; *Loucks (1964)* y *Nautiyal & Pearse (1967)*, por nombrar sólo a algunos. Sin embargo, no fue hasta la década de los setenta que los modelos llegaron a estar disponibles y a ser utilizados en forma rutinaria en la programación de cosecha.

Johnson & Scheurman (1977) revisaron y analizaron los modelos existentes y los clasificaron como tipo I y tipo II. En el modelo tipo I, la identidad de los rodales se mantiene íntegra a lo largo del horizonte de planificación, aunque éstos pueden ser divididos en subunidades bajo distintos regímenes silviculturales.

Los tratamientos silviculturales en este tipo de modelo son relativamente fijos y por lo tanto, no se permite la combinación o cambio de los tratamientos silviculturales una vez que ellos han sido elegidos. Un mayor desarrollo y análisis del modelo tipo I ha sido realizado por *Weintraub & Cholaky (1991)* y *Morales & Weintraub (1991)*.

Por otro lado, en un modelo tipo II la identidad de los rodales se pierde al momento de cosechar rodales distintos que se fusionan al momento de regenerar. Este modelo permite manejar los tratamientos silviculturales y a la edad de rotación como variables optimizables (*Johnson & Scheurman, 1977*).

Un modelo posterior fue propuesto por *García (1984)* llamado por el mismo autor como modelo "A" (*García, 1990*). Sin embargo por conveniencia nos referiremos a este como modelo tipo III siguiendo la notación adoptada por *Johnson & Scheurman (1977)*. Este modelo ha sido implementado como FOLPI (Forest Optimiser Linear Programming Interpreter) por el New Zealand Forest Research Institute.

En un modelo tipo III, como en uno tipo I, la identidad de cada macro-rodal se mantiene a través del horizonte de planificación. Así, el estado del bosque en un periodo determinado es una función lineal del estado del mismo bosque en el periodo precedente y esta operación es propagada en el tiempo hasta el final del horizonte de planificación (*García, 1990*). Un modelo tipo III también toma algunos elementos del tipo II. De hecho, en Modelo III, los regímenes silviculturales así como las edades de rotación pueden ser manejadas como variables optimizables. Adicionalmente, el Modelo III permite la transferencia de superficie desde un macro-rodal a otro lo cual constituye una manera muy eficiente de lidiar con regímenes silviculturales.

No se puede decir que un modelo es superior a otro. Depende de la situación bajo análisis y de los objetivos de quien toma decisiones. Tradicionalmente estos modelos así llamados de patrimonio, han dado cuenta fundamentalmente de objetivos económicos, otorgando una baja ponderación a los objetivos sociales y ambientales, o subordinándolos a los primeros.

Toma de decisiones bajo múltiples objetivos

En el complejo mundo actual, muchos de los problemas de decisión en relación con recursos naturales, consideran múltiples objetivos de uso. Los bosques claramente cumplen una función de producción y protección, las cuales no son necesariamente excluyentes. Dentro de los objetivos de uso se encuentra la producción de maderas, frutos y cortezas, la recreación, la conservación de la biodiversidad y la protección de suelos y aguas, entre otros. Algunos de estos usos pueden encontrarse en conflicto (Dykstra, 1984), como usualmente sucede entre la producción maderera y la protección de la fauna amenazada (e.g. Spotted Owl en Oregon)

Cuando existen múltiples objetivos de uso, resulta muy difícil que la misma decisión sea la mejor para todos los objetivos simultáneamente. Aquello que es considerado mejor para algunos, puede no serlo para otros, de manera que se requiere buscar un compromiso entre los objetivos planteados. Este compromiso puede ser influenciado por factores intangibles, por actitudes personales y por los valores de quien toma decisiones (Daellenbach, 1983). Probablemente la técnica más ampliamente utilizada cuando existen objetivos en conflicto es programación por múltiples objetivos, la cual corresponde a una extensión de programación lineal. La programación por múltiples objetivos minimiza las desviaciones entre el máximo valor alcanzable para cada objetivo, y lo que se alcanza producto del conflicto entre los mismos. Así, la función objetivo puede ser expresada como la minimización de desviaciones ponderadas, sujeta a restricciones físicas y restricciones de los objetivos de uso del recurso. Las restricciones de los objetivos se satisfacen tanto como sea posible, pero no requieren ser logradas plenamente.

A pesar de la gran flexibilidad de programación por metas, esta requiere la cuantificación explícita de los máximos niveles de logro de los objetivos y una estructura de preferencias que define las ponderaciones que el tomador de decisiones asigna a cada uno de los objetivos con relación a los otros. La dificultad en la especificación de los máximos niveles de logro y la estructura de preferencias, ha sumido a la programación por múltiples objetivos en fuerte controversia (Dykstra, 1984). No obstante, a nuestro modo de ver, el gran potencial de esta herramienta está en poder conocer y explorar el comportamiento del sistema. A saber, la información con que contamos es sólo parcialmente confiable, y esto sumado a la incertidumbre del horizonte de tiempo de las funciones de producción y protección, hace necesario enfatizar en las tendencias más que en los resultados absolutos y sacarle el máximo de provecho al análisis de sensibilidad de los datos.

Sólo para ilustrar el método, se presenta a continuación dos formulaciones diferentes para el mismo problema, basado en dos objetivos y tres restricciones:

Objetivo 1. Maximizar $0,040 x_1 + 0,060 x_2$

Objetivo 2. Maximizar $0,072 x_1 + 0,036 x_2$

Sujeto a (s.a.):

Restricción 1. $x_1 \leq 4$

Restricción 2. $x_2 \leq 5$

Restricción 3. $3.000 x_1 + 2.000 x_2 \leq 16.000$

Excepto por una coincidencia, el máximo valor de las dos funciones objetivo no será obtenido con los mismos valores de las variables de decisión. En el ejemplo, el máximo valor del objetivo 1 es 0,38, mientras que para el objetivo 2 es de 0,36. Ninguna solución factible excederá estos máximos, y no pueden ser logrados simultáneamente para ambos objetivos. Por tanto, cualquier solución deberá ser un compromiso. La variable s_k representa el diferencial entre el pleno logro del objetivo k y lo que realmente se obtuvo al considerar varios objetivos simultáneamente. Así, cada objetivo puede ser planteado como una restricción adicional:

$$\begin{aligned} 0,040 x_1 + 0,060 x_2 + s_1 &= 0,38 \\ 0,072 x_1 + 0,036 x_2 + s_2 &= 0,36 \end{aligned}$$

Como criterio de optimización se puede minimizar las distancias desde la solución ideal. En general, se consideran las desviaciones porcentuales, porque resulta más fácil establecer compromisos entre objetivos de esta forma. Esto se logra redefiniendo cada variable en términos de la desviación porcentual v_k del máximo logro T_k ($v_k = s_k/T_k$ ó $s_k = T_k v_k$). Si utilizamos como criterio de optimización el minimizar la sumatoria ponderada de las desviaciones obtenemos la formulación MINSUM, que se expresaría de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \text{Min } w_1 v_1 + w_2 v_2 \\ \text{s.a.} \\ \text{Restricción 1. } x_1 &\leq 4 \\ \text{Restricción 2. } x_2 &\leq 5 \\ \text{Restricción 3. } 3.000 x_1 + 2.000 x_2 &\leq 16.000 \\ \text{Objetivo 1. } 0,040 x_1 + 0,060 x_2 + 0,38 v_1 &= 0,38 \\ \text{Objetivo 2. } 0,072 x_1 + 0,036 x_2 + 0,36 v_2 &= 0,36 \\ x_1, x_2, v_1, v_2 &\geq 0 \end{aligned}$$

Así, la solución óptima ocurrirá en un punto extremo de la región factible de las restricciones originales. Resulta importante notar que aún pequeños cambios en los pesos (w_1, w_2) pueden cambiar abruptamente la solución mediante un salto a un punto adyacente extremo de la región factible. Este atributo es válido siempre en las formulaciones MINSUM. Sin embargo, esto es contrario a lo que la intuición indicaría. Un tomador de decisiones esperaría que la solución óptima respondiera gradualmente a pequeños cambios en la estructura de pesos.

Otro enfoque aplicado en la resolución del problema, es el de la formulación MINMAX que consiste en la minimización de la máxima desviación. En este caso las variables de desviación individuales se reemplazan por una única variable de desviación v , la cual mide la máxima desviación fraccional de cualquier objetivo desde el ideal. Lo anterior implica que las restricciones de objetivos que tenían signo $=$ en la formulación MINSUM, pasen a tener signo \geq en la formulación MINMAX. Así, la formulación MINMAX para el problema en cuestión sería la siguiente:

$$\begin{aligned} \text{Min } v \\ \text{s.a.} \\ \text{Restricción 1. } x_1 &\leq 4 \\ \text{Restricción 2. } x_2 &\leq 5 \\ \text{Restricción 3. } 3.000 x_1 + 2.000 x_2 &\leq 16.000 \\ \text{Objetivo 1. } 0,040 x_1 + 0,060 x_2 + (0,38/w_1) v &\geq 0,38 \\ \text{Objetivo 2. } 0,072 x_1 + 0,036 x_2 + (0,36/w_2) v &\geq 0,36 \\ x_1, x_2, v &\geq 0 \end{aligned}$$

Por lo general, la solución óptima para este nuevo problema no se ubicará en un punto extremo de la región factible conformada por las restricciones originales, pero ocurrirá en algún lugar en la frontera entre dos puntos extremos. Mientras mayor sea la ponderación asignada a un objetivo, mayor será el porcentaje de logro de él a su máximo. Este es un atributo de la formulación MINMAX y como resultado de ello, la solución óptima responde gradual y suavemente a los cambios en los pesos. La formulación MINMAX también tiende a dar una distribución más equitativa de los porcentajes de logro que la formulación MINSUM (Daellenbach, 1983)

El mayor atractivo de las formulaciones MINSUM y MINMAX vienen de su simplicidad y del hecho que el problema original de múltiples objetivos es convertido en un problema de programación lineal tradicional, y por tanto la solución puede ser encontrada usando el método simplex.

EL MODELO DE PLANIFICACIÓN POR MÚLTIPLES OBJETIVOS

El método propuesto consiste en modelar un sistema forestal considerando múltiples objetivos y restricciones en el ámbito económico, social y ambiental; siguiendo la estructura de un modelo tipo I. Este se define en términos de sus variables de decisión (actividades), parámetros (valores conocidos), objetivos y restricciones. Los objetivos son de naturaleza económica, social y ambiental; mientras que las restricciones, son de tipo estructural (mantención de superficie) y de sustentabilidad (flujo no decreciente).

1. Variables de Decisión

Se plantea como variable de decisión X_{ij} , que corresponde al área del rodal i que será asignada al régimen silvicultural j desde el inicio al final del horizonte de planificación (H), donde:

$$i=1,2, \dots, m \quad (\text{índice identificador de rodales})$$

$$j=1,2, \dots, n_i \quad (\text{índice indicador de regímenes silviculturales})$$

2. Parámetros del modelo

Se llama parámetros a aquellos valores conocidos que corresponden a los coeficientes de las variables de decisión. Ejemplos de parámetros son los volúmenes por hectárea, proporción volumétrica de productos, precios, tasas de descuento, etc. En términos simplificados ellos pueden ser esbozados como sigue:

E_{ij}	Valor Económico Neto derivado del uso j de una fracción del macrorodal i desde el inicio al final del horizonte de planificación (e.g. valor presente neto en \$/ha).
S_{ij}	Valor Social Neto derivado del uso j del macrorodal i desde el inicio al final del horizonte de planificación (e.g. Empleo expresado como el número de jornadas / ha).
A_{ij}	Valor Ambiental Neto derivado del uso j del macrorodal i desde el inicio al final del horizonte de planificación (e.g. Pérdida de suelos en t/ha)
e_{ij}^t	Valor económico derivado del uso j del macrorodal i en el periodo t (e.g. volumen en m ³ /ha)
s_{ij}^t	Valor social derivado del uso j del macrorodal i en el periodo t (e.g. jornadas/ha)
a_{ij}^t	Valor ambiental derivado del uso j del macrorodal i en el periodo t (perdida de suelos en t/ha)
area $_i$	Superficie del rodal i (ha)

3. Los objetivos

Para lograr sustentabilidad se identifican objetivos económicos, sociales y ambientales.

3.1 Económico. Se debe tender a maximizar el retorno económico de los bosques, a través de la producción de bienes tangibles e intangibles con precios de mercado. Como indicador de desempeño del rol económico de los bosques se puede utilizar el Valor Presente Neto (VPN) o el Valor Esperado del Suelo (VES).

$$(I) \quad \text{Max} \quad \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m X_{ij} E_{ij}$$

3.2 Social. Se debe tender a maximizar la función social de los bosques, a través de la mantención y mejoramiento en el nivel de empleo; y otras funciones como la recreación.

$$(II) \quad \text{Max} \quad \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m X_{ij} S_{ij}$$

3.3 Ambiental. Se debe conservar, mantener y en lo posible aumentar el valor ambiental de los bosques. Esto se puede instrumentalizar a través de la mantención de la biodiversidad, la protección de los suelos y los cursos de agua, entre otros.

$$(III) \quad \text{Max} \quad \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m X_{ij} A_{ij}$$

4. Las Restricciones

Existen dos tipos de restricciones aplicables al problema: las restricciones estructurales y las restricciones de flujo. Las primeras corresponden a las limitaciones físicas, tales como que no se puede manejar una superficie superior a la existente. Las restricciones de flujo se refieren a que el valor económico, social y ambiental debe ser no decreciente, de manera de representar la condición de sustentabilidad.

4.1 Restricciones Estructurales. Las superficies asignadas a diferentes regímenes silviculturales no deben ser superiores a la superficie disponible.

$$\sum_{j=1}^m X_{ij} \leq \text{área}_i \quad \forall i = 1, \dots, n$$

4.2 Restricciones de Flujo de Valor Económico. Se establece que el valor económico del bosque en cada periodo debe ser no decreciente con relación al periodo precedente.

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m X_{ij} e^{t+1}_{ij} - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m X_{ij} e^t_{ij} \geq 0 \quad \forall t = 1, \dots, T-1$$

4.3 *Restricciones de Flujo de Valor Social.* Se establece que el valor social del bosque en cada periodo debe ser no decreciente con relación al periodo precedente.

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m X_{ij} s^{t+1}_{ij} - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m X_{ij} s^t_{ij} \geq 0 \quad \forall t = 1, \dots, T-1$$

4.4 *Restricciones de Flujo de Valor Ambiental.* Se establece que el valor ambiental del bosque en cada periodo debe ser no decreciente con relación al periodo precedente (Como un indicador de que el sistema es ambientalmente saludable).

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m X_{ij} a^{t+1}_{ij} - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m X_{ij} a^t_{ij} \geq 0 \quad \forall t = 1, \dots, T-1$$

La construcción del modelo matemático se realizará a base programación lineal por múltiples objetivos y específicamente de la formulación MINMAX.

EL CASO HIPOTÉTICO DE ESTUDIO

El caso hipotético de estudio consiste en un patrimonio de 15.000 ha de renovales de Roble (*Nothofagus obliqua*) (34%), Raulí (*Nothofagus alpina*) (54%) y Coigüe (*Nothofagus dombeyi*) (12%), ubicados en la Comuna de Panguipulli, X Región. Los macro-rodales se especifican en la tabla 1.

Macro-rodal	Superficie (ha)	Clase de Edad (años)	Rendimiento Hipotético Bertalanfi (Chapman-Richards) (m ³ /ha)
Roble	5100	30-40	$Y = 350 (1 - e^{-0.05 x})^7$
Raulí	8100	20-30	$Y = 600 (1 - e^{-0.05 x})^7$
Coigüe	1800	40-50	$Y = 550 (1 - e^{-0.05 x})^7$

Tabla 1. Area por tipo forestal y clase de edad de renovales de Roble, Raulí y Coigüe en el área de Panguipulli, X Región.

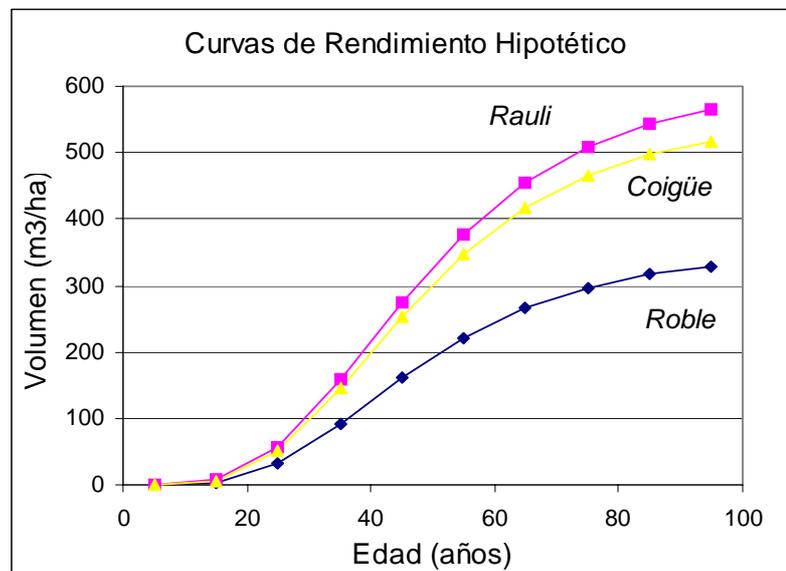


Figura 1. Curvas de rendimiento hipotético para renovales de Roble, Raulí y Coigüe. Las alternativas de uso de cada hectárea fueron divididas en dos métodos silviculturales alternativos y tres niveles de dispersión en superficie. Así, se estableció que cada hectárea puede ser manejada de acuerdo a talarrasa o cortas de protección, y éstas pueden ser realizadas en grandes superficies (>50 ha), o dispersas en medianas (25-50ha) o pequeñas superficies (<25 ha). Los regímenes alternativos se generaron de menor a mayor intensidad silvícola, y se asignaron valores económicos, sociales y ambientales a cada uno de ellos.

Como indicador del valor económico del bosque, se utilizó los retornos netos descontados (7 % p.a.), asumiendo los volúmenes de las curvas hipotéticas de rendimiento, un precio por metro cúbico de 1 unidad monetaria, y costos de cosecha diferenciales para cada tratamiento como se especifica en la Tabla 2. Además, se estima que solo se podría extraer un 70 % del volumen total, donde se opte por cortas de protección, debido a que los árboles que quedan remanentes debieran ser anillados una vez que se establezca la regeneración natural o la plantación.

Como indicador del valor social del bosque se consideró las jornadas de trabajo requeridas para operacionalizar el manejo del bosque, las que se obtuvieron dividiendo el volumen realizable por el rendimiento promedio por jornada de trabajo para los diferentes tratamientos. Se estima que el objetivo social se maximiza cuando se genera mayor cantidad de empleo, y en este sentido pensamos que la mayor intensidad de la silvicultura tendería a lograrlo.

El valor ambiental del bosque se relacionó con la pérdida de suelos, reduciéndose en la medida que aumentan dichas pérdidas. La función de pérdida de suelos fue instrumentalizada, para efectos del caso de estudio, como la sumatoria de los productos entre la superficie cosechada y los factores C para los diferentes tratamientos silviculturales definidos. El factor C corresponde al factor de cobertura de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE), que corresponde a la razón de pérdida de suelos de terrenos bajo un tipo de cobertura con relación al mismo terreno desnudo. Si la superficie se encuentra descubierta C es 1.0, mientras que en sectores con vegetación natural C presenta cercano a 0. En la Tabla 2 se presentan los factores C hipotéticos para los distintos tratamientos silviculturales. Se asume que la talarrasa en grandes superficies genera pérdidas de suelos del orden del 90 % en relación con suelos completamente desnudos, mientras que cortas de protección en pequeñas superficies generan pérdidas del orden del 30 %.

Método de Regeneración	Extensión	Tratamiento	Costo Cosecha (u.m./m ³)	Rendimiento /Jornada (m ³ /j)	Pérdida de Suelos (Factor C en %)
Talarrasa	>50 ha	1	0,10	40	90
	25-50 ha	2	0,15	35	80
	<25 ha	3	0,20	30	70
Cortas de Protección	>50 ha	4	0,30	20	50
	25-50 ha	5	0,45	15	40
	<25 ha	6	0,60	10	30

Tabla 2. Valores económicos, sociales y ambientales de manejar un rodal de acuerdo a diferentes tratamientos silvícolas.

El modelo se construyó sobre la base de una variable X_{ijk} , que representa la superficie del macrorodas i que será manejado de acuerdo al régimen silvicultural j desde el inicio al final del horizonte de planificación y siendo intervenido por primera vez en el periodo k . El tiempo fue agregado en periodos de 10 años sobre un horizonte de planificación de 100 años. Lo anterior permitió definir 180 variables de decisión (3 rodales x 6 tratamientos x 10 periodos).

LAS DECISIONES DE ACUERDO AL PERFIL DEL TOMADOR DE DECISIONES

Quien toma decisiones orientado exclusivamente a maximizar utilidades, optaría por talar completamente el bosque en el primer periodo, vale decir 5.100 ha de Roble, 8.100 ha de Raulí y 1.800 ha de Coigüe, utilizando como método la talarraza en grandes superficies (> 50 ha). Como resultado del ejercicio obtendría \$ 1.830.000, considerando una tasa de descuento del 7 %. Esta opción obviamente no resulta aceptable desde la perspectiva del manejo sustentable de los bosques (Figura 2).

Si consideramos un perfil más conservador, estableciendo restricciones de flujo no decreciente en volumen cosechado a lo largo de todo el horizonte de planificación, se encuentra que el resultado del ejercicio baja ostensiblemente a \$ 1.156.684 (reducción del 36,8 %). Esto se logra cosechando 886.419 m³/periodo basado fundamentalmente en el método de talarraza en grandes superficies.

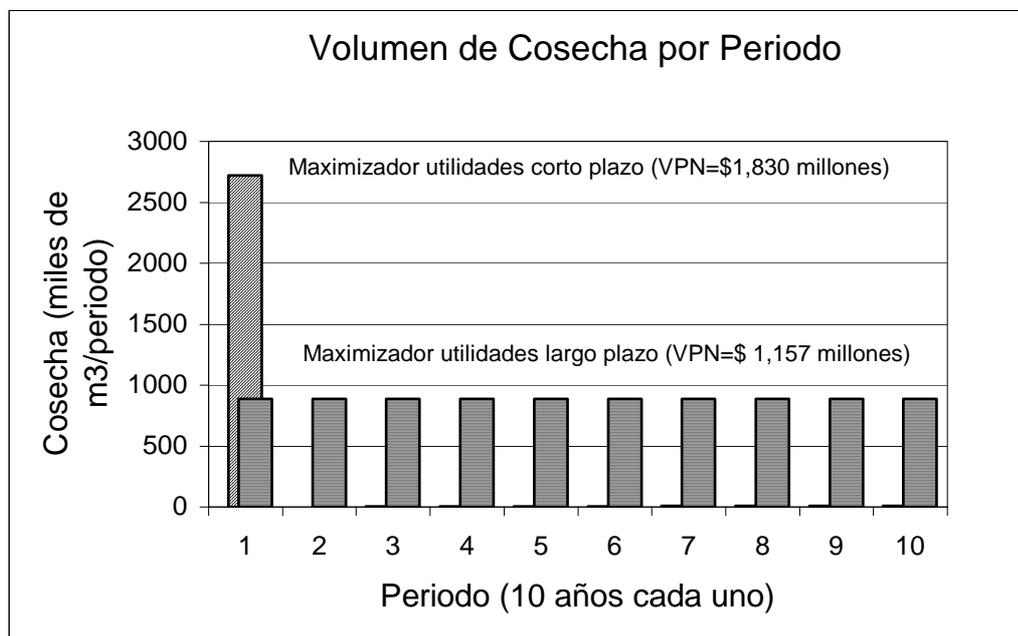


Figura 2. Estrategia de manejo de renovales de acuerdo al perfil del tomador de decisiones

Quien toma decisiones orientado a maximizar la función ambiental, considerando la mínima pérdida de suelos, prohibiría la cosecha de cualquier superficie en cualquier periodo, reduciendo el indicador de pérdida de suelos a un valor de 0. De no ser posible, dilataría la cosecha hasta el final del horizonte de planificación y la realizaría utilizando métodos silviculturales que dieran cuenta de un alto valor ambiental (cortas de protección

dispersas en pequeñas superficies menores de 25 ha). Muy por el contrario, el mayor daño ambiental se produciría al cosechar toda la superficie a talarasa en el primer periodo, obteniéndose un valor máximo del indicador de pérdida de suelos de 3.888.000 unidades ambientales (máxima penalidad).

Quien toma decisiones orientado a maximizar la función social (e.g. empleo), está interesado en maximizar la cantidad posiciones de trabajo asegurando su continuidad en el tiempo. Esto fue modelado maximizando las jornadas de trabajo requeridas para efectura la actividad silvícola y sujeto a restricciones de flujo no decreciente de empleo. Como resultado del ejercicio, se obtendría un valor de 640.158 jornadas de trabajo, generando un total de 58.288 jornadas durante el primer y segundo periodo, 63.607 jornadas desde el periodo 3 hasta el periodo 9, y 78.335 jornadas en el periodo 10; interviniendo el bosque regularmente basado en aquellos métodos silviculturales más intensivos en mano de obra, como son las cortas de protección dispersas en superficies inferiores a 25 ha.

La presentación de los escenarios anteriores, deja en evidencia que los objetivos económicos, sociales y ambientales no trabajan en la misma dirección. Es decir, mientras unos aumentan, otros disminuyen y viceversa. Por ejemplo se observa que en la medida que aumenta el VPN con distintas soluciones, disminuye el valor ambiental y el social y lo mismo sucede con las situaciones análogas. Así, si queremos resolver el problema, resulta indispensable realizar compromisos entre los objetivos involucrados, transando y alcanzando acuerdos entre las partes, de manera de poner gente, valores e intereses a trabajar juntos.

Sabemos que los valores máximos para la función económica, social y ambiental son de \$1,156 millones, 640.158 jornadas y 0 unidades de pérdida de suelos, respectivamente. Estos valores corresponden a los máximos alcanzables para cada una de estas funciones, de manera que cualquier solución que considere los tres objetivos simultáneamente, resulta ser un compromiso con valores inferiores a los alcanzados cuando se considera sólo uno de los objetivos. La formulación MINMAX considera la minimización de la máxima diferencia porcentual entre el logro actual y el ideal de un objetivo determinado. Así, las funciones económica, social y ambiental pueden ser incorporadas en forma de restricciones al problema de programación lineal:

Min v

st

$$F.O. Económica \quad + \quad (1.156.000 /w1) v \quad \geq \quad 1.156.000$$

$$F.O. Social \quad + \quad (640.158 /w2) v \quad \geq \quad 640.158$$

$$F.O. Ambiental \quad - \quad (3.888.000 /w3) v \quad \leq \quad 0$$

+

Restricciones Estructurales

+

Restricciones de Flujo

Donde *v* corresponde a la máxima desviación fraccional del nivel de logro ideal, y *w1,w2,w3* corresponden a los pesos que distintos tomadores de decisiones asignarían a los objetivos económicos, sociales y ambientales en la resolución del problema. Las restricciones de flujo se establecieron de manera tal que el volumen cosechado en cada periodo fuese no decreciente en relación con el periodo precedente, al igual que el empleo.

La pérdida de suelos al ser recíprocamente inversa al valor ambiental, se estableció que fuera decreciente en valor de un periodo en relación con el precedente.

De acuerdo a lo anterior, se modelaron siete escenarios diferentes, considerando pesos relativos de 1,2 y 10 de los objetivos entre sí. Como resultado de ello se determinaron los niveles de logro cuando un objetivo ponderaba diez veces más que los restantes (Caso 1,2 y 3), cuando ponderaba el doble (Caso 5,6 y 7) y cuando ponderaban equilibradamente todos ellos (Caso 4). La tabla 3 muestra los distintos niveles de logro en los distintos escenarios.

Caso	Objetivo	Peso	Porcentaje de Logro	Estrategia
1	Económico	10	87 %	Se cosecha mediante talarrasa en grandes superficies (> 50 ha) durante los primeros periodos, remplazando la práctica gradualmente por talarrasa en superficies menores, y luego hacia el final del horizonte de planificación, por cortas de protección dispersas en pequeñas superficies (25 ha). Se cosecha un nivel estabilizado de 788.000 m3.
	Social	1	38 %	
	Ambiental	1	46 %	
2	Económico	1	30 %	Se cosecha fundamentalmente en aquellos tratamientos más intensivos en mano de obra, como son las cortas de protección dispersas en pequeñas superficies (< 25 ha), logrando un nivel estabilizado no decreciente de aproximadamente 65.000 jornadas por periodo a partir del periodo 4.
	Social	10	93 %	
	Ambiental	1	79 %	
3	Económico	1	20 %	Los niveles de cosecha bajan ostensiblemente con relación a los escenarios anteriores, concentrándose fundamentalmente en cortas de protección dispersas en pequeñas superficies que corresponden a los tratamientos de menor impacto o penalidad ambiental. Se logra un nivel estabilizado de penalidad ambiental de 17.000 unidades ambientales por periodo.
	Social	1	20 %	
	Ambiental	10	92 %	
4	Económico	1	65 %	Se cosecha mayoritariamente mediante talarrasa y cortas de protección ambas dispersas en pequeñas superficies (<25 ha). No obstante lo anterior se aprecian superficies considerables, aunque en menor cuantía, de talarrasa en grandes superficies. Los volúmenes de cosecha, jornadas de trabajo y unidades de penalidad ambiental para este perfil equilibrado fueron de 687.000 m3, 54.000 jornadas y 118.000 unidades ambientales.
	Social	1	65 %	
	Ambiental	1	65 %	
5	Económico	2	77 %	Se cosecha fundamentalmente mediante talarrasa y cortas de protección, ambas dispersas en pequeñas superficies (<25 ha), logrando un nivel no decreciente en volumen cosechado de 745.000 m3 por periodo.
	Social	1	55 %	
	Ambiental	1	56 %	
6	Económico	1	54 %	Se cosecha fundamentalmente mediante cortas de protección y talarrasa dispersa en pequeñas superficies (<25 ha), logrando un nivel no decreciente valor social de 48.000 jornadas por periodo.
	Social	2	77 %	
	Ambiental	1	68 %	
7	Económico	1	50 %	Se cosecha fundamentalmente mediante cortas de protección y talarrasa dispersa en pequeñas superficies (<25 ha), logrando un nivel decreciente en penalidad ambiental hasta estabilizarse en 74.000 unidades.
	Social	1	50 %	
	Ambiental	2	75 %	

Tabla 3. Solución del problema de manejo de recursos de acuerdo al perfil de quien toma decisiones

La Figura 3 muestra el flujo de volumen cosechado de acuerdo al perfil del tomador de decisiones. Se puede apreciar que existen fuertes diferencias en los montos de cosecha cuando la ponderación de un objetivo es alta en relación con los restantes. Además, se puede apreciar que existe una política de rendimiento no decreciente, que es independiente del perfil del tomador de decisiones.

La Figura 4 muestra el flujo de valor social, expresado como el número de jornadas por periodo, de acuerdo al perfil de quien toma decisiones. Se puede apreciar grandes diferencias en la cantidad de empleo cuando la ponderación de un objetivo es alta en relación con los restantes. Además, se puede apreciar que existe una política de rendimiento no decreciente, que es independiente del perfil del tomador de decisiones.

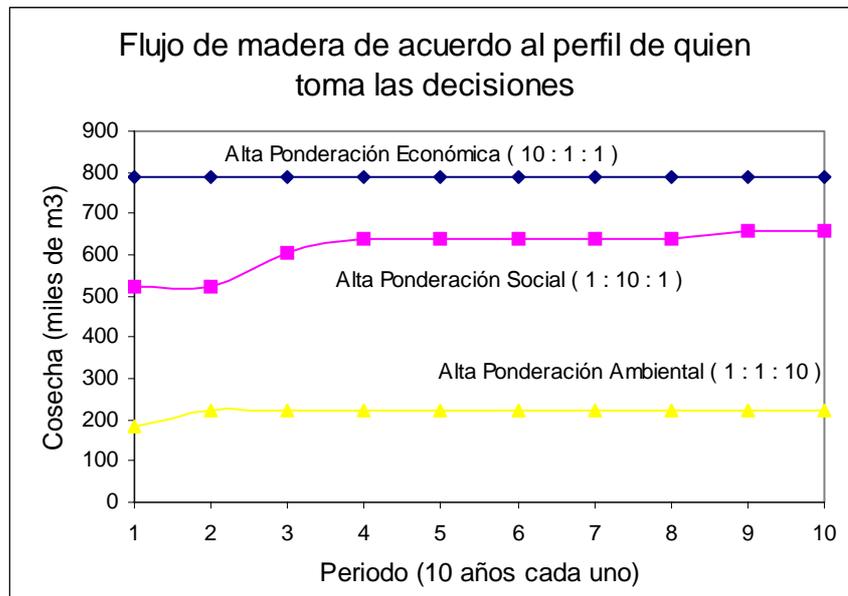


Figura 3. Flujo de madera de acuerdo al perfil de quien toma decisiones.

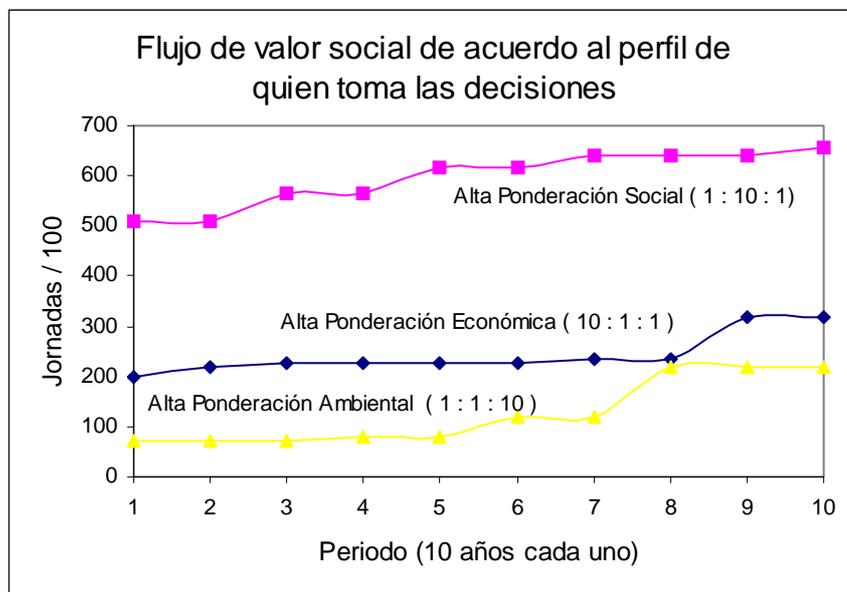


Figura 4. Flujo de Valor social de acuerdo al perfil de quien toma decisiones

La Figura 5 muestra el flujo de penalidad ambiental, expresado como un indicador de la pérdida de suelos por periodo, de acuerdo al perfil de quien toma decisiones. Además, se puede apreciar que existe una política decreciente de pérdida de suelos, que se logra vía

disminución del nivel global de cosecha y/o métodos de cosecha que provoquen menores pérdidas.

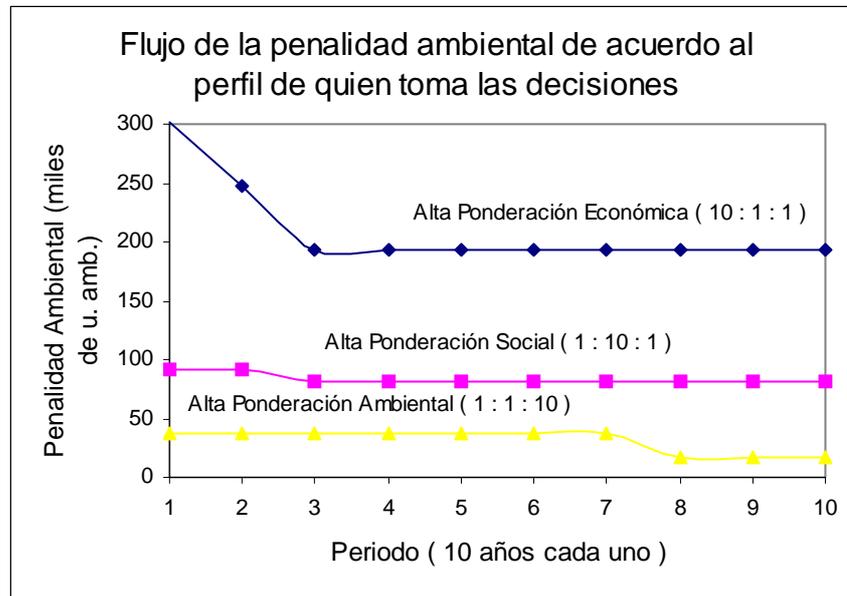


Figura 5. Flujo de penalidad ambiental de acuerdo al perfil de quien toma decisiones

Aquellos escenarios que ponderan fuertemente el objetivo económico, muestran altos porcentajes de logro pero con estrategias diferenciales (Caso 1: 87 % y Caso 2: 77%). Cuando se establece que el objetivo económico pondera en importancia diez veces más que el objetivo social y el ambiental (10:1:1), resulta que el modelo adopta realizar talarrasa a gran escala al inicio del horizonte de planificación, remplazándola gradualmente por talarrasa dispersa en pequeñas superficies y hacia el final del horizonte, por cortas de protección también en pequeñas superficies dispersas. Sin embargo, cuando el objetivo económico se pondera al doble (2:1:1), la estrategia cambia y se tiene que el modelo elige realizar mayoritariamente talarrasa y cortas de protección, ambas dispersas en pequeñas superficies a lo largo de todo el horizonte de planificación.

Cuando se establece que el objetivo social pondera diez veces más que el objetivo económico y el ambiental (1:10:1), resulta que el modelo cosecha a lo largo de todo el horizonte de planificación, basado fundamentalmente en aquellos tratamientos más intensivos en mano de obra, como son las cortas de protección en pequeñas superficies dispersas. Sin embargo, cuando el objetivo social se pondera al doble (1:2:1), la estrategia se modifica, aceptando también talarrasas dispersas en pequeñas superficies.

Cuando se establece que el objetivo ambiental pondera diez veces más que el objetivo económico y el social (1:1:10), se tiene que los niveles de cosecha bajan ostensiblemente en relación con los restantes seis escenarios, concentrándose fundamentalmente en cortas de protección en pequeñas superficies dispersas, que corresponde al tratamiento con menor penalidad ambiental. Sin embargo, cuando el objetivo ambiental se pondera al doble (1:1:2), la estrategia se modifica realizando cortas de protección y talarrasas, ambas dispersas en pequeñas superficies.

En contraste a las ponderaciones extremas, ponderaciones más moderadas tienden a acercar las curvas, haciendo más probable lograr compromisos entre las partes involucradas. La Figura 6 muestra los porcentajes de logro del objetivo económico, social y ambiental de acuerdo al perfil de quien toma las decisiones. Los escenarios se encuentran ordenados en orden decreciente del porcentaje de logro del objetivo económico.

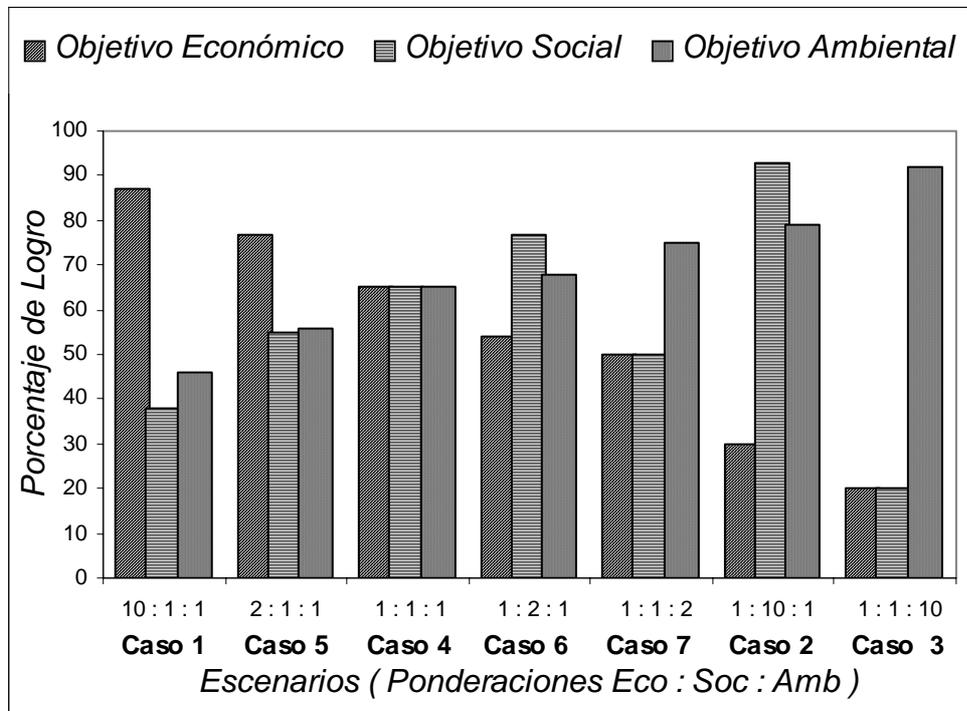


Figura 6. Porcentajes de logro para el objetivo económico, social y ambiental de acuerdo al perfil de quien toma decisiones

A nuestro modo de ver, las decisiones se deben realizar claramente mas allá de las posiciones extremas, porque ellas no conducen a la resolución de los conflictos de uso. Nosotros hemos definido arbitrariamente que las posiciones extremas son todas aquellas situaciones en que alguno de los objetivos se encuentra por debajo del 50 % de logro. De esta forma, encontramos que solo los escenarios 4,5,6 y 7 resultan aceptables, y ellos nos indican **DONDE SE DEBEN CENTRAR LAS NEGOCIACIONES**. Esto es, aceptar que las talarrasas y cortas de protección dispersas en pequeñas superficies son una posibilidad real de conciliación de objetivos, no así la talarrasa en grandes superficies. Por otro lado, que los porcentajes de logro de los objetivos económicos, sociales y ambientales para los casos no extremos (4,5,6 y 7) se mueven entre el 50 % y el 80 %, por lo cual debe ser posible llegar a conciliar los objetivos en una ronda de negociaciones con los distintos actores que intervienen en el conflicto de uso.

Como resultado de lo anterior, podemos establecer donde **NO SE DEBEN** centrar las negociaciones de nuestro caso de estudio. Las negociaciones no se deben centrar en que:

1. La talarrasa en grandes superficies es la única posibilidad de utilización del recurso desde el punto de vista económico (Caso 1)

2. Las Cortas de Protección dispersas en pequeñas superficies es la única posibilidad de utilización desde el punto de vista social (Caso 2)
3. La prohibición de corta sobre la mayor parte de la superficie es la única posibilidad de uso (no uso) desde el punto de vista ambiental (Caso 3).

CONCLUSION

En los próximos años se debieran desarrollar herramientas de planificación que permitieran analizar la influencia del perfil de quien toma decisiones, sobre el desempeño de indicadores económicos, sociales y ambientales. Dichas herramientas, podrían proveer las bases para orientar las negociaciones, al mostrar las variaciones en los niveles de logro cuando cambian las ponderaciones que se asignan a los objetivos. Además, permitirían centrar las negociaciones en aquellos aspectos que fuesen prioritarios, eliminando aquellos que no contribuyen a la solución del problema.

Probablemente uno de los mayores problemas en la modelación del sistema, la constituye la recopilación de información confiable y el desarrollo de un conjunto de índices apropiados para representar el valor social y ambiental. No obstante, a nuestro juicio, la gran fortaleza de los modelos de planificación bajo múltiples objetivos es que permiten la exploración del comportamiento del sistema, por sobre la obtención de valores de gran precisión. No obstante lo anterior, parece perfectamente factible la construcción de índices que reflejen atributos tales como la biodiversidad, la belleza escénica o la recreación, con el fin de ser incluidos en la modelación.

De la experiencia recopilada del caso de estudio, se desprende la conveniencia de utilizar restricciones de flujo no decreciente en valor económico, social y ambiental para representar la condición de sustentabilidad del recurso. Esto puede ser representado independiente de la estructura del modelo (tipo I, II o III), mediante restricciones que aseguren que el valor económico, social o ambiental en un periodo dado sea mayor o igual que el valor en el periodo precedente (Ver restricciones 4.2, 4.3 y 4.4 del modelo propuesto).

BIBLIOGRAFIA

BOWN, H. (1996). "Windthrow Economics at the forest level in the Canterbury Region". Master of Sciences Report. University of Canterbury. 111 p.

CURTIS, F.H. (1962). "Linear programming the management of a forest property". Journal of Forestry. September 1962. p 611-616.

DAELLENBACH, H; GEORGE, J; McNICKLE, D. (1983). "Introduction to Operations Research Techniques". ALLYN AND BACON, INC. Second Edition. USA. 695 p.

DAVIS, L.S. and JOHNSON, K.N. (1987). "Forest management". Third Edition. McGraw-Hill, New York, USA. 782 p.

DYKSTRA, D.P. (1984). "Mathematical programming for natural resource management". McGraw-Hill, New York, USA. 317 p.

GARCIA, O. (1984). "FOLPI, a forestry-oriented linear programming interpreter". Proceedings of the IUFRO Symposium on Forest Management Planning and Managerial Economics. University of Tokio, Japan. pp 293-305.

GARCIA, O. (1990). "Linear programming and related approaches in forest planning". New Zealand Journal of Forestry Science 20(3): 307-329.

JOHNSON, K.N. and SCHEURMAN, H.L. (1977). " Techniques for prescribing optimal timber harvest and investment under different objectives - Discussion and Synthesis". Monograph No 18. Forest Science 1977.

JOHNSON, S. (1989). "Modelling regional forest industry development in New Zealand". Thesis Ph.D. School of Forestry. University of Canterbury. 196 p.

LOUCKS, D. P. (1964). "The development of an optimal program for sustained-yield management. Journal of Forestry 62: 485-490.

MORALES, R and WEINTRAUB, A. (1991). " Model for strategic planning in the management of pine industrial plantations". In: Symposium on system analysis in forest resources, Charleston, S.C., U.S.A. March 3-7, 1991.

NAUTIYAL, J.C. and PEARSE, P. H. (1967). "Optimizing the conversion to sustained yield - A programming solution". Forest Science 13(2):131-139.

VILLANUEVA, T. (1992). "Integrated yield forecasting and harvest scheduling in a tropical pine plantation in Fiji". Thesis Ph. D. School of Forestry, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand. 191 p.

WEINTRAUB, A. and CHOLAKY, A. (1991). "A hierarchical approach to forest planning". Forest Science, 37 (2):439-460.