



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS
ESCUELA DE POSTGRADO
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS

**ANALISIS MULTICRITERIO EN PLANIFICACION FORESTAL Y
MEDIOAMBIENTAL**

MATIAS SILVA LOZANO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN EVALUADORA

Sr. Andrés Weintraub, Profesor Guía
Sr. Pablo Rey
Sra. Carmen Luz de la Maza
Sr. Carlos Romero

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER
EN GESTIÓN DE OPERACIONES

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

SANTIAGO DE CHILE

INDICE

1. INTRODUCCION.....	1
1.1. El sector forestal y el medioambiente	1
1.2. Objetivos	3
2. TRABAJOS ANTERIORES.....	4
3. METODOLOGIA EMPLEADA.....	7
4. PROBLEMA DE PLANIFICACION FORESTAL	10
5. SISTEMA OPTIMED	12
5.1. Descripción	12
5.2. Modelo matemático del sistema OPTIMED	13
5.3. Redefinición del esquema forestal	23
6. MODELO DE PROGRAMACIÓN POR METAS	24
6.1. Estructura de programación por metas.....	24
6.2. Definición de criterios medioambientales	25
6.2.1. Criterio de Erosión de Suelos.....	28
6.2.2. Criterio Contaminación de Recursos Hídricos	37
6.2.3. Criterio Exposición del Paisaje	42
6.3. Definición del criterio económico.....	46
6.4. Modelo matemático modificado.....	48
6.5. Cálculo de ponderaciones	56
6.5.1. Matrices de comparación por pares	56
6.5.2. Cálculo de inconsistencia de las comparaciones	62
6.5.3. Obtención de las ponderaciones	65
6.6. Normalización de variables de desviación	66
7. REQUERIMIENTOS DE INFORMACION.....	69
8. RESULTADOS Y ANALISIS	71
8.1. Definición de escenarios	71
8.2. Resultados obtenidos	73
8.2.1. Resultados económicos, de producción y cosecha.....	73
8.2.2. Resultados medioambientales	76
8.2.3. Comparación económica y medioambiental.....	82
8.2.4. Análisis de sensibilidad para los niveles de aspiración de las metas	88
9. CONCLUSIONES.....	97
10. BIBLIOGRAFIA.....	99
11. ANEXOS.....	103

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Matriz de Impactos Ambientales y Medidas de Mitigación.....	27
Tabla 2: Valores numéricos correspondientes a los atributos del sitio.	29
Tabla 3: Descripción de los niveles de fragilidad.....	30
Tabla 4: Descripción de los niveles considerados.....	31
Tabla 5: Máxima área a cosechar definida	33
Tabla 6: Fracciones de cosecha definidas.....	36
Tabla 7: Niveles de densidades.....	38
Tabla 8: Definición de riesgos para ríos.....	38
Tabla 9: Niveles de riesgo para ríos	38
Tabla 10: Definición de exposición para caminos	42
Tabla 11: Jerarquía de criterios, subcriterios y atributos	57
Tabla 12: Consistencia de las matrices de comparaciones.....	64
Tabla 13: Pesos agregados para cada comparación.	66
Tabla 14: Resumen de valores ideales y anti-ideales.	68
Tabla 15: Polígono – Rango de pendiente.....	69
Tabla 16: Nomenclatura definida para cada escenario.	71
Tabla 17: Resultados económicos en cada escenario (MUS\$).	73
Tabla 18: Volumen de productos ofertados por la empresa (1000 m3).	74
Tabla 19: Cantidad de hectáreas cosechadas por tipo de subsector y tipo de maquinaria.	75
Tabla 20: Valor porcentual del atributo para el subcriterio de EVITAR COSECHAS EN SUELOS MUY EROSIONABLES.....	76
Tabla 21: Valor porcentual del atributo para el subcriterio de FAVORECER LA COSECHA EN EPOCA DE MENOR PRECIPITACION.	77
Tabla 22: Valor porcentual del atributo para el subcriterio de FAVORECER EL USO DE TORRES POR SOBRE EL DE SKIDDERS EN SUELOS FRAGILES.	78
Tabla 23: Porcentaje de metros de río protegidos para el criterio de CONTAMINACION DE RECURSOS HIDRICOS.....	79
Tabla 24: Porcentaje de metros de camino protegidos para el criterio de Exposición del Paisaje	80
Tabla 25: Valores porcentuales de los atributos medioambientales y económico. 83	
Tabla 26: Escenario en el que se cumple o supera el nivel de aspiración para cada atributo.....	86
Tabla 27: Máxima cantidad de superficie (Ha) a ser cosechada para cada tipo de subsector considerado.	88
Tabla 28: Valores de atributos variando la protección asociada al subcriterio de EVITAR COSECHAS EN SUELOS MUY EROSIONABLES.....	89
Tabla 29: Resultados económicos (MUS\$). Subcriterio de EVITAR COSECHAS EN SUELOS MUY EROSIONABLES	90
Tabla 30: Volumen de productos ofertados (1000 m3). Subcriterio de EVITAR COSECHAS EN SUELOS MUY EROSIONABLES	91

Tabla 31: Máxima cantidad de superficie (Ha) a ser cosechada con maquinaria skidder.....	91
Tabla 32: Valores de atributos variando la protección asociada al subcriterio de FAVORECER EL USO DE TORRES POR SOBRE EL DE SKIDDERS EN SUELOS FRÁGILES.....	92
Tabla 33: Resultados económicos (MUS\$). Subcriterio de FAVORECER EL USO DE TORRES POR SOBRE EL DE SKIDDERS EN SUELOS FRAGILES.....	93
Tabla 34: Volumen de productos ofertados (1000 m3). Subcriterio de FAVORECER EL USO DE TORRES POR SOBRE EL DE SKIDDERS EN SUELOS FRAGILES.....	93
Tabla 35: Fracciones de cosecha invierno verano a utilizar en cada escenario	94
Tabla 36: Valores de atributos variando la protección asociada al subcriterio de FAVORECER LA COSECHA EN EPOCA DE MENOR PRECIPITACION.....	95
Tabla 37: Resultados económicos (MUS\$). Subcriterio de FAVORECER LA COSECHA EN EPOCA DE MENOR PRECIPITACION.....	95
Tabla 38: Volumen de productos ofertados (1000 m3). Subcriterio de FAVORECER LA COSECHA EN EPOCA DE MENOR PRECIPITACION.....	96

RESUMEN

El cuidado del medioambiente ha tomado una creciente importancia en el área forestal. Esto hace necesario que las empresas pertenecientes a este rubro consideren la adopción de políticas que contribuyan a la protección de éste, dando lugar a un manejo sustentable de los bosques. Sin embargo, las decisiones de cosecha en bosques y la protección del medioambiente son objetivos que se encuentran en conflicto. Enfocarse en solo uno de éstos podría ocasionar soluciones ineficientes para la empresa.

Este trabajo de tesis se enfoca en un problema de planificación forestal de mediano plazo que involucra la protección de los componentes medioambientales tales como el suelo, los recursos hídricos y el paisaje. Para enfrentar el problema, se desarrolla una herramienta matemática que considera la importancia, tanto de los resultados económicos de la empresa, como de las políticas necesarias para proteger cada componente medioambiental. Esta herramienta corresponde a un modelo de programación lineal entera mixta que utiliza el enfoque de Programación por Metas Lexicográfico.

La herramienta desarrollada en este trabajo permite elaborar alternativas de protección del medioambiente equilibrando la importancia de cada componente medioambiental considerado con el criterio económico de la empresa. A distintos niveles de importancia que la empresa le otorgue al medioambiente, la herramienta entrega alternativas de protección medioambiental conjuntamente con su efecto sobre el VPN.

1. INTRODUCCION

1.1. El sector forestal y el medioambiente

El sector forestal posee grandes logros en el ámbito económico y productivo, y está en condiciones de efectuar un aporte estructural al desarrollo nacional, sobre la base de la utilización de plantaciones forestales como principal recurso renovable.

Entre 1990 y 2004, el valor de las exportaciones de productos forestales chilenos se incrementó a una tasa promedio de 10,4% anual, llegando en el 2004 a un total de US\$ 3.397 millones. Respecto a la superficie, si bien ésta también aumentó en el periodo indicado, lo hizo a una tasa promedio bastante menor, de 2,8% anual, llegando cerca de 2,1 millones de hectáreas en el 2004. Este hecho implica que la expansión productiva del sector forestal tendrá un menor dinamismo a partir del año 2015, consecuencia de la menor disponibilidad de terrenos forestales económicamente rentables (Ministerio de Agricultura, 2005). El subsector productivo asociado a las plantaciones forestales genera actualmente un 3,5% del PIB y un 12,5% de las exportaciones nacionales (Ministerio de Agricultura, 2005). Esta información entrega una buena visión de la relevancia del sector forestal en Chile.

Dada la importancia del sector forestal, es necesario entregar esfuerzos que ayuden a lograr una mayor competitividad de Chile en el mundo. En esta dirección, la protección de los recursos naturales y el ambiente ha adquirido gran fuerza en el sector, donde las decisiones pueden tener gran repercusión. La importancia de los recursos naturales radica en los siguientes puntos principales:

- Cumplimiento con el requerimiento de los clientes: Al igual que los países importadores de madera, los clientes de las empresas forestales piden requisitos de protección del medioambiente a éstas mismas.

- Protección del medioambiente por parte del país productor: El país de donde se extrae la madera, está interesado en la protección del medioambiente, ya que el futuro de sus tierras se verá afectado por las decisiones que las empresas forestales tomen sobre éstas. Debido a esto, el país tomará medidas que contribuyan al cuidado del medioambiente influyendo directamente sobre las decisiones de las empresas forestales.
- Cuidar las fuentes de ingreso: Para las mismas empresas forestales, el cuidado del medioambiente es un factor importante ya que sus terrenos son la fuente de sus ingresos futuros. Sin el cuidado del medioambiente, tanto la erosión del suelo como la contaminación de otros componentes del ambiente desgastarán el rendimiento que éste puede brindar a las empresas.
- Presión de grupos ambientalistas: Los grupos ambientalistas adquieren cada vez mayor fuerza, por lo que resulta necesario para las empresas forestales caminar en el mismo sentido y dirección que estos grupos.

Distintos tipos de decisiones en los procesos que involucran la planificación forestal afectan directamente a los componentes del ambiente, como el suelo, los recursos hídricos, los componentes bióticos y el paisaje. Por ello, es necesario llevar a cabo prácticas forestales que conduzcan a una mayor sustentabilidad en el manejo forestal.

1.2. Objetivos

Objetivo general:

Analizar la relación existente, entre los beneficios económicos de la empresa y los factores medioambientales de erosión de suelos, contaminación de recursos hídricos y exposición del paisaje, a través del enfoque de programación por metas.

Objetivos específicos

- Definir formas de medición o atributos para cada criterio económico y ambiental considerado.
- Desarrollar el enfoque de programación por metas lexicográfico¹ a utilizar para la modelación del problema forestal.
- Obtener las preferencias de los tomadores de decisiones para cada uno de los atributos definidos.
- Realizar el cálculo de las ponderaciones que el enfoque de programación por metas requiere utilizando las preferencias de los tomadores de decisiones obtenidas anteriormente.
- Analizar los *trade-off* que se producen entre los valores de los atributos considerados en el problema de planificación forestal y medioambiental de mediano plazo.

¹ El enfoque de programación por metas lexicográfico es uno de los enfoques de la teoría de múltiples criterios. Este enfoque se detalla en el capítulo 6.

2. TRABAJOS ANTERIORES

En relación con el tema medioambiental, Ximena Silva (1998) desarrolló una tesis de planificación forestal a mediano plazo en la cual se definieron medidas de prevención para la protección medioambiental. En el mismo año, Rodrigo Andalaf (1998) evaluó el impacto de aplicar las medidas medioambientales definidas por Ximena Silva, para la planificación forestal ocupando sólo el 17% de la superficie disponible para la cosecha en la empresa forestal Millalemu. Por su parte, Felipe Caro (1999) expande el trabajo de tesis de Andalaf, desarrollando un modelo que considera restricciones medioambientales para el 100% de la superficie de cosecha, evaluando además en su modelo la inserción de restricciones espaciales.

La definición de medidas medioambientales en los estudios anteriormente citados ha sido de carácter preventivo, es decir, no consideraban el impacto medioambiental para la toma de decisiones. Ello se ha debido a la falta de estudios experimentales que permitan caracterizar los componentes del sistema en la zona en cuestión. En la actualidad, se están iniciando estudios para caracterizar con mayor precisión al medioambiente.

Las tesis de Silva, Andalaft y Caro se tradujeron en un estudio que, en conjunto con un grupo de investigadores, analiza el impacto que tienen las medidas medioambientales en los beneficios económicos de la empresa (Caro et al, 2003). Este estudio logró crear una herramienta que entrega el impacto económico que recibe la empresa forestal debido a la introducción de medidas preventivas para el cuidado de los recursos hídricos, el paisaje y la erosión del suelo. Una desventaja de esta herramienta es que, dependiendo de la definición de los atributos² medioambientales, podría no percibir de manera directa la relación entre los criterios medioambientales y el criterio económico, es decir, al imponer niveles de prevención para cada uno de los atributos asociados a los criterios ambientales a través de restricciones y maximizar respecto al atributo del criterio económico de la empresa, podría suceder que las restricciones pertenecientes a un atributo medioambiental no sean activas, en otras palabras, la prevención impuesta para uno de

² Se entiende atributo como una función que describe una acción determinada. Esto se explica con mayor detalle en el capítulo 3.

los atributos ambientales podría ser mayor sin perjudicar al atributo económico de la empresa y a los demás atributos ambientales. Además, esta herramienta no considera que los tomadores de decisiones poseen distintas preferencias por los distintos atributos medioambientales y económico, lo que podría hacer que los resultados que arroje esta herramienta no reflejen del todo las relaciones entre los atributos considerados.

Otros trabajos de planificación forestal que apuntan a la protección del medioambiente, principalmente en los temas de biodiversidad de hábitat, captura de Carbono y la vida salvaje en los bosques, utilizan modelos de programación matemática basados en la teoría de múltiples criterios, incorporando como criterios al medioambiente y factores económicos de la empresa forestal. Trabajos de los investigadores Carlos Romero, Luiz Díaz-Balteiro, Darek J. Nalle y Calkin D. E. se dirigen a la planificación forestal y medioambiental ocupando este tipo de teoría (Díaz-Balteiro L. et al, 2002 y 2004; Darek J. Nalle et al, 2004; Calkin D. E. et al, 2002).

La teoría de múltiples criterios permite obtener soluciones eficientes para los atributos ambientales y el atributo económico desde el punto de vista Pareto (Romero, 1996). Además, varios enfoques de la teoría de múltiples criterios toman en cuenta las preferencias del tomador de decisiones para cada uno de los atributos considerados en el problema (Romero, 1996).

Dentro de la teoría de múltiples criterios existen varios enfoques. Uno de los enfoques es el de multiobjetivos. Este enfoque busca optimizar varios objetivos a la vez. En la vida real, los objetivos suelen tener un cierto grado de conflicto, lo que hace que no exista un único óptimo si no que se habla de un conjunto de soluciones eficientes o Pareto óptimas. Además, es necesario mencionar que ninguna técnica del enfoque multiobjetivo toma en consideración las preferencias del tomador de decisiones sobre los distintos objetivos del problema (Romero, 1996). Esto podría traducirse en una desventaja para el análisis del problema. Otro de los enfoques de la teoría de múltiples criterios es el de programación por metas. Este enfoque se caracteriza por la búsqueda de soluciones satisfactorias. Al igual que el enfoque multiobjetivo, en programación por metas se trabaja con varios objetivos, pero la diferencia está en que el enfoque de programación por metas busca que esos objetivos lleguen a ciertos niveles predeterminados. Este enfoque toma en consideración las preferencias del tomador de decisiones por cada uno de los objetivos (o

atributos). El considerar las preferencias de los actores involucrados en el problema es bastante importante, pues permite entregar soluciones que satisfagan a todos los actores involucrados. Los investigadores Romero C., Linares P. y Gonzáles–Pachón J. han realizado avances en esta materia (Linares P. et al, 2002; Gonzáles–Pachón J. et al, [200-]). El último tipo de enfoque dentro de la teoría de múltiples criterios hace referencia a los métodos de múltiples criterios discretos. Estos métodos son convenientes cuando el conjunto de soluciones es discreto y su cardinalidad no es muy grande. Algunos de estos métodos son el ELECTRE y AHP (Romero, 2002a; Saaty, 1994).

En este proyecto se evaluará el impacto económico que recibe la empresa forestal al añadir medidas de protección medioambiental de carácter preventivo a través de la teoría de múltiples criterios. Los criterios medioambientales que se considerarán serán los de Erosión de Suelos, Contaminación de Recursos Hídricos y el de Exposición del Paisaje. Cada uno de estos criterios se explican en detalle más adelante.

3. METODOLOGIA EMPLEADA

a. Construcción del modelo:

El modelo de planificación forestal y medioambiental se construyó teniendo como base el sistema llamado OPTIMED (optimización a mediano plazo), el cual resuelve el problema de cosecha y construcción de caminos para empresas forestales chilenas en un horizonte de 3 a 5 años. El modelo de planificación forestal y medioambiental de este proyecto corresponde a un modelo de programación lineal entera mixta que utiliza la teoría de múltiples criterios.

b. Determinación del Enfoque de múltiples criterios utilizado:

Existen varios enfoques que se pueden utilizar para abordar problemas de múltiples criterios. Dentro de éstos se encuentran los enfoques de multiobjetivos, programación por metas y métodos discretos, los dos primeros factibles de ser utilizados en el proyecto ya que el tercero, métodos discretos, es un enfoque que permite reducir el tamaño del conjunto de soluciones eficientes, sin embargo, en este trabajo se necesita generar el conjunto de soluciones eficientes. El enfoque multiobjetivo tiene la particularidad de entregar resultados de la frontera eficiente desde el punto de vista Pareto, no obstante, para problemas de gran tamaño, se comporta de manera ineficiente en tiempo de procesamiento (Romero C., 1996), a la vez que no requiere de mucha información para poder implementarse. Por el contrario, el enfoque de programación por metas se comporta mejor que el enfoque de multiobjetivos en tiempo de resolución, cuando el problema es grande. Este último enfoque entrega soluciones satisfactorias, es decir, no necesariamente la solución obtenida a través de éste pertenece a la frontera eficiente de soluciones, pero existen procedimientos para restaurar la eficiencia (Tamiz et al, 1996; Romero, 1991). El enfoque de programación por metas ponderadas requiere de información sobre niveles de aspiración³ además de la información de las preferencias del tomador de decisiones por cada atributo, lo que puede traducirse en una desventaja desde el punto de vista de la precisión de la información requerida. Sin embargo, el

³ El nivel de aspiración es un parámetro que, para este problema, refleja el nivel de prevención para una medida de prevención en particular. Este concepto será descrito con mayor detalle en el capítulo 6.

requerimiento de información también puede transformarse en una ventaja ya que se tiene mayor información de las preferencias por parte del tomador de decisiones. Tomando en consideración el análisis descrito se definió utilizar el enfoque de programación por metas lexicográfico (Romero, 1991, 1996 y 2000a) el cual se explica con detalle en el capítulo 6.1. El enfoque de programación por metas lexicográfico permite restaurar la eficiencia de las soluciones.

c. Definición de criterios medioambientales:

Para el proyecto se definió trabajar con los criterios medioambientales de Erosión de Suelos, Contaminación de Recursos Hídricos y Exposición del Paisaje. Para cada uno de los criterios se construyeron atributos que reflejan el nivel de prevención asociado. Para la construcción de los atributos se requirió definir los elementos ambientales que forman parte de la estructura de éstos y recopilar la información necesaria para ello.

d. Implementación del modelo:

Parte de la información relevante que el modelo utiliza es entregada por el tomador de decisiones. Respecto a esto, se obtuvo las preferencias del tomador de decisiones para cada uno de los atributos definidos. Para la obtención de preferencias se utilizó el método de comparación por pares desarrollado por T. L. Saaty explicado por Carlos Romero (Romero, 1996). Este método permite no tan solo extraer preferencias del tomador de decisiones, si no que también permite obtener qué tanto se prefiere una alternativa respecto de otra. Además, se utilizó la metodología del auto-valor máximo para detectar inconsistencias en las preferencias del tomador de decisiones (Saaty, 1994). Por último, se trabajó con la metodología del auto-vector para obtener las ponderaciones asociadas a cada atributo que son usadas por el enfoque de programación por metas. Esta metodología permite capturar el orden del ranking entre atributos inherente en una comparación por pares que posee cierto grado de inconsistencia provocada por el tomador de decisiones (Saaty T. L., 1997).

El modelo se programó a través del lenguaje GAMS el cual es un sistema de modelación para programación matemática. Los datos con los cuales se trabajó en este proyecto son de la empresa forestal Millalemu. Entre esos datos se encuentran costos asociados a la planificación forestal, demandas, precios e información de 29 predios de plantaciones de la empresa disponibles para la cosecha.

e. Definición de escenarios:

Se definieron los escenarios a optimizar para evaluar los *trade-off* existentes entre los atributos medioambientales considerados y el atributo económico de la empresa.

4. PROBLEMA DE PLANIFICACION FORESTAL

El problema de planificación forestal que se describe en este proyecto trabaja con información de la Empresa forestal Millalemu. Las decisiones involucradas en el problema son a nivel táctico. El horizonte de planificación de estos problemas es de 3 a 5 años considerando como periodo un semestre. Dentro de la elección de periodos se diferencian los periodos o temporadas de Invierno y de Verano. Por otra parte, en la industria forestal se ofrecen varios productos finales, sin embargo en planificación forestal a mediano plazo se agrupan estos productos en 3 productos principales, madera exportable, madera aserrable y madera pulpable. La calidad y el precio que poseen estos productos van en el mismo orden. También se debe tomar en cuenta la degradación de los productos, es decir, productos de mejor calidad se pueden vender como productos de menor calidad.

Las decisiones que involucran el planteamiento del problema de planificación forestal de mediano plazo son principalmente:

- Construcción de caminos de tierra o de ripio: En el mediano plazo es relevante la decisión de la construcción de caminos debido a que da más posibilidades de flujo de producto a menor costo.
- Reconstrucción de caminos de tierra a caminos de ripio: Normalmente los caminos de tierra poseen una menor disponibilidad que los de ripio. Esto sucede por efectos de la erosión en los caminos de tierra en temporada de lluvia. Por ende, la empresa no ocupa los caminos de tierra en invierno.
- Flujo de madera por los distintos caminos: Se debe trasladar distintos tipos de productos por los caminos existentes para que lleguen a los puntos de demanda.
- Cantidad de cosecha en distintos rodales: Los llamados rodales son la unidad de cosecha, ya que posee características homogéneas como la edad de los árboles, la textura del terreno, y otras. De cada rodal se debe decidir cuánta madera cosechar. Además, para cada tipo de producto en cada rodal se tiene distinto tipo de rendimiento por hectárea cosechada.

- El tipo de maquinaria con el cual se cosecha: En un modelo de mediano plazo se trabaja con dos tipos de maquinarias para madereo, Skidder y Torre. El Skidder es un tractor especializado con el cual se cosecha y se arrastra el tronco, en cambio la torre es un sistema de traslado del tronco por aire a través de cables. Normalmente el Skidder se utiliza en terrenos con menos de un 30% de pendiente, ya que en terrenos de mayor pendiente existe el peligro de volcamiento del mismo.

Existe también la posibilidad de inventariar madera en canchas de acopio los cuales son espacios hechos para guardar la madera de una temporada a otra. Principalmente estas canchas de acopio son utilizadas debido a que en invierno no se puede extraer la cantidad de madera suficiente para abastecer la demanda en la misma temporada. Esto ocurre ya que los caminos de tierra no pueden ser utilizados en temporada de invierno, lo que hace que no exista una accesibilidad completa a los rodales. En este problema se trabaja con dos canchas de acopio.

5. SISTEMA OPTIMED

5.1. Descripción

En el pasado, la planificación de la cosecha forestal a mediano plazo y la planificación de la construcción de caminos se hacían en forma separada. Una primera aproximación al estudio de estos dos problemas en forma conjunta lo hicieron Navon y Weintraub (Weintraub et al, 1976) en una publicación en la cual modelaron el problema y lo trabajaron para una instancia simplificada. Este estudio fue hecho para explotar bosques nativos en donde no existen caminos, en los cuales un gran porcentaje de los costos viene dado por la construcción de éstos.

Más tarde se construye el sistema OPTIMED que resuelve el problema de cosecha y de construcción de caminos en un horizonte de 3 a 5 años. El software, en su versión 2.0, utiliza un modelo de programación lineal entero mixto que resuelve como programación lineal continua y que, mediante un procedimiento heurístico iterativo, logra una solución entera (Weintraub et al, 1994). Este sistema no considera medidas medioambientales.

A continuación se presenta la formulación matemática utilizada por OPTIMED.

5.2. Modelo matemático del sistema OPTIMED

Índices:

t = periodo (temporada en un año dado), desde 1 hasta T .

i, j = nodos en la red de transporte excepto los destinos finales. Estos nodos pueden ser orígenes de cosecha o intersecciones en la red de caminos.

$[i]$ = conjunto de rodales asociados al origen de cosecha i .

k = tipo de producto.

s = un rodal.

r = tipo de camino.

l = tipo de maquinaria (skidder o torre)

m = un destino final para la madera.

$P(m)$ = conjunto de nodos precediendo al nodo m .

E = tipo de madera para exportación.

A = tipo de madera aserrable.

P = tipo de madera pulpable.

c = una cancha de acopio.

(ij) = un camino.

$\mathcal{Y}(t)$ = conjunto de periodos de verano anteriores o iguales a t .

VARIABLES DE DECISIÓN:

$X_{s,t}^l$ = Número de hectáreas del rodal s cosechado en el periodo t con maquinaria l .

$Y_{i,t}^k$ = Volumen (m^3) de madera de tipo k cosechadas en el origen i durante el periodo t .

$F_{ij,r}^{k,t}$ = Flujo (m^3) de madera tipo k transportado por el arco (ij) de tipo r en el periodo t .

$FF_{i,m}^{k,t}$ = Flujo (m^3) de madera tipo k transportado por el arco (im) , donde m es un destino final, en un periodo t . El camino (im) no está asociado a algún tipo debido a que es un camino público.

$Z_{k,m}^t$ = Cantidad (m^3) de madera tipo k entregada al destino m en el periodo t .

$I_c^{t,k}$ = Cantidad (m^3) de madera tipo k almacenada en la cancha de acopio desde el periodo t (verano) al periodo $t+1$ (invierno).

$W_{ij,r}^t$ = Toma el valor 1 si el camino (ij) es construido de tipo r en el periodo t (puede ser usado en el mismo periodo), sino, toma valor 0.

V_{ij}^t = Toma el valor 1 si el camino (ij) es actualizado desde un camino de tierra a un camino de ripio en el periodo t (la actualización es válida en el mismo periodo, pero el camino no puede ser actualizado en el mismo periodo que es construido), sino, toma valor 0.

$E_{s,t}$ = Toma valor 1 si el rodal s es cosechado en el periodo t , sino, toma valor 0.

La construcción y la actualización de caminos solo pueden llevarse a cabo en temporada de verano.

Parámetros:

$a_{s,t}^k$: Cantidad de madera (m^3) de tipo k producidos por hectárea en el rodal s si se cosecha en el periodo t .

A_s : Máxima área (hectáreas) del rodal s que puede ser cosechada.

$U_{ij,r}^t$: Capacidad (m^3) para el flujo en el arco (ij) de tipo r en el periodo t .

$\overline{U}_{ij,r}^t$: Capacidad (m^3) para el flujo en el camino preexistente (ij) de tipo r en el periodo t .

$Z_{k,m,t}^{\max}$: Cota superior de demanda (m^3) de producto k en el destino m para el periodo t .

$Z_{k,m,t}^{\min}$: Cota inferior de demanda (m^3) de producto k en el destino m para el periodo t .

$R_{k,m}^t$: Precio de venta ($\$/m^3$) para 1 m^3 de producto k en el destino m para el periodo t .

$P_{s,t}^l$: Costo ($\$/Ha$) por cosechar una hectárea del rodal s en el periodo t con maquinaria l .

$d_{ij,r}^{k,t}$: Costo ($\$/m^3$) de transportar 1 m^3 de producto k por el arco (ij) de tipo r en el periodo t . Este costo incluye el mantenimiento.

$d_{i,m}^{k,t}$: Costo ($\$/m^3$) de transportar 1 m^3 de madera desde el nodo i al nodo de demanda m en el periodo t .

$h_{ij,r}^t$: Costo (\$) de construir un camino (ij) de tipo r en el periodo t.

\overline{h}_{ij}^t : Costo (\$) de actualizar el camino (ij) desde un camino de tierra a un camino de ripio en el periodo t.

$S_c^{t,k}$: Costo (\$/m³) de inventariar 1 m³ de producto tipo k en la cancha de acopio c desde el periodo t (verano) al periodo t+1 (invierno).

Cap_c : Capacidad m³ de la cancha de acopio c.

$g_{c,k}^t$: Costo (\$/m³) de inventariar 1 m³ de producto k en la cancha de acopio c en el periodo t.

$q_{i,t}^k$: Costo (\$/m³) de producir 1 m³ de producto k en el origen i para el periodo t.

Restricciones:

1. Producción en el origen.

$$\sum_{s \in [i]} \left(a_{s,t}^k \cdot \sum_l X_{s,t}^l \right) \geq Y_{i,t}^k \quad \forall i(\text{origen}), k, t.$$

La cantidad de madera tipo “k” que llega al nodo i en el periodo “t” debe ser menor o igual a la cantidad de madera cosechada en los rodales pertenecientes a [i] (conjunto de rodales asociados al nodo “i”).

2. Cantidad de cosecha por área.

$$\sum_{t,l} X_{s,t}^l \leq A_s \quad \forall s$$

La cantidad total de hectáreas a cosechar en el rodal “s” durante el horizonte de tiempo debe ser menor o igual a la cantidad de hectáreas disponibles en el rodal “s”.

3. Conservación de flujo.

a. Para nodos origen.

$$Y_{i,t}^k + \sum_{r,p} F_{pi,r}^{k,t} - \sum_{r,j} F_{ij,r}^{k,t} = 0 \quad \forall i(\text{origen}), k, t$$

Para cada nodo de producción, para cada producto “k” y en cada periodo “t”, la producción de madera que llega más la cantidad madera producida en el nodo debe ser igual a la cantidad de madera que sale.

b. Para nodos intersección.

$$\sum_{r,j} F_{ji,r}^{k,t} - \sum_{r,p} F_{ip,r}^{k,t} = 0 \quad \forall i(\text{int ersección}), k, t$$

Para cada nodo intersección, para cada producto “k” y periodo “t”, la cantidad de madera que entra al nodo de be ser igual a la cantidad de madera que sale

c. Para nodos conectados a destinos o canchas de acopio

$$Y_{i,t}^k + \sum_{r,j} F_{ji,r}^{k,t} - \sum_m FF_{im}^{k,t} - \sum_{r,c} F_{ic,r}^{k,t} = 0 \quad \forall i(\text{salidas}), k, t$$

d. Para nodos destino.

i. Para madera exportable

$$Z_{E,m}^t \leq \sum_{j \in P(m)} FF_{jm}^{E,t} \quad \forall m, t$$

La cantidad de madera exportable que llega desde los nodos al centro de demanda “m” debe ser mayor o igual que la cantidad de madera exportable que se vende.

ii. Para madera aserrable.

$$Z_{E,m}^t + Z_{A,m}^t \leq \sum_{j \in P(m)} FF_{jm}^{E,t} + \sum_{j \in P(m)} FF_{jm}^{A,t} \quad \forall m, t$$

Dado que la madera exportable (E) se puede vender como madera aserrable (A) se tiene que, la suma de madera exportable y aserrable que se vende en “m” debe ser menor que la cantidad que llega desde los nodos al centro de demanda “m”.

iii. Para madera pulpable.

$$Z_{E,m}^t + Z_{A,m}^t + Z_{P,m}^t \leq \sum_{j \in P(m)} FF_{jm}^{E,t} + \sum_{j \in P(m)} FF_{jm}^{A,t} + \sum_{j \in P(m)} FF_{jm}^{P,t} \quad \forall m, t$$

Dado que la madera exportable (E) y aserrable (A) se puede vender como madera pulpable (P) se tiene que, la suma sobre todos los tipos de madera que se venden en “m” debe ser menor que la cantidad que llega desde los nodos al centro de demanda “m”.

e. Para nodos de canchas de acopio.

i. Llegadas a la cancha de acopio.

$$\sum_{r,i} F_{i,c,r}^{k,t} = I_c^{k,t} \quad \forall k, c, t (t = \text{verano})$$

La cantidad de madera tipo “k” que llega a un centro de acopio en el periodo “t” debe ser igual al inventario para ese periodo.

ii. Salida de la cancha de acopio.

$$\sum_m FF_{cm}^{k,t} = I_c^{k,t-1} \quad \forall k, c, t (t = \text{invierno})$$

La cantidad de madera tipo “k” que sale de un centro de acopio en invierno en el periodo “t” debe ser igual a la cantidad de madera tipo “k” que entró en el periodo de verano.

iii. Capacidad de la cancha de acopio.

$$\sum_k I_c^{k,t} \leq Cap_c \quad \forall c, t (t = \text{verano})$$

La suma de todos los productos en inventario no debe exceder la capacidad de ésta.

4. Cotas por producto.

$$Z_{k,m,t}^{\min} \leq Z_{k,m}^t \leq Z_{k,m,t}^{\max} \quad \forall k, m, t$$

5. Construcción de caminos.

$$a. \sum_k F_{ij,r}^{k,t} \leq U_{ij,r}^t \cdot \sum_{q \in Y(t)} W_{ij,r}^q \quad \forall ij, t, r$$

(ij) camino potencial y t = verano.

No puede existir flujo en un camino a menos que este haya existido antes.

$$b. \sum_{r, q \in Y(t)} W_{ij,r}^q \leq 1 \quad \forall ij, t = T$$

(ij) camino potencial

Un camino no puede ser construido más de una vez en el horizonte de planificación.

6. Reconstrucción de caminos.

a. Para camino potencial (ij)

$$i. \sum_k F_{ij,r2}^{k,t} \leq U_{ij,r2}^t \cdot \left(\sum_{q \in Y(t)} W_{ij,r2}^q + \sum_{q \in Y(t)} V_{ij}^q \right) \quad \forall ij, t, (r2 = \text{ripio})$$

No puede existir flujo en un camino de ripio (r2) en el periodo "t" a menos que éste se haya construido o reconstruido de tierra a ripio en un periodo anterior.

$$ii. V_{ij}^t \leq \sum_{q \in Y(t)} W_{ij,r1}^q \quad \forall t = \text{verano}, (r1 = \text{tierra})$$

No se puede reconstruir un camino potencial a uno de ripio en un periodo "t" a menos que éste se haya construido de tierra en un periodo anterior. Esta restricción también condiciona a que solo se pueda reconstruir un camino a ripio a lo más una vez en el periodo de planificación.

b. Para un camino de tierra existente.

$$i. \sum_k F_{ij,r2}^{k,t} \leq U_{ij,r2}^t \cdot \sum_{q \in Y(t)} V_{ij}^q \quad \forall ij, t, (r2 = \text{ripio})$$

Solo puede haber flujo de madera por un camino de ripio (r2) en el periodo “t”, solo si el camino de tierra existente anteriormente fue reconstruido de ripio antes o durante el periodo “t”

$$ii. \sum_{q \in Y(t)} V_{ij}^q \leq 1 \quad \forall ij, t = T$$

Un camino de tierra existente puede ser construido de ripio solo una vez, en el horizonte de planificación.

7. Capacidad de las rutas preexistentes.

$$\sum_k F_{ij,r1}^{k,t} + \sum_k F_{ji,r1}^{k,t} \leq \overline{U_{ij,r1}^t} \quad \forall ij(\text{tierra}), t = \text{verano}$$

$$\sum_k F_{ij,r2}^{k,t} + \sum_k F_{ji,r2}^{k,t} \leq \overline{U_{ij,r2}^t} \quad \forall ij(\text{tierra}), t$$

8. Mínima área de cosecha.

a. Para rodales con superficie mayor que 10 [Ha]

$$\sum_l X_{s,t}^l \leq E_{s,t} \cdot \sum_l A_{s,l} \quad \forall s, t$$

No se puede cosechar madera del rodal “s” si no se ha entrado a éste.

$$10 \cdot E_{s,t} \leq \sum_l X_{s,t}^l \quad \forall s, t$$

Para los rodales que tienen una superficie mayor que 10 [Ha] se tiene que, la cantidad mínima de cosecha son 10 [Ha] para todo periodo y rodal.

- b. Para rodales con una superficie menor que 10 [Ha].

$$E_{s,t} \cdot \sum_l A_{s,l} = \sum_l X_{s,t}^l \quad \forall s,t$$

La cantidad de hectáreas a cosechar en un rodal “s” debe ser igual al total de hectáreas que posea el rodal, para todo rodal con menos de 10 [Ha].

9. Naturaleza de las variables.

$$X_{s,t}^l, Y_{i,t}^k, F_{ij,r}^{k,t}, Z_{k,m}^t, I_c^{k,t} \geq 0$$

$$W_{ij,r}^t, V_{ij}^t, E_{s,t} \in \{0,1\}, \quad \forall s,t,i,k,m,c,r.$$

Función Objetivo

1. Ingreso por ventas.

$$\sum_{k,m,t} R_{k,m}^t \cdot Z_{k,m}^t$$

2. Costo de explotación de rodales.

$$\sum_{s,t,l} P_{s,t}^l \cdot X_{s,t}^l$$

3. Costo por producir madera en el origen i.

$$\sum_{i,k,t} q_{i,t}^k \cdot Y_{i,t}^k$$

4. Costo por transporte.

$$\sum_{ij,r,k,t} d_{ij,r}^{k,t} \cdot F_{ij,r}^{k,t} + \sum_{i,m,k,t} d_{i,m}^{k,t} \cdot FF_{i,m}^{k,t}$$

5. Costo de construcción de caminos.

$$\sum_{ij,r,t} h_{ij,r}^t \cdot W_{ij,r}^t$$

6. Costo de reconstrucción de caminos.

$$\sum_{ij,t} \bar{h}_{ij}^t \cdot V_{ij}^t$$

7. Costo de almacenaje en las canchas de acopio.

$$\sum_{c,k,t} g_{c,k}^t \cdot I_c^{k,t}$$

Además existen otra serie de restricciones que corresponden en particular a políticas operacionales de la empresa forestal. Estas restricciones casuísticas consideradas en el modelo son:

1. Sobre caminos:

- Sólo se pueden construir caminos en la temporada de verano.
- No se pueden construir caminos en pavimento.
- La reconstrucción de caminos de tierra a ripio sólo se puede llevar a cabo durante los periodos de verano.
- No se puede reconstruir un camino a pavimento.

2. Sobre transporte:

- No se puede transportar sobre caminos de tierra en invierno.
- No se puede transportar en verano sobre caminos arenosos

3. Sobre canchas:

- Todo lo que ingresa a la cancha de acopio lo hace durante el periodo de verano.

- Todo lo que ingresa a una cancha en un periodo de verano debe salir de la cancha en el siguiente periodo de invierno o anual.
4. Sobre periodos anuales (agregación de varios periodos semestrales):
- Durante los periodos anuales no es posible construir caminos de tierra. Se emplea una carpeta de construcción ficticia que corresponde a una situación intermedia entre tierra y ripio. Esto permite reflejar la posibilidad de reconstrucción a ripio durante el periodo. La construcción en ripio está permitida.

Por último, se debe agregar que existen restricciones de fortalecimiento que se explican con detalle en una publicación realizada por Andrés Weintraub junto con otros investigadores (Weintraub et al, 2002).

5.3. Redefinición del esquema forestal

En un terreno forestal las unidades más grandes son los predios, los cuales están subdivididos en rodales. Un rodal es una unidad de tierra con características homogéneas, es decir, con el mismo tipo de suelo, edad de los árboles, y otros. Esta definición de rodal es la que se utiliza en el área forestal, y en particular, el modelo OPTIMED, utiliza la definición de rodal como la unidad básica de un sector forestal. Además, en el modelo OPTIMED se trabaja con nodos orígenes. Un nodo origen tiene asociado uno o más rodales y se asume que un rodal tiene asociado sólo un nodo origen. Además, el nodo origen es el punto geográfico en el cual se carga la madera en los camiones para entrar a la red de transporte. El problema que existe es que hay rodales que pueden descargar madera en más de un nodo origen, lo que hace más compleja la modelación. Por este motivo, se decidió adoptar la metodología usada por Felipe Caro (Caro F., 1999) en su tesis, en la que trabaja con información geográfica y forestal que está disponible en el sistema computacional SIG de la empresa. Este sistema trabaja con la unidad polígono, la cual es una unidad de superficie más fina que el rodal. Felipe Caro, en su tesis, plantea la agregación de polígonos en nodos origen lo que permite solucionar el problema descrito, ya que no se trabaja con rodales de forma directa en el modelo.

En el caso de la empresa Forestal Millalemu, el tamaño de los polígonos varía entre 0,1 y 30 Ha, con un tamaño promedio de 3,9 Ha. El problema táctico puntual tiene en total 1.120 polígonos que forman 196 nodos origen y que, agrupados de otra forma, constituirían 250 rodales.

Los requerimientos de información para trabajar con el nodo origen serán detallados en el capítulo 7. De ahora en adelante se hablará de nodo origen.

6. MODELO DE PROGRAMACIÓN POR METAS

6.1. Estructura de programación por metas

El enfoque de programación por metas lexicográfico posee una estructura en particular. Para poder explicar esa estructura se definen los siguientes términos:

- Atributo: Valores con los que el tomador de decisiones se enfrenta a un determinado problema decisional.
- Nivel de aspiración: Es el nivel al que un atributo determinado aspira llegar.
- Función de logro: Es un vector ordenado cuya dimensión coincide con el número de niveles de prioridad que se hayan establecido.
- Variable de desviación negativa: Cuantifica la falta de logro de una meta con respecto a su nivel de aspiración.
- Variable de desviación positiva: cuantifica el exceso de logro de una meta con respecto a su nivel de aspiración.

La estructura algebraica de un modelo de programación por metas lexicográfico es la siguiente:

$$\text{Lex min } a = [a_1, a_2, \dots, a_q] \quad (1)$$

Sujeto a:

$$i = 1, \dots, m$$

$$j = 1, \dots, q$$

$$f_i(X) + n_i - p_i = t \quad (2)$$

$$X \in F$$

$$X \geq 0, n \geq 0, p \geq 0$$

$$a_j = h_j(n, p)$$

Donde (1) es la función de logro, (2) es la meta i -ésima, n_i y p_i son variables de desviación negativa y positiva respectivamente, a_j es una función que tiene prioridad " j " y que depende de las variables de desviación, y por último, f es la función que define al atributo " i ".

Cada componente de " a " tiene la siguiente estructura:

$$a_j = \sum_i (\alpha_{i,j} n_i + \beta_{i,j} p_i)$$

Donde $\alpha_{i,j}$ y $\beta_{i,j}$ representan los pesos o factores de ponderación del nivel de prioridad j -ésima asociados a las variables de desviación negativa y positiva para la meta i -ésima.

La minimización lexicográfica del vector " a " implica la minimización ordenada de sus componentes, es decir, se minimiza la primera componente a_1 de la función de logro, seguidamente se minimiza la segunda componente a_2 respetando el valor de a_1 obtenido anteriormente, y así sucesivamente.

Más adelante, en el capítulo 6.4, se explica cuantos componentes poseerá la función de logro. Lo que se quiere lograr al trabajar con varias componentes es, en parte, restaurar la eficiencia de la solución obtenida.

6.2. Definición de criterios medioambientales

Las acciones realizadas por la empresa en el terreno forestal pueden producir impactos en el medioambiente. Ahora se identificarán las acciones que generan impactos negativos en el ambiente y que son factibles de incorporar en el modelo. Para esto se muestra a continuación una matriz de impactos ambientales y medidas de mitigación para algunas actividades relacionadas con la cosecha forestal:

Actividad Forestal	Impactos Potenciales	Medidas de Mitigación y Prevención
Construcción de caminos de acceso		Localizar caminos de preferencia en la cima de cerros o siguiendo las curvas de nivel, diseñando el trazado de modo de evitar áreas con suelos inestables y terrenos húmedos.
	Erosión del suelo	Efectuar movimientos de tierra en verano.
		Limitar la pendiente de caminos ripiados a un máximo de 9%.
		Planificar la ubicación de rutas de extracción que minimicen la distancia de arrastre de las trozas.
		Evitar explotaciones en suelos muy erosionables o utilizar métodos que dejen una cobertura residual amplia del bosque.
		Asegurar buen drenaje del agua, sobre todo cuando el desagüe natural es perpendicular a la dirección del camino (Construir cunetas).
		No cortar la vegetación en fajas a orilla de caminos.
	Inestabilidad de laderas	Estabilizar los cortes en terreno (Perfilar a 30° y cuando corresponda realizar siembras).
		Sedimentación de cursos de agua
	Evitar el cruce de cursos de agua sin construir puentes.	
	Contaminación del aire	Controlar la emisión de polvo mediante la aplicación de agua o productos químicos (Cloruro de calcio).
Cosecha (Volteo / trozado)	Erosión y compactación del suelo	Minimizar los caminos o sendas de maderero.
		Utilizar maquinaria terrestre que minimice la compactación.
		Evitar el uso de skidder en forma paralela a la pendiente.
		Para extraer trozas, preferir los sistemas de torres, skylines o cables.
		Escarificar y construir "trampas de sedimentos" en las sendas de maderero.
		Reforestar en la próxima estación de lluvias luego de la cosecha.
		Favorecer la cosecha en época de menor precipitación.
		Reducir el tamaño de las áreas sometidas a tala rasa (no > de 30 Ha.).
	Maximizar el uso de desperdicios en vez de botarlos al suelo.	
	Contaminación y sedimentación de las aguas	Dejar fajas de vegetación a lo largo de cursos de agua.
		Evitar que la maquinaria cruce los cursos de aguas (sin puentes). No verter residuos sólidos o líquidos en los cursos de agua.
	Pérdida de nutrientes	Astillar los residuos generados y distribuirlos en el terreno en el sentido de las curvas de nivel.
	Contaminación del aire	No realizar quemas en períodos secos y, mejor aún, evitarlas o reducir su intensidad para eliminar residuos de la cosecha.
		Evitar la quema de desperdicios que generen humo, gases o materia particulado nocivo.

	Paisaje	Conservar fajas de vegetación nativa y/o plantaciones en las áreas adyacentes a caminos públicos.
Acanche (Arrastre / Acopio)	Compactación del suelo	Evitar arrastre de trozas perpendicular a la pendiente. Preferir el arrastre ladera arriba.
		Arrastrar las trozas con el extremo anterior elevado.
		Reducir el tamaño de los patios de acopio (Usar varios pequeños en vez de pocos grandes).
	Asurcados y encharcamiento del suelo.	Acanchar en planos con buen drenaje y usar distancia máxima de madereo a 500 m; planificar también a 400 y a 300 m.
	Contaminación del suelo y aire	Mantener un sistema adecuado de prevención y control de incendios.
Cargar / Transportar	Contaminación del aire (producción de polvo)	Evitar caminos de tierra en caminos abiertos.
		Limitar las operaciones cuando haya problemas de polvo y fuego.
		Planificar las rutas de transporte evitando centros poblados.
	Degradación de caminos públicos	Restringir el tamaño de la carga.
Gravar con impuestos cargas mayores.		

Tabla 1: Matriz de Impactos Ambientales y Medidas de Mitigación.

Fuente: De la Maza, 1997.

En el problema forestal en cuestión se desea enfocar la prevención medioambiental tomando en cuenta tres criterios medioambientales. Estos son: el criterio de Erosión de Suelos, criterio de Contaminación de Recursos Hídricos y, criterio de Exposición del Paisaje. Se entiende por Exposición del Paisaje, el costo social de ver paisaje cosechado para personas que transitan por caminos públicos aledaños a terrenos forestales.

Para cada uno de los criterios mencionados se decidió escoger las medidas de prevención que son factibles de ser implementadas en el modelo. Estas son:

- Criterio de Erosión de Suelos:
 - Evitar cosechas en suelos muy erosionables.
 - Favorecer la cosecha en época de menor precipitación.
 - Favorecer el uso de torres por sobre el de skidders en suelos frágiles.
- Criterio de Contaminación de Recursos Hídricos:
 - Dejar fajas de vegetación alrededor de cursos de agua.
- Criterio de Exposición del Paisaje:
 - No cortar vegetación en fajas a orillas de caminos públicos.

Ximena Silva y Rodrigo Andalaft, en sus respectivas tesis, discutieron la forma de implementar estas medidas. Sin embargo, dado a que se trabajará con un enfoque de programación por metas, la forma de implementación de las medidas fue modificada en cuanto a la creación de variables y parámetros nuevos en el modelo matemático.

6.2.1. Criterio de Erosión de Suelos

Para poder trabajar con erosión de suelos hay que idear la forma de describir qué tan propenso se encuentra el terreno a ser erosionado. Ximena Silva y Rodrigo Andalaft proponen trabajar con un índice agregado llamado índice de fragilidad del terreno el cual entrega, como su nombre lo dice, cuán frágil es el terreno en el contexto de la erosión.

La construcción de este índice de fragilidad se basa en una metodología propuesta por Gayoso (Gayoso J., 1997). Este autor postula que la susceptibilidad de los suelos a la degradación es una propiedad determinada por el carácter físico, climático y biológico del sitio, que varía con la naturaleza del proceso potencial de degradación y de la tecnología de cosecha a emplear.

El modelo calcula cuatro índices de riesgo de degradación: riesgo de deslizamiento, de erosión, de compactación y de remoción; basados en seis atributos del suelo: profundidad del perfil, nivel de precipitaciones, drenaje interno, textura, densidad, y pendiente de deslizamiento y erosión. A cada atributo se le asocia un valor numérico según su intensidad (ver Tabla 2). Finalmente, el modelo genera un índice agregado de fragilidad en función de cuatro índices de riesgo (Ec.5).

Los atributos del suelo se identifican con la siguiente nomenclatura:

d = valor numérico o nota asociada a la densidad del suelo.

h = valor numérico o nota asociada al drenaje interno del suelo.

p = valor numérico o nota asociada a la profundidad del perfil del suelo.

s = valor numérico o nota asociada a la pendiente del suelo.

t = valor numérico o nota asociada a la textura del suelo.

r = valor numérico o nota asociada a las precipitaciones del suelo.

Los cuatro índices de riesgo de degradación se calculan de a partir de las ecuaciones 1,2,3 y 4:

$$\text{Índice de Deslizamiento (Id)} = [s^{0.50} * p^{0.10} * h^{0.10} * r^{0.30}] \quad \text{Ec.1}$$

$$\text{Índice de Erosión (Ie)} = [s^{0.45} * p^{0.10} * t^{0.35} * r^{0.10}] \quad \text{Ec.2}$$

$$\text{Índice de Compactación (Ic)} = [p^{0.10} * t^{0.40} * r^{0.10} * d^{0.40}] \quad \text{Ec.3}$$

$$\text{Índice de Remoción (Ir)} = [s^{0.30} * p^{0.10} * r^{0.20} * t^{0.20} * d^{0.20}] \quad \text{Ec.4}$$

Por último, el índice agregado de fragilidad (IAF) se calcula usando la Ec. 5:

$$\text{Índice Agregado de Fragilidad (IAF)} = \max \{Id, Ie, Ic, Ir\} \quad \text{Ec.5}$$

La siguiente tabla describe los valores que pueden tomar los distintos atributos del suelo:

Nota de clase o valor	Profundidad (cm)	Precipitación (mm/año)	Drenaje Interno	Textura	Densidad	Pendiente deslizamiento (%)	Pendiente erosión (%)
0						0 - 30	0 - 5
1	>90	<600	Imperfecto	Fragmentos de roca	Muy denso		5 - 15
2,5	90 - 60	600 - 1200	Lento	Ripio y arenas gruesas	Denso		15 - 30
5	60 - 45	1200 - 1800	Moderado	Arenas finas	Blando	30 - 45	30 - 45
7,5	45-30	1800-2400	Bueno	Limos y arcillas, baja plasticidad *	Muy blando	45 - 60	
10	<30	>2400	Excesivo	Limos y arcillas, alta plasticidad *		>60	>45

* Estas clases se intercambian para el cálculo del Índice de Erosión (Ie).

Tabla 2: Valores numéricos correspondientes a los atributos del sitio.

FUENTE: Gayoso, 1997.

El índice de fragilidad cobra sentido físico cuando el valor numérico obtenido como resultado se transforma en una escala de significado y se relaciona con patrones físicos del ecositio o del proceso de cosecha (Ver Tabla 3).

IAF Obtenido	Nivel o clase de fragilidad	Descripción
0.0 a 1.9	Muy baja	No es posible apreciar cambios atribuibles a las operaciones de cosecha.
2.0 a 3.9	Baja	Baja susceptibilidad a la degradación. Por lo que son apropiadas operaciones normales de cosecha sin restricción.
4.0 a 5.9	Moderada	Sitios con susceptibilidad a la degradación moderada. Se recomienda maderear con skidders tomando precauciones.
6.0 a 7.9	Alta	Sitios susceptibles a la erosión. Se recomienda maderear con cables, cortas selectivas o protección.
8.0 a 10.0	Muy alta	Sitios extremadamente frágiles. Deben considerarse como áreas de protección.

Tabla 3: Descripción de los niveles de fragilidad.

FUENTE: Gayoso, 1997.

A pesar de que en la Tabla 3 se muestran cinco niveles para el índice de fragilidad, Andalaft definió trabajar con tres niveles de fragilidad debido a que no había diferencia en cuanto a las restricciones de operación de cosecha. Estos tres niveles de fragilidad se describen a continuación:

- Nivel de fragilidad bajo: IAF de 0.0 a 5.9.
- Nivel de fragilidad medio: IAF de 6.0 a 6.9.
- Nivel de fragilidad alto: IAF de 7.0 a 10.0: Los terrenos con este nivel de fragilidad se declaran zonas de protección.

Sabiendo que el índice de fragilidad refleja intrínsecamente la pendiente que posee el terreno, es necesario considerarla de forma separada ya que, primero, la pendiente del terreno es un factor determinante en la erosión del terreno y, segundo, el tipo de maquinaria skidder no puede trabajar en pendientes mayores al 30 %. Además, se define no cosechar en terrenos con una pendiente de más de 60 % por restricciones legales.

Tomando en consideración lo anterior se definen los niveles según fragilidad y pendiente del terreno (Tabla 4).

Niveles de susceptibilidad a la erosión (NSE)		
NSE	Rango de pendiente (%)	Nivel IAF
Bajo	0 - 30	Bajo
Medio Bajo	0 - 30	Medio
Medio Alto	30 - 60	Bajo
Alto	30 - 60	Medio

Tabla 4: Descripción de los niveles considerados.

FUENTE: Elaboración propia.

Para poder incorporar las tres medidas correspondientes al criterio de Erosión de Suelos al modelo, se rediseñó la variable de cosecha $X_{i,t,l}$ (hectáreas a cosechar en el nodo origen "i", con maquinaria "l", en el periodo "t"). La nueva variable debiera de diferenciar el nivel de susceptibilidad a la erosión (NSE) que posee el terreno. De esta manera se podría tener la cantidad de hectáreas a cosechar en los terrenos asociados al nodo origen "i" que poseen un NSE dado. Para poder utilizar un tipo de variable con estas características es necesario separar el terreno asociado al nodo origen "i" en subsectores (unidades de superficie más pequeñas), los cuales se caracterizan por el tipo de NSE que poseen y por el nodo origen al cual están asociados. Además, los subsectores asociados a un nodo origen poseen NSE distintos entre ellos. Por lo tanto, hay que tener claro que un nodo origen tiene asociado a lo más cuatro subsectores y a lo menos un subsector.

La nueva variable de cosecha tiene la siguiente forma:

$X_{i,t,l,f}$: Número de hectáreas a cosechar en subsector con un NSE "f" que está asociado al nodo origen "i", con maquinaria "l", en el periodo "t".

Ya definida esta variable, se describe a continuación la incorporación al modelo de las tres medidas de prevención.

Subcriterio 1: Evitar cosechas en suelos muy erosionables.

Explicación:

La idea de esta medida de prevención es restringir la cantidad de hectáreas para cada tipo de subsector. Como cada subsector tiene un NSE distinto, la cantidad de hectáreas a ser protegidas serán distintas en cada caso. El único subsector que no tiene este tipo de atributo es aquel con un NSE “f = bajo”, pues el cosechar en este tipo de terreno no produce mayor daño. Finalmente se tienen tres atributos en total para este subcriterio, uno para cada tipo de subsector considerado.

El atributo está definido como la cantidad de hectáreas a ser cosechadas en total por ambas máquinas, para todos los subsectores de un mismo tipo (NSE), en el horizonte de planificación. Se tienen tres atributos en total para este subcriterio, uno para cada tipo de subsector considerado.

Estructura matemática:

Metas asociadas a cada atributo:

- $\sum_{t,l} \sum_{i \in Ja} X_{i,t,l,f} + na_f - pa_f = Sa_f \quad f = \text{alto}$
- $\sum_{t,l} \sum_{i \in Jma} X_{i,t,l,f} + na_f - pa_f = Sa_f \quad f = \text{medio-alto}$
- $\sum_{t,l} \sum_{i \in Jmb} X_{i,t,l,f} + na_f - pa_f = Sa_f \quad f = \text{medio-bajo}$

Donde:

Sa_f : Nivel de aspiración para cada tipo de meta.

na_f y **pa_f** : Variables de desviación positiva y negativa respectivamente, para cada tipo de meta.

Ja : Conjunto de todos los nodos origen tales que existe un subsector $f = \text{alto}$.

Jma : Conjunto de todos los nodos origen tales que existe un subsector $f = \text{medio-alto}$.

Jmb : Conjunto de todos los nodos origen tales que existe un subsector $f = \text{medio-bajo}$.

Datos usados:

Los datos obtenidos para cada nivel de aspiración correspondiente a este subcriterio fueron definidos de acuerdo la cantidad de hectáreas disponibles para la cosecha separadas por NSE y, el posible daño que se podría causar en cuanto a la erosión del suelo debido a la cosecha:

Máxima área cosechada	
NSE	Area (Ha)
Alto	175
Medio Alto	215
Medio Bajo	425

Tabla 5: Máxima área a cosechar definida para cada nivel de aspiración.
FUENTE: Elaboración propia.

Subcriterio 2: Favorecer la cosecha en época de menor precipitación.

Explicación:

Este tipo de atributo tiene la finalidad de disminuir la cantidad de hectáreas expuestas en temporada de invierno, pues la probabilidad de que se erosionen debido a las lluvias es alta. Lo que se hizo fue calcular el IAF promedio de cada nodo origen, luego se agruparon los nodos origen con IAF promedio alto por cada predio y lo mismo se hizo con los nodos con IAF promedio medio e IAF promedio bajo. Para cada grupo de nodos origen armado y para cada tipo de maquinaria, se restringió a que la cantidad de hectáreas cosechadas en invierno con un tipo de maquinaria fuera menor o igual que una fracción de lo cosechado en verano con el mismo tipo de maquinaria. A continuación se presenta de manera simplificada la estructura que tendría un atributo genérico "A" asociado a este subcriterio:

$$A = V * p - I$$

Donde "V" sería la cantidad de hectáreas cosechadas en verano, "I" la cantidad de hectáreas cosechadas en invierno, para un nivel de fragilidad promedio, predio y

maquinaria determinados. El parámetro “p” debería ser la proporción aceptable de la cantidad de hectáreas cosechadas en invierno respecto a lo cosechado en verano. Ahora, considerando que son dos cambios de temporada de verano a invierno, dos tipos de maquinaria, tres niveles de fragilidad y 29 predios en oferta, se tendrían 348 combinaciones (o atributos). Serían demasiados atributos y se volvería poco manejable tanto para el análisis como para el posterior cálculo de las ponderaciones para cada atributo.

Para dar una solución al problema recién descrito se plantea trabajar con una variable que sea definida como el mínimo valor del conjunto de todos los atributos, de forma tal, que el nivel de fragilidad promedio (IAF promedio) y el tipo de maquinaria asociados sean los mismos. Esta nueva variable sería redefinida como atributo y existiría uno por cada conjunto. Sabiendo que cada conjunto depende del tipo de maquinaria y del nivel de fragilidad (IAF), se tienen seis conjuntos en total, por lo tanto se tienen seis atributos.

Estructura matemática:

La estructura matemática de los atributos es la siguiente:

- Para los nodos origen tales que el nivel de fragilidad (IAF) promedio es alto.

$$pa_l \cdot \sum_{i \in P(p)} \sum_{f \in I(i)} X_{i,(t-1),l,f} - \sum_{i \in P(p)} \sum_{f \in I(i)} X_{i,t,l,f} \geq da_l \quad \forall t = \text{invierno}, l, p(\text{predio})$$

- Para los nodos origen tales que el nivel de fragilidad (IAF) promedio es medio.

$$pm_l \cdot \sum_{i \in P(p)} \sum_{f \in I(i)} X_{i,(t-1),l,f} - \sum_{i \in P(p)} \sum_{f \in I(i)} X_{i,t,l,f} \geq dm_l \quad \forall t = \text{invierno}, l, p(\text{predio})$$

- Para los nodos origen tales que el nivel de fragilidad (IAF) promedio es bajo.

$$pb_l \cdot \sum_{i \in P(p)} \sum_{f \in I(i)} X_{i,(t-1),l,f} - \sum_{i \in P(p)} \sum_{f \in I(i)} X_{i,t,l,f} \geq db_l \quad \forall t = \text{invierno}, l, p(\text{predio})$$

Donde:

$P(p)$: Conjunto de nodos origen que pertenecen al predio “p”.

pa_l , pm_l , pb_l : Proporción de cantidad de hectáreas cosechadas en invierno respecto de las de verano para un tipo de maquinaria “l” y un nivel de IAF promedio alto, medio y bajo respectivamente.

da_l , dm_l , db_l : atributo asociado a un tipo de maquinaria “l” y un nivel de IAF promedio alto, medio y bajo respectivamente.

$I(i)$: Conjunto de todos los subsectores asociados al nodo origen “i”.

La estructura matemática de las metas para cada uno de los atributos definidos se describe a continuación:

- Meta para los nodos origen con un nivel IAF alto.

$$da_l + nba_l - pba_l = Sba_l \quad \forall l$$

- Meta para los nodos origen con un nivel IAF medio.

$$dm_l + nbm_l - pbm_l = Sbm_l \quad \forall l$$

- Meta para los nodos origen con un nivel IAF bajo.

$$db_l + nbb_l - pbb_l = Sbb_l \quad \forall l$$

Donde:

nba_l , nbm_l , nbb_l : Variables de desviación positivas para un tipo de maquinaria “l” y nivel IAF promedio alto, medio y bajo respectivamente.

pba_l , pbm_l , pbb_l : Variables de desviación negativas para un tipo de maquinaria “l” y nivel IAF promedio alto, medio y bajo respectivamente.

Sba_l , Sbm_l , Sbb_l : Niveles de aspiración para un tipo de maquinaria “l” y nivel IAF promedio alto, medio y bajo respectivamente.

Datos usados:

Para las fracciones de invierno-verano se tomaron los mismos datos usados en la tesis de Felipe Caro:

Fracciones de cosecha invierno-verano		
IAF	Maquinaria	Fracción
Alto	Skidder	0
	Torre	0,2
Medio	Skidder	0,5
	Torre	0,7
Bajo	Skidder	0,8
	Torre	No hay

Tabla 6: Fracciones de cosecha definidas para cada nivel de aspiración.

FUENTE: Caro (1999).

Los valores para los niveles de aspiración de este subcriterio tienen valor igual a cero, es decir, se desea que para cada maquinaria e IAF promedio la cosecha de invierno sea igual o menor que una fracción de lo cosechado en verano.

Subcriterio 3: Favorecer el uso de torres por sobre el de skidders en suelos frágiles.

Explicación:

El skidder o tractor afecta directamente al terreno al realizar el madereo arrastrando los troncos por el suelo. La torre no ejerce mayor daño sobre el terreno ya que el madereo lo realiza por el aire. Por esto es necesario restringir la cantidad de hectáreas a ser cosechadas con skidder, pero sólo en el tipo de subsector con un NSE "f = medio-bajo" debido a que la maquinaria tipo skidder no puede operar en superficies con una pendiente mayor al 30%. El tipo de atributo considerado para este subcriterio es la cantidad de hectáreas a ser cosechadas para el total de subsectores con NSE medio-bajo, en el horizonte de planificación.

Estructura matemática:

$$\sum_{i,l} X_{i,l,f} + nc - pc = Sc \quad f = \text{medio-bajo}$$

Donde:

Sc: Nivel de aspiración de la meta.

nc y **pc:** Variables de desviación positiva y negativa respectivamente.

Datos usados:

El nivel de aspiración para esta meta es de 350 Ha. Este dato fue obtenido de acuerdo a: la cantidad de hectáreas disponibles con NSE medio-bajo y, el posible daño que la maquinaria skidder podría causar en el terreno.

6.2.2. Criterio Contaminación de Recursos Hídricos

Para este criterio la medida de prevención fue colocar franjas alrededor de los ríos. Para esto, se consideraron los factores que inciden en la contaminación de los ríos. Estos factores son:

- Fragilidad del terreno.
- Pendiente del terreno.
- Densidad arbórea.
- Río con o sin afluentes.

Para los factores de pendiente y fragilidad del terreno se consideró la separación en subsectores que se definió anteriormente (Capítulo 6.2.1). Para la densidad arbórea se calculó la densidad arbórea promedio de cada subsector y se trabajó con tres niveles de densidad:

Densidad del bosque	
Niveles	Arboles / Ha
Alto	> 700
Medio	400 - 700
Bajo	< 400

Tabla 7: Niveles de densidades

Fuente: Elaboración propia

Además se tienen dos tipos de ríos, con afluentes y sin afluentes. Combinando los cuatro factores mencionados se obtienen 24 escenarios distintos. Estos escenarios se clasifican en tres grupos, escenario con nivel de riesgo alto, medio y bajo. De acuerdo a lo anterior, la siguiente tabla expone la definición de los riesgos para cada tipo de río existente en el terreno disponible para la cosecha:

Definición de riesgos para ríos			
Riesgo	Con afluente	Densidad	Tipo de Subsector
Bajo	xx	xx	Bajo
	xx	> 400	Medio-Bajo
	xx	> 700	Medio-Alto
Medio	xx	=400	Medio-Bajo
	xx	= 700	Medio-Alto
	No	$400 < d = 700$	Alto
	xx	> 700	Alto
Alto	xx	$< \text{ó} = 400$	Alto
	Si	$400 < d = 700$	Alto

xx: Quiere decir "sin importar el valor que tenga".

Tabla 8: Definición de riesgos para ríos

Fuente: Elaboración propia

Para cada tipo de riesgo se tiene un ancho de franja distinto.

Niveles de riesgo para los ríos	
Niveles	Ancho Franjas (mts)
Alto	Tipo 1 = 50
Medio	Tipo 2 = 30
Bajo	Tipo 3 = 15

Tabla 9: Niveles de riesgo para ríos

Fuente: Elaboración propia

Los atributos asociados a los subcriterios que se describen a continuación hacen referencia a la cantidad de metros de ríos protegidos con un ancho de franja tipo “e”, con $e \in \{\text{Tipo 1, Tipo 2, Tipo 3}\}$. Para poder definir este tipo de atributos se crea la siguiente variable:

$Xfr_{i,f}^e$: metros de río cubiertos con un ancho de franja tipo “e”, para el subsector “f” asociado al nodo origen “i” tal que posea metros de río.

Habiendo definido esta variable, se definen las metas según los distintos subcriterios.

Subcriterio 1: Ríos con nivel de riesgo alto

Explicación:

Los atributos asociados a este subcriterio son tres y cada uno se define como la cantidad de metros de ríos protegidos con una franja de tipo “e” con $e \in \{\text{Tipo 1, Tipo 2, Tipo 3}\}$. Se definen estos tres atributos porque, para un escenario de riesgo alto, es conveniente una franja de tipo 1, pero en el caso de que no sea factible debido a que el costo es muy alto, sería conveniente usar una franja tipo 2 o tipo 3 antes que dejar sin franja al río.

Estructura matemática:

Estructura de las tres metas a considerar:

$$\sum_{i,f \in I(i)} Xfr_{i,f}^e + nra^e - pra^e = Ra^e \quad " e \in \{\text{Tipo 1, Tipo 2, Tipo 3}\}, (i,f) \in \hat{I} \quad NRA$$

Donde:

nra^e y pra^e : Variables de desviación positiva y negativa respectivamente, para la franja de tipo “e”.

Ra^e : Nivel de aspiración de la meta asociada al tipo de franja “e”.

NRA: Conjunto de todos los pares (i,f) tales que el subsector “f” asociado al nodo origen “i” posee río con un nivel de riesgo alto.

Datos usados:

Los valores para cada nivel de aspiración son la protección de la totalidad de los metros de río con riesgo alto (937 mts).

Subcriterio 2: Ríos con nivel de riesgo medio

Explicación:

Siguiendo la misma lógica, se tiene que los atributos asociados a este subcriterio son la cantidad de metros de ríos protegidos con una franja de tipo “e” con $e \in \{\text{Tipo 2, Tipo 3}\}$, es decir, se recomienda el uso de una franja media, pero si los costos son muy altos puede ser conveniente el uso de una franja delgada antes de dejar sin franja al río.

Estructura matemática:

La estructura de las dos metas a considerar:

$$\sum_{i,f \in I(i)} Xf_{i,f}^e + nrm^e - prm^e = Rm^e \quad " e \in \hat{I} \{Tipo 2, Tipo 3\}, (i,f) \in NRM$$

Donde:

nrm^e y prm^e: Variables de desviación positiva y negativa respectivamente, para la franja de tipo “e”.

Rm^e: Nivel de aspiración de la meta asociada al tipo de franja “e”.

NRM: Conjunto de todos los pares (i,f) tales que el subsector “f” asociado al nodo origen “i” posee río con un nivel de riesgo medio.

Datos usados:

Los valores para cada nivel de aspiración son la protección de la totalidad de los metros de río con riesgo medio (15.033 mts).

Subcriterio 3: Ríos con nivel de riesgo bajo**Explicación:**

Los atributos asociados a este subcriterio son la cantidad de metros de ríos protegidos con una franja de tipo “e” con e = Tipo 3. Aquí solamente existe solamente un tipo de franja (franja delgada) ya que el río no posee un riesgo de contaminación muy alto.

Estructura matemática:

La estructura matemática de la meta para este subcriterio es:

$$\sum_{i,f \in I(i)} Xfr_{i,f}^e + nrb^e - prb^e = Rb^e \quad e = \text{Tipo 3}, (i,f) \in \hat{I} \text{ NRB}$$

Donde:

nrb^e y prb^e : Variables de desviación positiva y negativa respectivamente, para la franja de tipo e = 3.

Rb^e : Nivel de aspiración de la meta asociada al tipo de franja e = 3.

NRB : Conjunto de todos los pares (i,f) tales que el subsector “f” asociado al nodo origen “i” posee río con un nivel de riesgo bajo.

Datos usados:

El valor para el nivel de aspiración es la protección de la totalidad de los metros de río con riesgo bajo (75.949,5 mts).

6.2.3. Criterio Exposición del Paisaje

La medida de protección adoptada para este criterio es la de colocar franjas alrededor de los caminos públicos. Para esto deben considerarse los siguientes factores:

- Pendiente
- Densidad arbórea

Para el factor pendiente se usó la separación de subsectores que se definió anteriormente (Capítulo 6.2.1) sabiendo que los subsectores con un NSE bajo o medio-bajo, poseen una pendiente menor al 30% y con NSE medio-alto o alto poseen una pendiente mayor al 30%. Al igual que para el criterio de Contaminación de Recursos Hídricos, se utilizó la densidad promedio por subsector para poder definir el escenario en éste y se usaron los mismos tres niveles de densidad. Tomando en cuenta ambos factores se tienen seis escenarios. Estos seis escenarios fueron clasificados como escenarios con nivel de exposición alto, medio o bajo (Tipo 1, tipo 2 o tipo 3 respectivamente) como se explica en la siguiente tabla:

Definición de exposición para caminos		
Exposición	Pendiente	Densidad
Bajo	xx*	> 700
Medio	= 30%	= 400
	xx	400 < d = 700
Alto	30% < p = 60%	= 400

xx: Quiere decir "sin importar el valor que tenga"

Tabla 10: Definición de exposición para caminos

Fuente: Elaboración propia

Los atributos asociados a los subcriterios que se describen a continuación hacen referencia a la cantidad de metros de camino protegidos con una franja de tipo "e", con $e \in \{\text{Tipo 1, Tipo 2, Tipo 3}\}$ (franja ancha, media o delgada respectivamente). Para poder definir este tipo de atributos se crea la siguiente variable:

$Xf_{i,f}^e$: metros de camino cubiertos con una franja de tipo “e”, para el subsector “f” asociado al nodo origen “i” tal que posea metros de camino.

Habiendo definido esta variable, se definen las metas según los distintos subcriterios.

Subcriterio 1: Caminos con un nivel de exposición alto

Explicación:

Los atributos asociados a este subcriterio son la cantidad de metros de camino protegidos con una franja de tipo “e” con $e \in \{\text{Tipo 1, Tipo 2, Tipo 3}\}$. Se definen estos tres atributos porque, al igual que los ríos, para un escenario de exposición alto es conveniente una franja de tipo 1, pero en el caso de que no se pueda debido a que el costo es muy alto, sería conveniente usar una franja tipo 2 o tipo 3 antes que dejar sin franja al camino público.

Estructura matemática:

Una vez definido el conjunto, se define la estructura matemática de las tres metas a considerar:

$$\sum_{i,f \in I(i)} Xf_{i,f}^e + nca^e - pca^e = Ca^e \quad " e \in \hat{I} \{Tipo 1, Tipo 2, Tipo 3\}, (i,f) \in \hat{I} \quad NCA$$

Donde:

nca^e y pca^e : Variables de desviación positiva y negativa respectivamente, para la franja de tipo “e”.

Ca^e : Nivel de aspiración de la meta asociada al tipo de franja “e”.

NCA : Conjunto de todos los pares (i,f) tales que el subsector “f” asociado al nodo origen “i” posee camino con un nivel de exposición alto.

Datos usados:

Los valores para cada nivel de aspiración son la protección de la totalidad de los metros de camino con nivel de exposición alto (70 mts).

Subcriterio 2: Caminos con nivel de exposición medio

Explicación:

Los atributos asociados a este subcriterio son la cantidad de metros de caminos protegidos con una franja de tipo "e" con $e \in \{\text{Tipo 2, Tipo 3}\}$, es decir, se recomienda el uso de la franja media, pero si los costos son demasiado altos puede ser conveniente el uso de franja delgada antes de dejar al río desprotegido.

Estructura matemática:

La estructura matemática de las dos metas para este subcriterio es:

$$\sum_{i,f \in I(i)} Xf c_{i,f}^e + ncm^e - pcm^e = Cm^e \quad " e \in \{\text{Tipo 2, Tipo 3}\}, (i,f) \in NCM$$

Donde:

ncm^e y pcm^e : Variables de desviación positiva y negativa respectivamente, para la franja de tipo "e".

Cm^e : Nivel de aspiración de la meta asociada al tipo de franja "e".

NCM : Conjunto de todos los pares (i,f) tales que el subsector "f" asociado al nodo origen "i" posee camino con un nivel de exposición medio.

Datos usados:

Los valores para cada nivel de aspiración son la protección de la totalidad de los metros de caminos con nivel de exposición medio (2.963 mts).

Subcriterio 3: Caminos con nivel de exposición bajo

Explicación:

Los atributos asociados a este subcriterio son la cantidad de metros de caminos protegidos con una franja de tipo “e” con e = Tipo 3.

Estructura matemática:

Estructura matemática de la meta para este subcriterio es:

$$\sum_{i,f \in I(i)} Xf_{i,f}^e + ncb^e - pcb^e = Cb^e \quad e = \text{Tipo 3}, (i,f) \in \hat{I} \text{ NCB}$$

Donde:

ncb^e y pcb^e : Variables de desviación positiva y negativa respectivamente, para la franja de tipo e = 3.

Cb^e : Nivel de aspiración de la meta asociada al tipo de franja e = 3.

NCB : Conjunto de todos los pares (i,f) tales que el subsector “f” asociado al nodo origen “i” posee camino con un nivel de exposición bajo.

Datos usados:

El valor para el nivel de aspiración es la protección de la totalidad de los metros de camino con nivel de exposición bajo (4.844 mts).

6.3. Definición del criterio económico

Explicación:

El criterio económico solamente tiene asociado un atributo. Este atributo es el beneficio neto actualizado (BNA) o valor presente neto (VPN).

Estructura matemática:

En lo que sigue se describe las componentes de este atributo (VPN):

1. Ingreso por ventas.

$$\sum_{k,m,t} R_{k,m}^t \cdot Z_{k,m}^t$$

2. Costo de explotación de rodales.

$$\sum_{s,t,l} P_{s,t}^l \cdot \sum_{f \in D(s)} X_{s,t,l,f}$$

3. Costo por producir madera en el origen i.

$$\sum_{i,k,t} q_{i,t}^k \cdot Y_{i,t}^k$$

4. Costo por transporte.

$$\sum_{ij,r,k,t} d_{ij,r}^{k,t} \cdot F_{ij,r}^{k,t} + \sum_{i,m,k,t} d_{i,m}^{k,t} \cdot FF_{i,m}^{k,t}$$

5. Costo de construcción de caminos.

$$\sum_{ij,r,t} h_{ij,r}^t \cdot W_{ij,r}^t$$

6. Costo de reconstrucción de caminos.

$$\sum_{ij,t} \bar{h}_{ij}^t \cdot V_{ij}^t$$

7. Costo de almacenaje en las canchas de acopio.

$$\sum_{c,k,t} g_{c,k}^t \cdot I_c^{k,t}$$

La meta asociada a este atributo es la siguiente:

$$VPN + n - p = B$$

Donde:

n, p: variables de desviación positiva y negativa respectivamente.

B: nivel de aspiración asociada a la meta.

Datos usados:

Se utilizaron los mismos valores de costos y precios de productos que se emplearon en la tesis de Felipe Caro para los parámetros que componen el atributo económico (VPN). El valor para el nivel de aspiración de esta meta es igual al máximo VPN que la empresa puede obtener sin proteger el medioambiente (US\$ 15.085.220).

6.4. Modelo matemático modificado

Dada la incorporación de nuevas variables y parámetros al modelo, un conjunto de restricciones se vieron modificadas y, por otro lado, nacieron nuevas restricciones para dar coherencia a la aparición de las nuevas variables. No se describirá todo el modelo matemático, sino sólo aquellas partes nuevas y aquellas que fueron modificadas. Las metas definidas, variables de desviación, niveles de aspiración y los conjuntos de índices asociados no serán nuevamente expuestos aquí, pues estos ya fueron explicados en los capítulos anteriores.

Índices nuevos:

f : Índice que hace referencia a un tipo de subsector, el cual tiene características de fragilidad y pendiente.

e : Índice que hace referencia al tipo de franja a ocupar tanto para río como para camino.

Conjuntos nuevos:

$I(i)$: Conjunto de todos los tipos de subsectores “ f ” que existen en el nodo origen “ i ”.

$FR(i, f)$: conjunto de todos los tipos de franjas de protección asociados al nivel de riesgo que el subsector f del nodo origen i posee respecto a los ríos. Por ejemplo, si el nivel de riesgo es alto, entonces “ e ” $\in FR(i, f) = \{f_ancha, f_media, f_angosta\}$, si el nivel de riesgo es medio, entonces “ e ” $\in FR(i, f) = \{f_media, f_angosta\}$ y, por último, si el nivel de riesgo es bajo, entonces “ e ” $\in FR(i, f) = \{f_angosta\}$.

$FC(i, f)$: es el mismo tipo de conjunto que $FR(i, f)$ pero hace referencia a los caminos.

Parámetros nuevos:

$A_{i,f}$: Superficie total del subsector “ f ” en el nodo origen “ i ”.

$lr_{i,f}$: Largo total de los ríos en el subsector “ f ” del nodo origen “ i ”(metros). Si hay más de un río, este parámetro es igual a la suma de los largos de los ríos.

$lc_{i,f}$: Largo total de los caminos en el subsector “f” del nodo origen “i”(metros). Si hay más de un camino, este parámetro es igual a la suma de los largos de los caminos.

$fr_{i,f}^e$: Ancho de franja tipo “e” para el río del subsector “f” del nodo origen “i” (metros).

$fc_{i,f}^e$: Ancho de franja tipo “e” para el camino del subsector “f” del nodo origen “i” (metros).

VARIABLES NUEVAS:

$X_{i,t,l,f}$: Variable que indica la cantidad de hectáreas a ser cosechadas con la maquinaria “l”, en el subsector “f” asociado al nodo origen “i”, en el periodo “t”.

$Xfr_{i,f}^e$: Cantidad de metros de río a ser protegidos con una franja de tipo “e”, para el subsector “f” del nodo origen “i”.

$Xfc_{i,f}^e$: Cantidad de metros de camino a ser protegidos con una franja de tipo “e”, para el subsector “f” del nodo origen “i”.

Tra_e : Vale 1 si se tapa el río de riesgo alto con franja tipo $e \in \{f_ancha, f_media\}$.

Trm : Vale 1 si se tapa el río de riesgo medio con franja media.

Tca_e : Vale 1 si se tapa el camino con nivel de exposición alto con franja tipo $e \in \{f_ancha, f_media\}$.

Tcm : Vale 1 si se tapa el camino con nivel de exposición medio con franja media.

RESTRICCIONES MODIFICADAS:

1. Producción en el nodo origen “i”, con maquinaria “k” y periodo “t”.

$$a_{i,t}^k \cdot \sum_{l,f \in I(i)} X_{i,t,l,f} = Y_{i,t}^k \quad \forall i, k, t$$

2. Mínima área de cosecha para rodales sin ríos ni caminos.
 - a. Para rodales con superficies mayores que 10 (Ha).

$$\sum_{f \in I(i),l} X_{i,t,l,f} \leq E_{i,t} \cdot \sum_{f \in I(i)} A_{i,f} \quad \forall i, t$$

$$10 \cdot E_{i,t} \leq \sum_{f \in I(i),l} X_{i,t,l,f} \quad \forall i, t$$

b. Para rodales con una superficie menor que 10 (Ha).

$$E_{s,t} \cdot \sum_{i,f \in I(i)} A_{i,f} = \sum_{f \in I(i),l} X_{i,t,l,f} \quad \forall i,t$$

3. Mínima área de cosecha para rodales con ríos.

a. Para rodales con superficies mayores que 10 (Ha).

$$\sum_{f \in I(i),l} X_{i,t,l,f} \leq E_{i,t} \cdot \sum_{f \in I(i)} A_{i,f} \quad \forall i,t$$

$$10 \cdot E_{i,t} \leq \sum_{f \in I(i),l} X_{i,t,l,f} + \sum_{f \in I(i),e \in FR(i,f)} \frac{Xfr_{i,f}^e \cdot fr_{i,f}^e}{5.000} \quad \forall i,t$$

b. Para rodales con una superficie menor que 10 (Ha).

$$E_{s,t} \cdot \sum_{i,f \in I(i)} A_{i,f} \geq \sum_{f \in I(i),l} X_{i,t,l,f} \quad \forall i,t$$

$$E_{s,t} \cdot \sum_{i,f \in I(i)} A_{i,f} - \sum_{f \in I(i),e \in FR(i,f)} \frac{Xfr_{i,f}^e \cdot fr_{i,f}^e}{5.000} \leq \sum_{f \in I(i),l} X_{i,t,l,f} \quad \forall i,t$$

4. Mínima área de cosecha para rodales con caminos.

a. Para rodales con superficies mayores que 10 (Ha).

$$\sum_{f \in I(i),l} X_{i,t,l,f} \leq E_{i,t} \cdot \sum_{f \in I(i)} A_{i,f} \quad \forall i,t$$

$$10 \cdot E_{i,t} \leq \sum_{f \in I(i),l} X_{i,t,l,f} + \sum_{f \in I(i),e \in FC(i,f)} \frac{Xfc_{i,f}^e \cdot fc_{i,f}^e}{10.000} \quad \forall i,t$$

b. Para rodales con una superficie menor que 10 (Ha).

$$E_{s,t} \cdot \sum_{i,f \in I(i)} A_{i,f} \geq \sum_{f \in I(i),l} X_{i,t,l,f} \quad \forall i,t$$

$$E_{s,t} \cdot \sum_{i,f \in I(i)} A_{i,f} - \sum_{f \in I(i),e \in FR(i,f)} \frac{Xfc_{i,f}^e \cdot fc_{i,f}^e}{10.000} \leq \sum_{f \in I(i),l} X_{i,t,l,f} \quad \forall i,t$$

5. Mínima área de cosecha para rodales con ríos y caminos.

a. Para rodales con superficies mayores que 10 (Ha).

$$\sum_{f \in I(i),l} X_{i,t,l,f} \leq E_{i,t} \cdot \sum_{f \in I(i)} A_{i,f} \quad \forall i,t$$

$$10 \cdot E_{i,t} \leq \sum_{f \in I(i),l} X_{i,t,l,f} + \sum_{f \in I(i),e \in FC(i,f)} \frac{Xfc_{i,f}^e \cdot fc_{i,f}^e}{10.000} + \sum_{f \in I(i),e \in FR(i,f)} \frac{Xfr_{i,f}^e \cdot fr_{i,f}^e}{5.000} \quad \forall i,t$$

b. Para rodales con una superficie menor que 10 (Ha).

$$E_{s,t} \cdot \sum_{i,f \in I(i)} A_{i,f} \geq \sum_{f \in I(i),l} X_{i,t,l,f} \quad \forall i,t$$

$$E_{s,t} \cdot \sum_{i,f \in I(i)} A_{i,f} - \sum_{f \in I(i),e \in FR(i,f)} \frac{Xfc_{i,f}^e \cdot fc_{i,f}^e}{10.000} - \sum_{f \in I(i),e \in FR(i,f)} \frac{Xfr_{i,f}^e \cdot fr_{i,f}^e}{5.000} \leq \sum_{f \in I(i),l} X_{i,t,l,f} \quad \forall i,t$$

6. Actualización del área a cortar dada la protección de río o camino a usar.

a. Para los pares (i,f) tales que el subsector f correspondiente al nodo origen "i" no posea río ni camino.

$$\sum_{t,l} X_{i,t,l,f} \leq A_{i,f} \quad \forall i, f \in I(i)$$

b. Para los pares (i,f) tales que el subsector f correspondiente a nodo origen "i" posea río y no posea camino.

$$\sum_{t,l} (X_{i,t,l,f}) + \sum_{e \in FR(i,f)} \frac{Xfr_{i,f}^e \cdot fr_{i,f}^e}{5.000} + \leq A_{i,f} \quad \forall i, f \in I(i)$$

- c. Para los pares (i,f) tales que el subsector f correspondiente al nodo origen "i" no posea río y posea camino.

$$\sum_{i,l} (X_{i,l,f}) + \sum_{e \in FC(i,f)} \frac{Xfc_{i,f}^e \cdot fc_{i,f}^e}{10.000} \leq A_{i,f} \quad \forall i, f \in I(i)$$

- d. Para los pares (i,f) tales que el subsector f correspondiente al nodo origen "i" posea río y posea camino.

$$\sum_{i,l} (X_{i,l,f}) + \sum_{e \in FC(i,f)} \frac{Xfc_{i,f}^e \cdot fc_{i,f}^e}{10.000} + \sum_{e \in FR(i,f)} \frac{Xfr_{i,f}^e \cdot fr_{i,f}^e}{5.000} \leq A_{i,f}$$

$$\forall i, f \in I(i)$$

Restricciones nuevas:

1. Restricción para variables de protección de ríos y caminos.

- e. Para los pares definidos como (i,f) tales que el **subsector** "f" perteneciente al nodo origen "i" posea río.

$$\sum_{e \in FR(i,f)} Xfr_{i,f}^e \leq lr_{i,f} \quad \forall i, f \in I(i)$$

- f. Para subsectores definidos como (i,f) tales que el subsector "f" perteneciente al nodo origen "i" posea camino.

$$\sum_{e \in FC(i,f)} Xfc_{i,f}^e \leq lc_{i,f} \quad \forall i, f \in I(i)$$

- g. Para los pares definidos como (i,f) tales que el subsector "f" perteneciente al nodo origen "i" posea río con un riesgo alto.

- i. Se puede tapar los metros de río de riesgo alto con franja ancha si el resto de los metros de río del mismo riesgo están tapados con franja media.

$$\bullet \sum_{i,f \in I(i)} Xfr_{i,f}^e \leq Tra_e \cdot lr_{i,f} \quad e = f_ancha$$

$$\bullet \quad Tra_e \leq \frac{\sum_{i,f \in I(i)} \sum_{e \in H1} Xfr_{i,f}^e}{\sum_{i,f \in I(i)} lr_{i,f}}$$

$$e' = f_ancha, \quad H1 = FR(i, f) \setminus \{f_delgada\}$$

- ii. Se puede tapar los metros de río de riesgo alto con franja media si el resto de los metros de río del mismo riesgo están tapados con franja delgada.

$$\bullet \quad \sum_{i,f \in I(i)} Xfr_{i,f}^e \leq Tra_e \cdot lr_{i,f} \quad e = f_media$$

$$\bullet \quad Tra_e \leq \frac{\sum_{i,f \in I(i)} \sum_{e \in FR(i,f)} Xfr_{i,f}^e}{\sum_{i,f \in I(i)} lr_{i,f}} \quad e' = f_media$$

- h. Para los pares definidos como (i, f) tales que el subsector “i” perteneciente al nodo origen “i” posea río con un riesgo medio.

- i. Se puede tapar los metros de río de riesgo medio con franja media si el resto de los metros de río del mismo riesgo están tapados con franja delgada.

$$\bullet \quad \sum_{i,f \in I(i)} Xfr_{i,f}^e \leq Trm \cdot lr_{i,f} \quad e = f_media$$

$$\bullet \quad Trm \leq \frac{\sum_{i,f \in I(i)} \sum_{e \in FR(i,f)} Xfr_{i,f}^e}{\sum_{i,f \in I(i)} lr_{i,f}}$$

- i. Para los pares definidos como (i, f) tales que el subsector “i” perteneciente al nodo origen “i” posea camino con un nivel de exposición alto.

- i. Se puede tapar los metros de camino con nivel de exposición alto con franja ancha si el resto de los metros de camino del mismo nivel de exposición están tapados con franja media.

$$\bullet \quad \sum_{i,f \in I(i)} Xfc_{i,f}^e \leq Tca_e \cdot lc_{i,f} \quad e = f_ancha$$

$$\bullet \quad Tca_e \leq \frac{\sum_{i,f \in I(i)} \sum_{e \in H2} Xfc_{i,f}^e}{\sum_{i,f \in I(i)} lc_{i,f}}$$

$$e' = f_ancha, \quad H1 = FC(i, f) \setminus \{f_delgada\}$$

- ii. Se puede tapar los metros de camino con nivel de exposición alto con franja media si el resto de los metros de camino del mismo nivel de exposición están tapados con franja delgada.

$$\bullet \quad \sum_{i,f \in I(i)} Xfr_{i,f}^e \leq Tca_e \cdot lr_{i,f} \quad e = f_media$$

$$\bullet \quad Tca_e \leq \frac{\sum_{i,f \in I(i)} \sum_{e \in FC(i,f)} Xfc_{i,f}^e}{\sum_{i,f \in I(i)} lc_{i,f}} \quad e' = f_media$$

- j. Para los pares definidos como (i,f) tales que el subsector “i” perteneciente al nodo origen “i” posea camino con un nivel de exposición medio.

- i. Se puede tapar los metros de camino con nivel de exposición medio con franja media si el resto de los metros de camino con el mismo nivel de exposición están tapados con franja delgada.

$$\bullet \quad \sum_{i,f \in I(i)} Xfc_{i,f}^e \leq Tcm \cdot lc_{i,f} \quad e = f_media$$

$$\bullet \quad Tcm \leq \frac{\sum_{i,f \in I(i)} \sum_{e \in FC(i,f)} Xfc_{i,f}^e}{\sum_{i,f \in I(i)} lc_{i,f}}$$

Función objetivo:

Para poder definir cómo se quiere construir la función objetivo, hay que entender primero qué es lo que desea la empresa dado los niveles de protección medioambientales que han sido definidos por el experto medioambiental. Los niveles de aspiración para cada meta propuestos por el experto medioambiental permiten que el medioambiente tenga una protección adecuada, es decir, si se superan estos niveles de aspiración el medioambiente estaría siendo sobreprotegido, por otro lado, si no se logra llegar a los

niveles de aspiración, el medioambiente no estará siendo protegido adecuadamente. Ahora bien, a la empresa le interesa que el ambiente esté protegido en forma adecuada y no sobreprotegido, de lo contrario estarían invirtiendo dinero en evitar que se produzca un impacto negativo en el medioambiente que estaría igualmente cubierto si se protegiera sólo de forma adecuada.

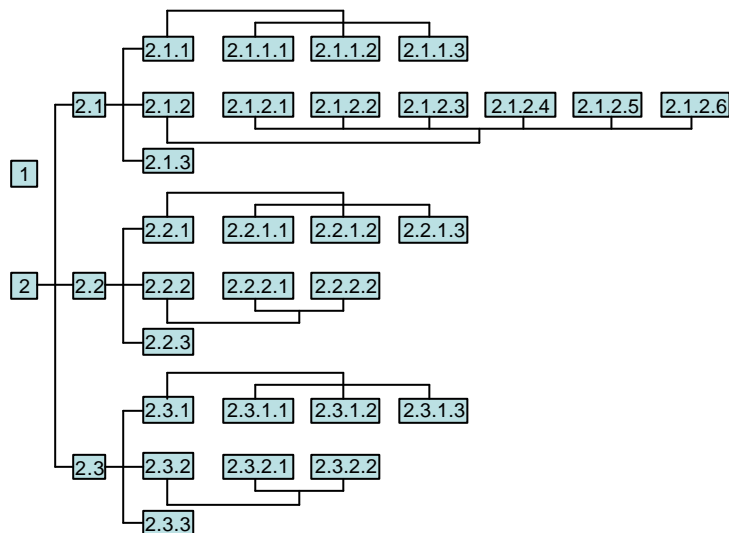
El experto medioambiental entrega también información acerca de la importancia de cada meta medioambiental, lo cual se traduce en una ponderación para cada meta medioambiental. Además, la empresa debe definir su preferencia entre el medioambiente y su VPN, de lo cual se obtendrán dos ponderadores, uno que hará referencia a la importancia otorgada al medioambiente y, el segundo, que hará referencia a la importancia otorgada al VPN de la empresa. El cálculo de los ponderadores de cada meta será explicado con detalle en el capítulo 6.5. Este problema será resuelto mediante el enfoque de programación por metas lexicográfico. La primera componente de la función de logro será definida como la minimización de la suma de las variables de desviación negativas de todas las metas del modelo multiplicadas por sus respectivas ponderaciones. De esta manera se obtendrá una solución que mostrará cuánto la empresa está dispuesta a dejar de ganar (VPN) por un cierto nivel de protección medioambiental. Ahora, es posible que la solución obtenida no sea eficiente, es decir, que existe la posibilidad de que algunos atributos medioambientales puedan superar su nivel de aspiración sin deteriorar la solución obtenida para el resto de los atributos. Los atributos que podrían mejorar su valor luego de la primera solución son aquellos en los que su nivel de aspiración no es igual a su valor ideal. Estos atributos son los asociados a los subcriterios de EVITAR COSECHAS EN SUELOS MUY EROSIONABLES y FAVORECER EL USO DE TORRES POR SOBRE EL DE SKIDDERS EN SUELOS FRAGILES. Por lo tanto, la segunda componente de la función de logro será la maximización de la suma de las variables de desviación positivas correspondientes a los dos subcriterios recién mencionados, multiplicadas por sus respectivas ponderaciones medioambientales. Es posible que con esta segunda componente de la función de logro se podría estar provocando una sobreprotección del medioambiente, sin embargo, la empresa no se vería afectada económicamente y tampoco medioambientalmente por ésta.

6.5. Cálculo de ponderaciones

6.5.1. Matrices de comparación por pares

Para el cálculo de las ponderaciones que necesita el modelo de programación por metas es necesario obtener las preferencias de los tomadores de decisiones. Para esto se decidió ocupar la metodología de comparación por pares. Esta metodología, sugerida por Saaty, se basa en la comparación de criterios por parejas. Esto quiere decir que para un criterio A y B se desea que el tomador de decisiones evalúe qué tan importante es A con respecto a B. Para esto Saaty propone aplicar los siguientes valores numéricos: (1) cuando los criterios son de la misma importancia; (3) moderada importancia; (5) fuerte importancia; (7) demostrada importancia; (9) extrema importancia. Asimismo, Saaty sugiere valores intermedios para juicios de valor contiguos. Para expresar reciprocidad se usan los inversos de estos valores. Estas comparaciones se ordenan en una matriz llamada matriz de comparación por pares.

Se debe tener en cuenta que los criterios, subcriterios y atributos del problema tienen cierta jerarquía que hay que tener en cuenta para poder hacer las comparaciones. Esta jerarquía se muestra en la siguiente figura.



Cada número de la figura hace referencia a un criterio, subcriterio o atributo. Esa referencia se muestra en la siguiente tabla:

Criterios, subcriterios y atributos	Pocisión Jerárquica
Criterio económico	1
Criterio medioambiental	2
Criterio de Erosión de Suelos	2.1
Criterio de Contaminación de Recursos Hídricos	2.2
Criterio de Exposición del Paisaje	2.3
Evitar cosechas en suelos muy erosionables	2.1.1
Favorecer la cosecha en época de menor precipitación	2.1.2
Favorecer el uso de torres por sobre el de skidders en suelos frágiles	2.1.3
Evitar cosechar en un subsector de tipo f = "alto"	2.1.1.1
Evitar cosechar en un subsector de tipo f = "medio_alto"	2.1.1.2
Evitar cosechar en un subsector de tipo f = "medio_bajo"	2.1.1.3
Cosechar una proporción determinada en invierno para un terreno de fragilidad promedio f = "alto" y con maquinaria skidder.	2.1.2.1
Cosechar una proporción determinada en invierno para un terreno de fragilidad promedio f = "medio" y con maquinaria skidder.	2.1.2.2
Cosechar una proporción determinada en invierno para un terreno de fragilidad promedio f = "bajo" y con maquinaria skidder.	2.1.2.3
Cosechar una proporción determinada en invierno para un terreno de fragilidad promedio f = "alto" y con maquinaria torre.	2.1.2.4
Cosechar una proporción determinada en invierno para un terreno de fragilidad promedio f = "medio" y con maquinaria torre.	2.1.2.5
Cosechar una proporción determinada en invierno para un terreno de fragilidad promedio f = "bajo" y con maquinaria torre.	2.1.2.6
Proteger ríos con un nivel de riesgo alto	2.2.1
Proteger ríos con un nivel de riesgo medio	2.2.2
Proteger ríos con un nivel de riesgo bajo	2.2.3
Proteger río con franja ancha	2.2.1.1
Proteger río con franja media	2.2.1.2
Proteger río con franja delgada	2.2.1.3
Proteger río con franja media	2.2.2.1
Proteger río con franja delgada	2.2.2.2
Proteger caminos con un nivel de exposición alto	2.3.1
Proteger caminos con un nivel de exposición medio	2.3.2
Proteger caminos con un nivel de exposición bajo	2.3.3
Proteger camino con franja ancha	2.3.1.1
Proteger camino con franja media	2.3.1.2
Proteger camino con franja delgada	2.3.1.3
Proteger camino con franja media	2.3.2.1
Proteger camino con franja delgada	2.3.2.2

Tabla 11: Jerarquía de criterios, subcriterios y atributos

Fuente: Elaboración propia

Dada la Jerarquía que existe entre los distintos criterios, subcriterios y atributos, se hacen las comparaciones por pares respectivas con el método de Saaty. A continuación se presentan las comparaciones por pares realizadas según la jerarquía presentada. La comparación 1 fue realizada por un experto de la empresa y el resto de las comparaciones fueron hechas por un experto en el tema medioambiental.

Comparación 1:

- CE: Criterio económico (1).
- MA: Criterio medioambiental (2).

Matriz de comparaciones:

Comparación 1		
	CE	MA
CE	1	2
MA	0,5	1

Comparación 2: Se comparan los distintos criterios medioambientales:

- CES: Criterio de Erosión de Suelos (2.1)
- CRH: Criterio de Contaminación de Recursos Hídricos (2.2)
- CCV: Criterio de Exposición del Paisaje (2.3)

Matriz de comparaciones:

Comparación 2			
	CES	CRH	CCV
CES	1	5	7
CRH	0,2	1	2
CCV	0,1429	0,5	1

Comparación 3: Para el criterio de Erosión de Suelos:

- ECSE: Evitar cosechas en suelos muy erosionables (2.1.1).
- FCMP: Favorecer la cosecha en época de menor precipitación (2.1.2).

- FTSS: Favorecer el uso de torres por sobre el de skidders en suelos frágiles (2.1.3).

Matriz de comparaciones:

Comparación 3			
	ECSE	FCMP	FTSS
ECSE	1	5	8
FCMP	0,2	1	3
FTSS	0,125	0,3333	1

Comparación 4: Para el subcriterio de EVITAR COSECHAS EN SUELOS MUY EROSIONABLES:

- ECA: Evitar la cosecha en un subsector de tipo f = “alto” (2.1.1.1).
- ECMA: Evitar la cosecha en un subsector de tipo f = “medio_alto” (2.1.1.2).
- ECMB: Evitar la cosecha en un subsector de tipo f = “medio_bajo” (2.1.1.3).

Matriz de comparaciones:

Comparación 4			
	ECMA	ECMB	ECB
ECA	1	7	9
ECMA	0,1429	1	2
ECMB	0,1111	0,5	1

Comparación 5: Para el subcriterio de FAVORECER LA COSECHA EN EPOCA DE MENOR PRECIPITACION:

- FAS: Cosechar una proporción determinada en invierno para un terreno de fragilidad promedio f = “alto” y con maquinaria skidder (2.1.2.1).
- FMS: Cosechar una proporción determinada en invierno para un terreno de fragilidad promedio f = “medio” y con maquinaria skidder (2.1.2.2).
- FBS: Cosechar una proporción determinada en invierno para un terreno de fragilidad promedio f = “bajo” y con maquinaria skidder (2.1.2.3).
- FAT: Cosechar una proporción determinada en invierno para un terreno de fragilidad promedio f = “alto” y con maquinaria torre (2.1.2.4).

- FMT: Cosechar una proporción determinada en invierno para un terreno de fragilidad promedio f = “medio” y con maquinaria torre (2.1.2.5).
- FBT: Cosechar una proporción determinada en invierno para un terreno de fragilidad promedio f = “bajo” y con maquinaria torre (2.1.2.6).

Matriz de comparaciones:

Comparación 5						
	FAT	FMT	FBT	FAS	FMS	FBS
FAT	1	5	7	0,5	2	8
FMT	0,2	1	2	0,1429	0,3333	3
FBT	0,1429	0,5	1	0,1111	0,2	1
FAS	2	7	9	1	4	9
FMS	0,5	3	5	0,25	1	5
FBS	0,125	0,3333	1	0,1111	0,2	1

Comparación 6: Para el criterio de Contaminación de Recursos Hídricos:

- PRRA: Proteger ríos con un nivel de riesgo alto (2.2.1).
- PRRM: Proteger ríos con un nivel de riesgo medio (2.2.2).
- PRRB: Proteger ríos con un nivel de riesgo bajo (2.2.3).

Matriz de comparaciones:

Comparación 6			
	PRRA	PRRM	PRRB
PRRA	1	5	7
PRRM	0,2	1	2
PRRB	0,1429	0,5	1

Comparación 7: Para el subcriterio de RIOS CON UN NIVEL DE RIESGO ALTO:

- PRAA: Proteger río con franja ancha (2.2.1.1).
- PRAM: Proteger río con franja media (2.2.1.2).
- PRAD: Proteger río con franja delgada (2.2.1.3).

Matriz de comparaciones:

Comparación 7			
	PRAA	PRAM	PRAD
PRAA	1	5	7
PRAM	0,2	1	2
PRAD	0,1429	0,5	1

Comparación 8: Para el subcriterio de RIOS CON UN NIVEL DE RIESGO MEDIO:

- PRMM: Proteger río con franja media (2.2.2.1).
- PRMD: Proteger río con franja delgada (2.2.2.2).

Matriz de comparaciones:

Comparación 8		
	PRMM	PRMD
PRMM	1	5
PRMD	0,2	1

Comparación 9: Para el criterio de Exposición del Paisaje:

- PCRA: Proteger caminos con un nivel de exposición alto (2.3.1).
- PCRM: Proteger caminos con un nivel de exposición medio (2.3.2).
- PCRB: Proteger caminos con un nivel de exposición bajo (2.3.3).

Matriz de comparaciones:

Comparación 9			
	PCRA	PCRM	PCRB
PCRA	1	5	7
PCRM	0,2	1	2
PCRB	0,1429	0,5	1

Comparación 10: Para el subcriterio de CAMINOS CON UN NIVEL DE EXPOSICION ALTO:

- PCAA: Proteger camino con franja ancha (2.3.1.1).
- PCAM: Proteger camino con franja media (2.3.1.2).
- PCAD: Proteger camino con franja delgada (2.3.1.3).

Matriz de comparaciones:

Comparación 10			
	PCAA	PCAM	PCAD
PCAA	1	5	7
PCAM	0,2	1	2
PCAD	0,1429	0,5	1

Comparación 11: Para el subcriterio de CAMINOS CON UN NIVEL DE EXPOSICION MEDIO:

- PCMM: Proteger camino con franja media (2.3.2.1).
- PCMD: Proteger camino con franja delgada (2.3.2.2).

Matriz de comparaciones:

Comparación 11		
	PCMM	PCMD
PCMM	1	3
PCMD	0,3333	1

La comparación 1 fue hecha por un experto de la empresa en temas económicos y el resto de las comparaciones fueron hechas por una experta forestal en el tema del medioambiente.

6.5.2. Cálculo de inconsistencia de las comparaciones

Luego de realizar las comparaciones es necesario revisar la consistencia de las mismas. Para esto se utilizó la técnica del auto-valor máximo (Saaty T. L., 1994). A continuación se explica en qué consiste esta técnica.

Asumiendo que se tienen n criterios A_1, \dots, A_n , con pesos w_1, \dots, w_n , respectivamente, y suponiendo que la matriz de comparación por pares posee en sus columnas proporciones de pesos de cada criterio con respecto a los demás. Entonces se tiene la siguiente ecuación:

$$Aw = \begin{bmatrix} A_1 & \dots & A_n \\ \frac{w_1}{w_1} & \dots & \frac{w_1}{w_n} \\ \frac{w_1}{w_1} & \dots & \frac{w_1}{w_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{w_n}{w_1} & \dots & \frac{w_n}{w_n} \\ \frac{w_1}{w_1} & \dots & \frac{w_1}{w_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} = n \begin{bmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} = nw$$

Donde A es la matriz de comparación por pares y w el vector de pesos.

La solución trivial de este sistema es que el vector de pesos w se haga cero, sin embargo el vector de ponderaciones no debiera ser cero. Por otro lado se puede tener que la matriz (A-nI) sea cero (I matriz identidad), es decir, que n sea un valor propio de A. Además, en la matriz A, cada fila es un múltiplo constante de la primera fila, en otras palabras, todos los valores propios excepto uno son cero. Entonces, sabiendo que la suma de los valores propios es igual a la traza de la matriz, se deduce que n es un valor propio de A.

Ahora, hay que tener en cuenta que al obtener de un experto los valores de la matriz A (matriz de comparación por pares), estos valores pueden poseer ciertas perturbaciones debido a la inconsistencia que se genera al realizar la comparación por pares. Esto implica que los valores propios también tienen ciertas perturbaciones. Teniendo en cuenta lo anterior el problema se traduce en la siguiente ecuación:

$$A'w' = \lambda_{\max} w'$$

Donde A' es la matriz de comparaciones por pares inconsistente de nxn, λ_{\max} es el mayor valor propio de la matriz A' y w' es el vector de pesos asociado a la matriz A'. El mejor escenario que se pudiese tener es que $\lambda_{\max} = n$. En tal caso la matriz A' es consistente. En el caso general se tiene que $\lambda_{\max} \geq n$.

Si la matriz A posee inconsistencias implica que λ_{\max} se aleja de n. En este sentido se quiere utilizar una medida de error debido a la inconsistencia producida por el juicio experto. Esta medida se representa por $(\lambda_{\max} - n)/(n - 1)$, la cual es llamada índice de

consistencia (I.C.). Paralelamente se construye un conjunto de matrices recíprocas generadas aleatoriamente con una escala de 1 a 9. El índice obtenido de estas matrices es llamado índice aleatorio (I.A.). Luego se obtiene el promedio de los índices aleatorios.

El cociente entre el I.C. y el promedio de los I.A. entrega el ratio de consistencia (R.C.). Un ratio de consistencia menor que 0.10 es una buena evidencia de que los juicios del experto al hacer las comparaciones poseen poca inconsistencia.

Todas las matrices de comparaciones elaboradas con los juicios del experto dieron una buena consistencia, es decir el ratio de consistencia dio valores menores que 0.10 para todas las matrices.

El valor de los índices I.C. e I.A. junto con el ratio R.C. para cada una de las matrices de comparaciones anteriores se encuentran en la siguiente tabla:

Consistencia de las matrices de comparaciones				
Matriz de comparación	Máximo valor propio	I.A.	I.C.	R.C.
1	2	0	0	
2	3,0142	0,2247	0,0071	0,0315
3	3,0441	0,2247	0,022	0,0981
4	3,0217	0,2247	0,0108	0,0482
5	6,1245	0,4214	0,0249	0,059
6	3,0142	0,2247	0,0071	0,0315
7	3,0217	0,2247	0,0108	0,0482
8	2	0	0	0
9	3,0142	0,2247	0,0071	0,0315
10	3,0142	0,2247	0,0071	0,0315
11	2	0	0	0

Tabla 12: Consistencia de las matrices de comparaciones.

Fuente: Elaboración propia

6.5.3. Obtención de las ponderaciones

Para la obtención de las ponderaciones se utilizó la técnica del auto-vector. Esta técnica tiene los siguientes pasos:

1. Elevar la matriz de comparaciones al cuadrado.
2. Sumar las componentes de las filas de la matriz obtenida y normalizar.
3. Luego elevar la matriz obtenida en el paso uno al cuadrado y realizar el paso 2 con esta nueva matriz.
4. Comparar los resultados normalizados de ambas matrices.
5. Realizar este procedimiento con la última matriz obtenida y detenerse cuando la resta entre los valores normalizados de esa matriz y la matriz anterior no cambie en cuatro decimales.

Con esta metodología se obtienen los pesos para cada componente de las matrices de comparaciones (ver anexo 1), pero para obtener las ponderaciones finales por atributo se deben agregar las ponderaciones obtenidas de acuerdo a la estructura jerárquica mostrada anteriormente. A continuación se muestra la tabla de las ponderaciones agregadas para cada atributo:

Ponderaciones para cada atributo				
Criterios	Subcriterios	Características		Pesos
Erosión de Suelos	Evitar cosechas en suelos muy erosionables	Subsector		*****
		medio_bajo		0,0139
		medio_alto		0,0239
		alto		0,1449
	Favorecer la cosecha en época de menor precipitación	IAF	Maquinaria	*****
				Alta
		Media	Skidder	0,0069
		Baja	Skidder	0,0015
		Alta	Torres	0,0121
		Media	Torres	0,003
	Favorecer el uso de torres por sobre el de skidders en suelos frágiles	Subsector	Maquinaria	*****
				medio_bajo
Ancho de franja		*****		
Contaminación de Recursos	Ríos con nivel de riesgo alto			*****
		delgada		0,0031

Hídricos		media	0,0053
		ancha	0,0325
	Ríos con nivel de riesgo medio	delgada	0,0015
		media	0,0077
	Ríos con nivel de riesgo bajo	delgada	0,0052
Exposición del Paisaje	Caminos con nivel de exposición alto	Ancho de franja	*****
		delgada	0,0021
		media	0,0038
		ancha	0,0171
	Caminos con nivel de exposición medio	delgada	0,0013
		media	0,0039
	Caminos con nivel de exposición bajo	delgada	0,0029
Criterio económico			0,6666

Tabla 13: Pesos agregados para cada comparación.

Fuente: Elaboración propia

6.6. Normalización de variables de desviación

Hay diversos atributos involucrados en este problema, algunos están medidos en metros, otros en hectáreas, etc. Sin embargo, al momento de hacer competir estos atributos a través de la minimización de sus variables de desviación no deseadas o maximización de sus variables deseadas, el resultado carece de sentido pues se ve fuertemente influenciada por la medida que se esté ocupando en cada atributo. Además, cada atributo se mueve dentro de un rango de valores distinto que los demás, por ejemplo, el valor que puede tomar el atributo de caminos cubiertos con franja ancha en un sector de alta exposición se encuentra en el rango $[0, 70]$ (mts), en cambio el valor que puede tomar el atributo económico descrito por el VPN de la empresa se encuentra en el rango $[-9.202.184, 13.800.000]$ (US\$). Esto puede provocar que se prefiera minimizar la variable de desviación negativa del atributo económico antes que la variable de desviación negativa del atributo de franja de caminos.

Para evitar estos problemas se requiere normalizar las variables de desviación (Romero C., 1991 y 2000b). Para hacer esto, se utilizará un método que requiere del cálculo del peor valor, o valor anti-ideal, y del mejor valor, o valor ideal, que puede tomar

cada atributo. Estos valores se obtienen completando una matriz llamada matriz de pagos que consiste en colocar en la fila i -ésima de la matriz los valores de cada atributo que se obtienen al maximizar la variable de desviación deseada del atributo i -ésimo. De esta manera, para completar la matriz de pagos, se debe maximizar por separado cada variable de desviación deseada de cada atributo del problema. Una vez completa esta matriz, en la diagonal quedan los valores ideales de los atributos. Ahora, el peor valor del atributo i -ésimo del problema se obtiene extrayendo de la matriz el peor valor de la columna i -ésima.

Una vez teniendo el mejor y el peor valor para cada atributo se procede a normalizar de la siguiente manera:

$$\frac{f_i(X) - f_i^*}{f_i^* - f_i^*} + \frac{\bar{n}_i - \bar{p}_i}{\bar{n}_i - \bar{p}_i} = \frac{N_i - f_i^*}{f_i^* - f_i^*}$$

Esta ecuación corresponde a la meta i -ésima del problema, donde $f_i(X)$ es la función que define al atributo i -ésimo, f_i^* es el mejor valor que puede tomar el atributo i -ésimo, f_i^* es el peor valor que puede tomar el atributo i -ésimo, \bar{n}_i y \bar{p}_i variables de desviación negativa y positiva respectivamente. Cada meta del modelo debe ser modificada siguiendo esta estructura de manera de cumplir con la normalización de todas las variables de desviación de cada atributo. Este método de normalización fue propuesto por Carlos Romero y Luiz Díaz-Balterio en uno de sus trabajos (Díaz-Balterio L. et al, 2004).

La matriz de pagos entrega cierta información acerca de la relación entre atributos (Ver anexo 2). En la fila del atributo económico se encuentra la mayor cantidad de valores anti-ideales de los demás atributos. Esto implica que el atributo económico se contrapone a los atributos medioambientales. Probablemente, aquellos atributos los cuales su valor anti-ideal no se encuentra en la fila del atributo económico, pueden tomar valores mayores que su nivel de aspiración al momento de maximizar las variables de desviación deseadas del problema. Estas sospechas se aclararán más adelante.

A continuación se muestra un resumen de los valores ideales y anti-ideales para cada atributo:

Resumen de valores ideales y anti-ideales					
Criterios	Subcriterios	Características		V. Ideal	V. Anti-id.
Erosión de suelos	Evitar cosechas en suelos muy erosionables	Subsector		Superficie (Ha)	
		medio_bajo		0	625,5
		medio_alto		0	319,8
	alto		0	651,6	
	Favorecer la cosecha en época de menor precipitación	IAF	Maquinaria	Diferencia (Ha)	
		Alta	Skidder	0	-8,1
		Media	Skidder	0	-111,4
		Baja	Skidder	0	-316,7
		Alta	Torres	0	-21,8
		Media	Torres	0	-183,5
	Favorecer el uso de torres por sobre el de skidders en suelos frágiles	Subsector	Maquinaria	Superficie (Ha)	
medio_bajo		Skidder	0	518,3	
Contaminación de recursos hídricos	Ríos con nivel de riesgo alto	Ancho de franja		Largo (mts)	
		delgada		937	0
		media			
	ancha				
	Ríos con nivel de riesgo medio	delgada		15.033	0
media					
Ríos con nivel de riesgo bajo	delgada		75.949,5	0	
Contaminación visual	Caminos con nivel de exposición alto	Ancho de franja		Largo (mts)	
		delgada		70	0
		media			
	ancha				
	Caminos con nivel de exposición medio	delgada		2.963	0
		media			
Caminos con nivel de exposición bajo	delgada		4.844	0	
Criterio económico (US\$)				13.659.697	-7.296.423

Tabla 14: Resumen de valores ideales y anti-ideales.

Fuente: Elaboración propia

7. REQUERIMIENTOS DE INFORMACION

La metodología que utilizó Caro en su tesis para trabajar la información disponible en el SIG (Sistema de Información Geográfica) se resume a continuación:

- a) La precipitación anual se obtuvo a nivel de predio y de ahí se dedujo la correspondiente al nodo origen.
- b) A nivel de polígono se extrajo del SIG los siguientes datos:
 - Predio, Sección, Rodal y Nodo al cual pertenece el polígono.
 - Serie de suelo del polígono. A partir de ahí se dedujo la densidad, profundidad, drenaje y textura correspondiente.
- c) Para las pendientes se utilizó una grilla de 2.500 m² (1/4 de Ha.) y para cada polígono se confeccionó la siguiente tabla:

Polígono:	103.047
<i>Pendiente</i>	<i>Hectáreas</i>
0 - 5	0,1
6 - 15	1,0
16 - 30	2,6
31 - 45	1,5
46 - 60	0,0
> 60	0,0
TOTAL	5,2

Tabla 15: Polígono – Rango de pendiente.

Fuente: Felipe Caro (1999)

- d) Con la información anterior se construyó una base de datos indexada por nodo, polígono y rango de pendiente, y a cada registro se le agregaron las notas correspondientes a las otras características del suelo (precipitación, densidad, profundidad, drenaje y textura) y se le calculó su IAF.

Ahora, para poder trabajar con los subsectores definidos según NSE, se ocupó la base de datos de nodo origen, polígono y rango de pendiente desarrollada por Caro. Usando esta base de datos se totalizó por subsector diferenciando los rangos de pendiente e IAF anteriormente definidos. De esta manera se obtuvo la cantidad de hectáreas asociada a cada subsector de cada nodo origen. Además, por cada subsector se extrajo de la base de datos los metros de camino, de río con afluentes y sin afluentes que éste poseía.

El cálculo de la fragilidad (IAF) promedio para el subcriterio de FAVORECER LA COSECHA EN EPOCA DE MENOR PRECIPITACIÓN del criterio medioambiental de Erosión de Suelos, se obtuvo calculando el promedio ponderado por superficie de la densidad contenida en la base de datos de nodo origen, polígono y rango de pendiente. La misma metodología de cálculo para la fragilidad promedio se ocupó para obtener la densidad arbórea promedio para cada subsector utilizada en el criterio de Contaminación de Recursos Hídricos y Exposición del Paisaje.

8. RESULTADOS Y ANALISIS

8.1. Definición de escenarios

Los escenarios escogidos fueron definidos en base a la variación de las ponderaciones calculadas por la información que entregó la empresa. Estas ponderaciones son aquellas que entregan información de la importancia del VPN y del medioambiente para la empresa. Los escenarios definidos son siete y están representados en la siguiente tabla:

Definición de escenarios	
Escenarios	Definición
1 (10.0)	100% de importancia el medioambiente y 0% el criterio económico
2 (8.2)	80% de importancia el medioambiente y 20% el criterio económico
3 (6.4)	60% de importancia el medioambiente y 40% el criterio económico
4 (4.6)	40% de importancia el medioambiente y 60% el criterio económico
B	33,3% de importancia el medioambiente y 66,6% el criterio económico
5 (2.8)	20% de importancia el medioambiente y 80% el criterio económico
6 (0.10)	0% de importancia el medioambiente y 100% el criterio económico

Tabla 16: Nomenclatura definida para cada escenario.

Fuente: Elaboración propia

Con estos escenarios se determinará cuánto está dispuesta a dejar de ganar la empresa para cuidar el medioambiente y en qué grado.

Existen dos escenarios en los cuales la función objetivo fue modificada: escenario 1 y escenario 6. Para el escenario 1, se definió la función de logro de la siguiente manera:

- En la primera componente se minimiza la suma de variables de desviación negativas correspondientes a los atributos medioambientales multiplicadas por sus respectivas ponderaciones.
- En la segunda componente se minimiza la variable de desviación negativa del atributo económico respetando el valor de las variables de desviación negativas y positivas del problema obtenidas en la minimización del punto anterior. Así se

obtendrá el mejor valor para el VPN dada la protección del medioambiente que se logró en el punto anterior.

- En la tercera componente se maximiza la suma de las variables de desviación positivas de los atributos correspondientes a los subcriterios de EVITAR COSECHAS EN SUELOS MUY EROSIONABLES y FAVORECER EL USO DE TORRES POR SOBRE EL DE SKIDDERS EN SUELOS FRAGILES multiplicadas por sus ponderaciones respectivas, respetando el valor de las variables de desviación positivas y negativas del problema obtenidas en la minimización anterior. Con esto se logra obtener cuánto se puede sobreproteger el medioambiente.

Para el escenario 6, la función de logro es modificada de la siguiente manera:

- En la primera componente se minimiza la variable de desviación negativa del atributo económico, pues esta posee el 100% de importancia.
- La segunda componente de la función de logro se define como la minimización de la suma de las variables de desviación negativas correspondientes a todos los atributos medioambientales multiplicadas por sus respectivas ponderaciones, respetando el valor obtenido en la minimización anterior de todas las variables de desviación negativas y positivas del problema. De esta manera se determina cuánto se puede acercar la solución a una protección medioambiental adecuada dado que se prioriza el VPN en un 100%.
- La tercera componente de la función de logro se define como la maximización de la suma de las variables de desviación positivas de los atributos correspondientes a los subcriterios de EVITAR COSECHAS EN SUELOS MUY EROSIONABLES y FAVORECER EL USO DE TORRES POR SOBRE EL DE SKIDDERS EN SUELOS FRAGILES multiplicadas por sus ponderaciones respectivas, respetando el valor obtenido de las variables de desviación positivas y negativas del problema obtenidas en la minimización anterior.

El resto de los escenarios posee la función de logro definida en el capítulo 6.4.

8.2. Resultados obtenidos

8.2.1. Resultados económicos, de producción y cosecha

La siguiente tabla muestra la variación del VPN, beneficios y costos. Además, los resultados expuestos en esta tabla consideran que los costos de cosecha son de 8 US\$/m³ para skidders, 9 US\$/m³ para torres. Estos datos fueron utilizados por Andalaft (1998) bajo recomendación de la empresa forestal Millalemu.

Resultados económicos							
Escenarios							
	1 (10.0)	2 (8.2)	3 (6.4)	4 (4.6)	B	5 (2.8)	6 (0.10)
VPN	13.221	14.141	14.490	14.610	14.652	14.738	14.947
Variación (%)	-11,5	-5,4	-3,1	-2,3	-2,0	-1,4	0,0
Beneficios	31.348	31.942	32.310	32.423	32.423	32.613	33.196
Variación (%)	-5,6	-3,8	-2,7	-2,3	-2,3	-1,8	0,0
Costos	18.127	17.801	17.820	17.813	17.771	17.874	18.250
Variación (%)	-0,7	-2,5	-2,4	-2,4	-2,6	-2,1	0,0
Desglose de costos							
Corte	7.912	7.804	7.935	8.001	7.991	8.054	8.260
Transporte	3.038	3.187	3.173	3.150	3.120	3.101	3.027
Trans. final	6.221	6.113	6.059	6.063	6.070	6.129	6.394
Construcción	74	71	72	102	102	102	80
Upgrade	882	626	581	497	489	489	489

Tabla 17: Resultados económicos en cada escenario (MUS\$).

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 17 muestra que mientras más importante es el medioambiente para la empresa menor es el VPN obtenido. Esto sucede debido a que las medidas medioambientales restringen las posibilidades de cosecha que la empresa posee ocasionando un aumento en los costos. Los costos que más aportan al costo total de la empresa son los costos de corte, transporte y transporte final. Se observa además que no hay un aumento gradual de los costos a medida que se le da una mayor importancia al medioambiente, es más, el escenario con costo total más alto es el 6(0.10).

En una primera instancia parecería extraño el comportamiento que se ve en los costos, sin embargo, para poder analizar de mejor manera lo que está sucediendo, se hace necesario observar lo que ocurre con la producción de la empresa bajo los distintos escenarios. La siguiente tabla (Tabla 18), muestra la oferta total de la empresa por producto (exportable, aserrable y pulpable) en miles de metros cúbicos para cada escenario.

Volumen de productos ofertados por la empresa							
Escenarios							
Producto	1 (10.0)	2 (8.2)	3 (6.4)	4 (4.6)	B	5 (2.8)	6 (0.10)
Exportable	212	212	212	212	212	212	212
Aserrable	381	406	406	406	406	406	406
Pulpable	345	334	350	355	355	363	388
Total	938	951	967	972	972	980	1.006
Variación (%)	-6,7	-5,4	-3,8	-3,3	-3,3	-2,5	0

Tabla 18: Volumen de productos ofertados por la empresa (1000 m3).

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 18 detalla que en todos los escenarios evaluados los productos superan la cota de demanda mínima⁴. Para el caso de los productos exportables, siempre se alcanza la cota de demanda máxima. Los productos aserrables, también alcanzan la cota de demanda máxima a excepción del escenario 1(10.0). Por otro lado, los productos pulpables nunca alcanzan la cota de demanda máxima y, además, disminuye su oferta gradualmente a medida que aumenta la importancia de la protección medioambiental. En ningún escenario se obtuvo que la oferta de estos productos llegara a la cota de demanda mínima. En el peor de los casos, la oferta del producto del tipo pulpable en el escenario 1(10.0) fue un 18% menor que su cota de demanda máxima.

A medida que se le da mayor importancia al medioambiente, los volúmenes de venta totales descritos en la Tabla 18 se alejan gradualmente de la cota de demanda máxima, en otras palabras, el modelo entrega como solución producir cada vez menos a fin de que los costos (Tabla 17) no aumenten de manera explosiva debido a la protección del medioambiente. Lo que provocaría un aumento más pronunciado de los costos sería el

⁴ La cota de demanda mínima para cada producto está definida en el modelo como un 70% de la cota de demanda máxima para cada producto.

incrementar la cota de demanda mínima de los productos pulpables a un valor mayor del 82% de su cota de demanda máxima.

A continuación se presentan los resultados de las áreas cosechadas para cada tipo de subsector y por cada tipo de maquinaria utilizada, además del porcentaje de área utilizada respecto del total disponible para la cosecha.

Cosechas en subsectores	Hectáreas cosechadas por cada subsector y maquinaria						
	Escenarios						
	1 (10.0)	2 (8.2)	3 (6.4)	4 (4.6)	B	5 (2.8)	6 (0.10)
Bajo	1.784	1.773	1.808	1.824	1.803	1.779	1.701
Skidder	1.580	1.762	1.793	1.771	1.768	1.777	1.701
Torre	204	11	16	53	35	2	0
Medio bajo	418	425	425	451	462	510	518
Skidder	249	347	348	347	350	350	518
Torre	169	78	77	104	112	160	0
Medio alto	200	165	169	167	167	174	172
Skidder	0	0	0	0	0	0	0
Torre	200	165	169	167	167	174	172
Alto	175	175	175	175	175	175	293
Skidder	0	0	0	0	0	0	0
Torre	175	175	175	175	175	175	293
Total	2.578	2.538	2.577	2.617	2.606	2.638	2.684
Area utilizada (%)	63,1	62,1	63,1	64	63,8	64,5	65,7

Tabla 19: Cantidad de hectáreas cosechadas por tipo de subsector y tipo de maquinaria.

Fuente: Elaboración propia

Para los subsectores Medio_alto y Alto que se muestran en la Tabla 19, no se cosecha con skidders debido a la pendiente que poseen esos terrenos. Por otro lado se tienen los subsectores Medio_bajo y Bajo, para los cuales podría pensarse que no es conveniente cosechar con torres ya que su costo es mayor que cosechar con skidders, sin embargo, a medida que se le da importancia al medioambiente, resulta más adecuado cosechar con torres que con skidders a fin de no erosionar el suelo. Nótese que en el escenario 6 (1.0), para los subsectores Medio_bajo y Bajo, no se cosecha con torres, ya que solo se posee un interés económico. Las medidas medioambientales que inducen la cosecha con torres son las de FAVORECER LA COSECHA EN EPOCA DE MENOR PRECIPITACION y

FAVORECER EL USO DE TORRES POR SOBRE EL DE SKIDDERS EN SUELOS FRAGILES.

Respecto a la cosecha realizada en suelos que pertenecen al subsector Bajo, el escenario 6 (0.10) es el que menor superficie cosechada posee en relación del resto de los escenarios. Esto se puede explicar debido a que cuando el medioambiente toma mayor importancia para la empresa, parte de las cosechas que se realizaban en subsectores Medio_bajo, Medio_alto y Alto se trasladan al subsector Bajo con el objetivo de cumplir las metas medioambientales para estos tres subsectores.

8.2.2. Resultados medioambientales

a. Criterio de Erosión de Suelos

La siguiente tabla muestra los porcentajes de cada atributo asociado al subcriterio de EVITAR COSECHAS EN SUELOS MUY EROSIONABLES respecto de su nivel de aspiración.

Porcentaje del valor del atributo respecto a su nivel de aspiración para el subcriterio de EVITAR COSECHAS EN SUELOS MUY EROSIONABLES								
Características de atributos	Valores para cada escenario (Ha)							Nivel de aspiración (Ha)
	1 (10.0)	2 (8.2)	3 (6.4)	4 (4.6)	B	5 (2.8)	6 (0.10)	
Subsectores								
Medio_bajo	98	100	100	106	109	120	122	425
Medio_alto	93	77	79	78	78	81	80	215
Alto	100	100	100	100	100	100	167	175

Tabla 20: Valor porcentual del atributo para el subcriterio de EVITAR COSECHAS EN SUELOS MUY EROSIONABLES.

Fuente: Elaboración propia

Según la Tabla 20, la superficie total cosechada en el subsector de tipo Medio_bajo no logra cumplir su nivel de aspiración de 425 Ha para los escenarios 4, B, 5 y 6. Solo cuando la importancia del medioambiente con respecto al criterio económico es igual o supera el 60% (escenarios 1, 2 y 3), se cumple o supera la meta. Para el atributo correspondiente al total de superficie cosechada en el subsector de tipo Medio_alto, siempre se mantiene por debajo del nivel de aspiración de 215 Ha, en otras palabras, en

todos los escenarios la meta es superada. Para el subsector de tipo Alto el atributo asociado logra llegar a su nivel de aspiración cuando la importancia del medioambiente es igual o mayor a un 20%.

A continuación, en la Tabla 21, se detallan los valores porcentuales de los atributos relacionados al subcriterio de FAVORECER LA COSECHA EN EPOCA DE MENOR PRECIPITACION.

Estos valores porcentuales significan qué tan cerca están los atributos del nivel de aspiración a partir de su peor valor o valor anti-ideal⁵. El nivel de aspiración para cada uno de estos atributos es igual a 0,0 Ha. La fórmula que describe el cálculo de este porcentaje es la siguiente:

$$\text{Valor porcentaje} = 100 \cdot (\text{PV} - \text{VA}) / (\text{PV} - \text{M})$$

PV: Peor valor del atributo

VA: Valor del atributo

M: Nivel de aspiración para el atributo

Porcentaje de cercanía del atributo a su nivel de aspiración para el subcriterio de FAVORECER LA COSECHA EN EPOCA DE MENOR PRECIPITACION								
Características de cada atributo		Valores para cada escenario (Ha)						
		1 (10.0)	2 (8.2)	3 (6.4)	4 (4.6)	B	5 (2.8)	6 (0.10)
IAF	Maquinaria							
Alto	Skidder	100	100	100	100	100	100	100
Medio	Skidder	100	100	100	94,9	86,6	71	52,5
Bajo	Skidder	100	83,5	68,6	68,1	67,7	67,3	42,2
Alto	Torres	100	100	100	100	100	100	100
Medio	Torres	100	99,3	96,3	76,5	78	84,1	70,9
Bajo	Torres	100	97,8	94,5	93,8	89,2	89,8	89,8

Tabla 21: Valor porcentual del atributo para el subcriterio de FAVORECER

LA COSECHA EN EPOCA DE MENOR PRECIPITACION.

Fuente: Elaboración propia

⁵ El valor anti-ideal corresponde al peor valor que puede tomar el atributo. Este valor fue calculado al momento de construir la matriz de pagos.

Los atributos correspondientes a IAF alto con maquinaria skidder e IAF alto con maquinaria torre, según la Tabla 21, cumplen con el nivel de aspiración en todos los escenarios. Esto se debe a que se cosecha tan solo 0,1 Ha en los nodos origen con IAF promedio alto durante el horizonte de tiempo, por lo tanto lograr la meta no involucra costo alguno que pueda afectar al VPN de la empresa o a algún atributo medioambiental. El atributo correspondiente al IAF medio y maquinaria skidder cumple su meta cuando el medioambiente tiene una importancia igual o mayor a un 60% respecto del criterio económico. El resto de los atributos logran llegar al nivel de aspiración solo en el escenario 1(0.0), es decir, cuando el medioambiente posee un 100 % de importancia respecto al criterio económico.

La siguiente tabla muestra los porcentajes de cada atributo asociado al subcriterio de FAVORECER EL USO DE TORRES POR SOBRE EL DE SKIDDERS EN SUELOS FRAGILES respecto de su nivel de aspiración.

Porcentaje del valor del atributo respecto a su nivel de aspiración para el subcriterio de FAVORECER EL USO DE TORRES POR SOBRE EL DE SKIDDERS EN SUELOS FRAGILES								
Característica del atributo		Valores para cada escenario						
		1 (10.0)	2 (8.2)	3 (6.4)	4 (4.6)	B	5 (2.8)	6 (0.10)
Subsector	Maquinaria							
Medio_bajo	Skidder	71,3	99,1	99,4	99,1	100	100	148,1

Tabla 22: Valor porcentual del atributo para el subcriterio de FAVORECER EL USO DE TORRES POR SOBRE EL DE SKIDDERS EN SUELOS FRAGILES.

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 22 se observa que el atributo logra llegar al nivel de aspiración de 350 Ha cuando la empresa le da una importancia al medioambiente mayor o igual al 20% respecto del criterio económico (escenario 5). En los escenarios 2, 3 y 4 no se observa mayor variación respecto de los escenarios B y 5. Sin embargo en el escenario 1, el valor del atributo mejora el valor del nivel de aspiración cosechándose un 28,7% menos que éste. El valor del atributo en el escenario 6 se aleja significativamente del nivel de aspiración cosechándose un 48% más que su nivel de aspiración.

b. Criterio de Contaminación de Recursos Hídricos

En lo que sigue se muestra información del porcentaje de metros protegidos con franja para los ríos con distinto tipo de riesgo. En la sección 6.2.2 se detallaron las franjas que podrían tener los ríos según el riesgo que poseen. A continuación presenta la Tabla 23 con los porcentajes de metros de río protegidos para cada escenario separados por riesgo y ancho de franja. En la columna derecha se tienen los niveles de aspiración para cada atributo en metros.

Porcentaje de metros de río protegidos para el criterio de CONTAMINACION DE RECURSOS HIDRICOS									
Características de atributos		Valores para cada escenario							Nivel de aspiración (m)
Subcriterios	Características	1 (10.0)	2 (8.2)	3 (6.4)	4 (4.6)	B	5 (2.8)	6 (0.10)	
Ríos con nivel de riesgo alto	Ancho de franja								
	delgada	0	0	0	0	0	0	49	937
	media	0	0	0	0	0	0	0	
ancha	100	100	100	100	100	100	0		
Ríos con nivel de riesgo medio	delgada	0	0	0	0	3	7	31	15.033
	media	100	100	100	100	97	93	0	
Ríos con nivel de riesgo bajo	delgada	100	99	70	51	45	18	18	75.949,5

Tabla 23: Porcentaje de metros de río protegidos para el criterio de CONTAMINACION DE RECURSOS HIDRICOS.

Fuente: Elaboración propia

Los ríos con nivel de riesgo alto en el escenario 6, solo están protegidos en un 49% con franja delgada. Esta no es una buena protección considerando que la protección óptima es con franja ancha para todos los metros de ríos con nivel de riesgo alto. Sin embargo en el escenario 5 o mejor dicho cuando el medioambiente adquiere una importancia del 20% respecto al criterio económico, los ríos con nivel de riesgo alto logran ser protegidos en un 100% con franja ancha.

Para los ríos con nivel de riesgo medio en el escenario 6 se protegen en un 31% con franja delgada, lo cual es una protección baja. Para los escenarios B y 5 se cubren el 100% de los ríos con nivel de riesgo medio con algún tipo de franja. Además, el porcentaje de ríos con nivel de riesgo medio cubierto con franja media para los escenarios B y 5 es mayor o igual a un 93% del total de metros de río, es decir, este tipo de ríos está

siendo protegido casi totalmente. Para los escenarios 1, 2, 3 y 4, los ríos con nivel de riesgo medio están cubiertos en un 100% con franja media, en otras palabras este tipo de ríos son protegidos totalmente cuando el medioambiente posee una importancia mayor o igual al 40%.

Por último, se tiene el porcentaje de los metros de río protegidos con nivel de riesgo bajo. Este tipo de ríos conforma un 82,6% del total de los ríos, lo cual implica que a pesar de que son ríos con nivel de riesgo bajo estos no dejan de ser importantes. La protección de estos ríos empieza a aumentar gradualmente a medida que la importancia del medioambiente crece. En el escenario 6 se protegen un 18% de los metros de río con nivel de riesgo bajo hasta llegar a un 100% de metros de río protegidos en el escenario 1.

c. Criterio de Exposición del Paisaje

Recordando el criterio de Exposición del Paisaje, se tiene que los caminos públicos, dependiendo del nivel de exposición que tienen, se deben proteger con cierto tipo de franjas que impidan la visión a terrenos cosechados. Para el criterio de Exposición del Paisaje se muestran en la Tabla 24 el porcentaje de metros de camino protegidos separados por tipo de exposición y por ancho de franja.

Porcentaje de metros de camino protegidos para el criterio de EXPOSICION DEL PAISAJE									
Características de atributos		Valores para cada escenario							Nivel de aspiración (m)
Subcriterios	Características	1 (10.0)	2 (8.2)	3 (6.4)	4 (4.6)	B	5 (2.8)	6 (0.10)	
Caminos con nivel de exposición alta	Ancho de franja								70
	delgada	0	0	0	0	0	0	0	
	media	0	0	0	0	0	0	0	
Caminos con nivel de exposición media	ancha	100	100	100	100	100	100	100	2.963
	delgada	0	0	0	0	0	0	3	
	media	100	100	100	100	100	100	0	
Caminos con nivel de exposición baja	delgada	100	100	100	100	100	100	19	4.844

Tabla 24: Porcentaje de metros de camino protegidos para el criterio de Exposición del Paisaje

Fuente: Elaboración propia

Los caminos con nivel de exposición alta logran un 100% de protección con franja ancha bajo cualquier escenario. Esto es debido a que la cantidad de metros de caminos con nivel de exposición alta son en total 70 mts, lo cual es una cantidad de metros baja como para afectar el VPN de la empresa al colocar franja ancha.

Para el escenario 6 tanto los caminos con nivel de exposición media como los de exposición baja poseen una protección baja (un 3% de los metros de camino con nivel de exposición media con franja delgada y un 19% de los metros de camino con nivel de exposición baja respectivamente). Los caminos con nivel de exposición media y baja son protegidos en un 100% desde el escenario 5 hasta el escenario 1.

8.2.3. Comparación económica y medioambiental

Es importante entender cómo se relaciona la protección medioambiental con el VPN de la empresa. Hasta ahora se han analizado los valores obtenidos de los atributos por separado. Lo que se presenta en esta sección del trabajo son alternativas de protección medioambiental y su implicancia económica.

Para tener una noción de la protección medioambiental como un todo, se define el índice de protección del medioambiente (IPM) el cual es la suma de todas las variables de desviación negativas correspondientes a atributos medioambientales multiplicadas por su ponderación correspondiente. La diferencia de estas ponderaciones con las que se utilizaron en la función objetivo es que no consideran la importancia del medioambiente para la empresa, por lo tanto, la estructura del IPM para cada escenario tomado en cuenta no cambia.

El índice de protección del medioambiente refleja cuan lejos se está de cumplir los niveles de aspiración propuestos para cada meta, por lo tanto, mientras menor sea el valor de éste, mayor será la protección del medioambiente. El valor de este índice en el escenario 1 es el menor valor que puede tomar, es decir, cuando la empresa cumple con todas las metas medioambientales y luego se preocupa del VPN. Por otro lado, el valor del índice en el escenario 6 es el mayor valor que puede tomar, en otras palabras, la empresa se preocupa primero del VPN y posteriormente del medioambiente.

La Tabla 25 muestra los valores porcentuales de los atributos medioambientales presentados en la en la sección anterior (Resultados medioambientales), en conjunto con el valor del VPN de la empresa y el índice de protección del medioambiente (IPM). Asimismo, en esta tabla se muestra el recorrido porcentual que el IPM presenta desde el escenario 6 hasta el escenario 1 considerando como valores extremos del IPM a los obtenidos en estos dos últimos escenarios. Conjuntamente, en el Gráfico 1, se expone el valor del VPN de la empresa y el valor del Índice de Protección del Medioambiente para cada escenario de la Tabla 25. Los valores reales de los atributos y de sus variables de desviación respectivas en cada escenario se encuentran en el anexo 3 y 4 respectivamente.

Resumen de valores porcentuales para atributos medioambientales y económico									
Criterio de erosión de suelos									
Características de atributos			Valores para cada escenario						
Subcriterios	Características	1 (10.0)	2 (8.2)	3 (6.4)	4 (4.6)	B	5 (2.8)	6 (0.10)	
Evitar cosechas en suelos muy erosionables	Subsector								
		medio_bajo	98	100	100	106	109	120	122
		medio_alto	93	77	79	78	78	81	80
		alto	100	100	100	100	100	100	167
Favorecer la cosecha en época de menor precipitación	IAF	Maquinaria							
	Alta	Skidder	100	100	100	100	100	100	
	Media	Skidder	100	100	100	95	87	71	53
	Baja	Skidder	100	84	69	68	68	67	42
	Alta	Torres	100	100	100	100	100	100	100
	Media	Torres	100	99	96	77	78	84	71
	Baja	Torres	100	98	95	94	89	90	90
Favorecer el uso de torres por sobre el de skidders en suelos frágiles	Subsector	Maquinaria							
	medio_bajo	Skidder	71	99	99	99	100	100	148
Criterio de contaminación de recursos hídricos									
Ríos con nivel de riesgo alto	Ancho de franja								
		delgada	0	0	0	0	0	0	49
		media	0	0	0	0	0	0	0
		ancha	100	100	100	100	100	100	0
Ríos con nivel de riesgo medio		delgada	0	0	0	0	3	7	31
		media	100	100	100	100	97	93	0
Ríos con nivel de riesgo bajo		delgada	100	99	70	51	45	18	18
Criterio de contaminación visual									
Caminos con nivel de exposición alto	Ancho de franja								
		delgada	0	0	0	0	0	0	0
		media	0	0	0	0	0	0	0
		ancha	100	100	100	100	100	100	100
Caminos con nivel de exposición medio		delgada	0	0	0	0	0	0	3
		media	100	100	100	100	100	100	0
Caminos con nivel de exposición bajo		delgada	100	100	100	100	100	100	19
Criterio económico									
VPN (MUS\$)		13.221	14.141	14.490	14.610	14.652	14.738	14.947	
Variación respecto del escenario 6 (0.10) (%)		-11,5	-5,4	-3,1	-2,3	-2	-1,4	0	
Índice de protección del medioambiente (IPM)		60.998	62.020	67.668	75.379	79.154	89.859	315.173	
Recorrido porcentual del IPM desde escenario 6 a 1		100	99,60	97,38	94,34	92,86	88,65	0	

Tabla 25: Valores porcentuales de los atributos medioambientales y económico.

Fuente: Elaboración propia

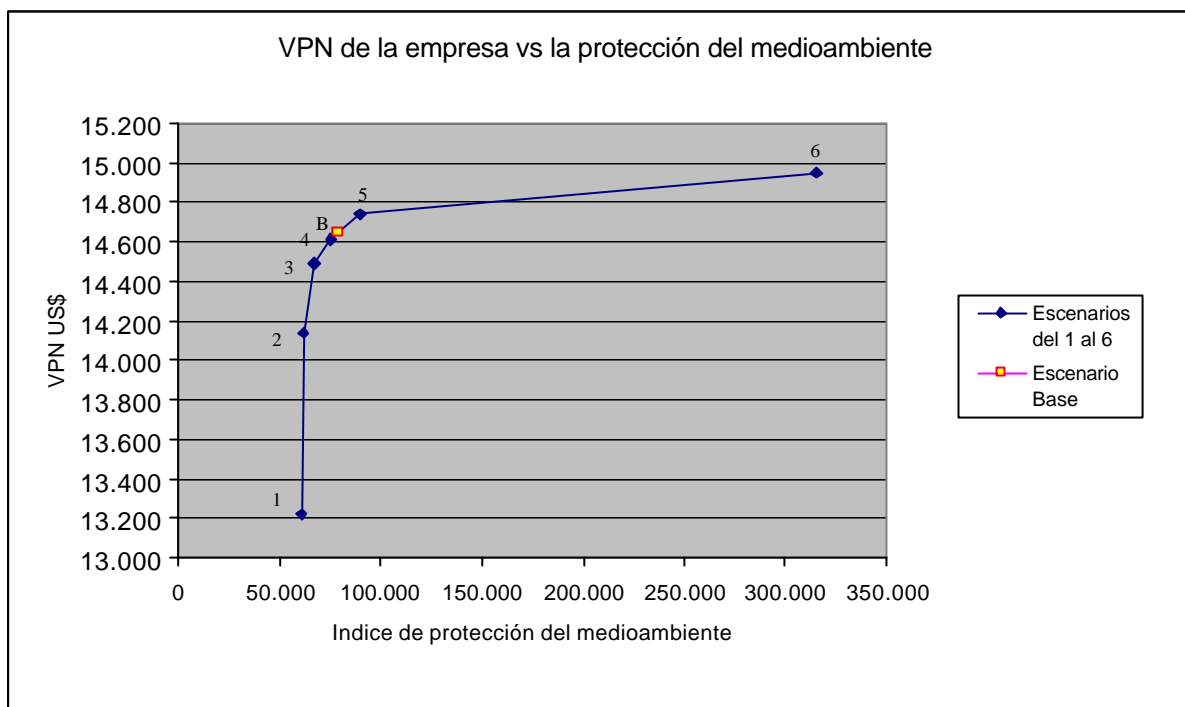


Gráfico 1: Relación del VPN de la empresa y la protección del medioambiente.

Fuente: Elaboración propia

En el Gráfico 1 se muestra que existe una mejora significativa en cuanto a la protección del medioambiente al pasar del escenario 6 al 5, comparado con la disminución del VPN de la empresa. En la Tabla 25 se puede ver que la magnitud de esta mejora se debe al aumento de la protección en la mayoría de los subcriterios medioambientales. Los caminos quedan protegidos en un 100%, los ríos con nivel de riesgo alto y medio aumentan su protección cerca del 100%. Por otro lado, para los subcriterios de EVITAR COSECHAS EN SUELOS MUY EROSIONABLES y FAVORECER EL USO DE TORRES POR SOBRE EL DE SKIDDERS EN SUELOS FRAGILES el aumento de la protección también es significativo. Los atributos relacionados al subcriterio de FAVORECER LA COSECHA EN EPOCA DE MENOR PRECIPITACION, no mejoran significativamente como los atributos de otros subcriterios, pero la mayoría de éstos se acercan en cierta medida a su nivel de aspiración.

Desde el escenario 5 hasta el escenario 1, el aumento de la protección del medioambiente es cada vez más difícil en términos económicos y el potencial de mejoramiento de la protección es pequeño.

Ahora bien, si se observa la preferencia que posee la empresa en el escenario base (B), se puede apreciar que está bastante cercano al escenario 4 tanto en términos económicos como en protección medioambiental. El índice de protección medioambiental ha recorrido un 93% hasta el escenario base. Esto quiere decir que, a pesar de que la preferencia por el medioambiente en este escenario es de un 33,3%, la protección del medioambiente está muy cercana a la óptima, considerando como óptima a la protección que se tiene en el escenario 1. Para llegar al nivel de protección que se tiene en el escenario B la empresa debe disminuir el VPN que posee en el escenario 6 en un 2%.

Según el Gráfico 1 trasladarse desde el escenario 3 al escenario 2 o desde el escenario 2 al 1 provoca una disminución del VPN bastante mayor que para el resto de los escenarios. La disminución del VPN es de un 5,4% y de un 11,5% respectivamente respecto del VPN que se tiene en el escenario 6. Por otro lado se tiene que el índice de protección medioambiental tan solo recorre un 2% desde el escenario 3 al 2 y un 0,4% desde el escenario 2 al 1.

La Tabla 25 muestra que, los últimos dos atributos pertenecientes al subcriterio de FAVORECER LA COSECHA EN EPOCA DE MENOR PRECIPITACION, se alejan de su nivel de aspiración en ciertos escenarios a medida que se le da mayor importancia al medioambiente, sin embargo, como lo indica el IPM, a nivel de protección total del medioambiente se está mejor.

La siguiente tabla (Tabla 26) posee el escenario en el cual cada atributo medioambiental logra llegar o supera su nivel de aspiración. Estos atributos están ordenados según sus ponderaciones de mayor a menor, es decir, el atributo en la posición 1 posee la ponderación con mayor valor y el atributo en la posición 22 posee la ponderación con valor más bajo. Los valores detallados de las ponderaciones se encuentran en la Tabla 13 (Sección 6.5.3). Los atributos con franjas grises no alcanzan su nivel de aspiración en ningún escenario.

Escenario en el cual se cumple o supera el nivel de aspiración para cada atributo								
Posición	Descripción de atributos	Escenarios						
		1	2	3	4	B	5	6
1	Evitar cosechas en suelos muy erosionables para subsector alto	X	X	X	X	X	X	
2	Ríos con nivel de riesgo alto protegidos con franja ancha	X	X	X	X	X	X	
3	Evitar cosechas en suelos muy erosionables para subsector medio_alto	X	X	X	X	X	X	X
4	Cosecha en época de menor precipitación, IAF Alto y maquinaria Skidder	X	X	X	X	X	X	X
5	Favorecer el uso de torres por sobre el de skidders en suelos frágiles	X	X	X	X	X	X	
6	Caminos con nivel de riesgo alto protegidos con franja ancha	X	X	X	X	X	X	X
7	Evitar cosechas en suelos muy erosionables para subsector medio_bajo	X	X	X				
8	Cosecha en época de menor precipitación, IAF Alto y maquinaria Torre	X	X	X	X	X	X	X
9	Cosecha en época de menor precipitación, IAF Medio y maquinaria Skidder	X	X	X				
10	Ríos con nivel de riesgo medio protegidos con franja media	X	X	X	X			
11	Ríos con nivel de riesgo alto protegidos con franja media							
12	Ríos con nivel de riesgo bajo protegidos con franja delgada	X						
13	Caminos con nivel de riesgo medio protegidos con franja media	X	X	X	X	X	X	
14	Ríos con nivel de riesgo alto protegidos con franja delgada							
15	Caminos con nivel de riesgo alto protegidos con franja media							
16	Cosecha en época de menor precipitación, IAF Medio y maquinaria Torre	X						
17	Caminos con nivel de riesgo bajo protegidos con franja delgada	X	X	X	X	X	X	
18	Ríos con nivel de riesgo medio protegidos con franja delgada							
19	Caminos con nivel de riesgo alto protegidos con franja delgada							
20	Cosecha en época de menor precipitación, IAF Bajo y maquinaria Torre	X						
21	Cosecha en época de menor precipitación, IAF Bajo y maquinaria Skidder	X						
22	Caminos con nivel de riesgo medio protegidos con franja delgada							

Tabla 26: Escenario en el que se cumple o supera el nivel de aspiración para cada atributo.

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 26, muestra que los atributos con ponderaciones de mayor valor alcanzan su nivel de aspiración en escenarios con menor importancia medioambiental. Por otro lado, la mayoría de los atributos que poseen ponderaciones con valores bajos alcanzan su nivel de aspiración en escenarios con alta importancia medioambiental. No obstante, existen algunas excepciones. Los atributos en las posiciones 13 y 17 a pesar de tener una ponderación baja, alcanzan su meta en el escenario 5. Esto sucede puesto que a la empresa forestal no le significa mayor costo el hacer que se cumpla el nivel de aspiración para estos atributos. Por el contrario, los atributos en las posiciones 7 y 9 poseen ponderaciones con valores relativamente altos, sin embargo, éstos recién logran alcanzar o superar su nivel de aspiración en el escenario 3.

Los atributos correspondientes a las posiciones 12, 16, 20 y 21 son aquellos que más demoran en llegar a su nivel de aspiración, coincidiendo con el bajo valor que poseen sus ponderaciones.

El escenario 5 posee 9 atributos que logran llegar a su nivel de aspiración a pesar de que tan solo se otorga una importancia del 20% al medioambiente respecto del Criterio Económico. Además, la mayoría de estos atributos poseen ponderaciones con valores relativamente altos.

8.2.4. Análisis de sensibilidad para los niveles de aspiración de las metas

Se requiere hacer un análisis de sensibilidad con respecto a los niveles de aspiración de las metas. Los atributos escogidos para hacer este análisis de sensibilidad son aquellos pertenecientes al criterio de Erosión de Suelos. No se hará un análisis de sensibilidad para los niveles de aspiración asociados a las metas que pertenecen al criterio de Contaminación de Recursos Hídricos y Exposición del Paisaje, ya que se le da suficiente flexibilidad al modelo para que refleje si se desea proteger con franjas más delgadas de lo debido tanto para caminos como para ríos. El análisis de sensibilidad que se llevó a cabo fue conversado con la persona experta en el área medioambiental considerando la información de hectáreas disponibles para la cosecha por cada tipo de subsector. A continuación se explica cada análisis de sensibilidad para cada subcriterio considerado:

a. Evitar cosechas en suelos muy erosionables.

En los tres niveles de susceptibilidad a la erosión o tipos de subsectores que están siendo protegidos contra la erosión se tienen distinta cantidad de hectáreas protegidas. Se quiere analizar los resultados que arroja el modelo cuando se protege mayor cantidad de hectáreas en cada nivel (EA) respecto al escenario promedio (Eprom), y en el caso contrario, es decir cuando se protege una menor cantidad de hectáreas (EB) respecto del escenario promedio. Esto se hizo variando el valor de los niveles de aspiración asociadas a las metas que corresponden a evitar cosechas en suelos muy erosionables. A continuación, en la Tabla 2T, se plantean los escenarios a usar:

Valores para niveles de aspiración (Ha)			
Subsectores	EB	Eprom	EA
Alto	200	175	150
Medio Alto	250	215	180
Medio Bajo	500	425	350

Tabla 27: Máxima cantidad de superficie (Ha) a ser cosechada para cada tipo de subsector considerado.

Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos se describen en la siguiente tabla (Tabla 28):

Resumen de valores para los atributos variando la protección asociada al subcriterio de EVITAR COSECHAS EN SUELOS MUY EROSIONABLES					
Criterio de Erosión de Suelos					
Características de atributos		Valores para cada escenario			
Subcriterios	Características	P. Baja	Base	P. Alta	
Evitar cosechas en suelos muy erosionables	Subsector	Superficie cosechada (Ha)			
	medio_bajo	500	462	463	
	medio_alto	176	167	176	
	alto	200	175	150	
Favorecer la cosecha en época de menor precipitación	IAF	Maquinaria	Diferencia de cosechas (Ha)		
	Alta	Skidder	0	0	0
	Media	Skidder	-12	-15	-13
	Baja	Skidder	-102	-102	-101
	Alta	Torres	0	0	0
	Media	Torres	-42	-40	-34
	Baja	Torres	-20	-20	-12
Favorecer el uso de torres por sobre el de skidders en suelos frágiles	Subsector	Maquinaria	Superficie cosechada (Ha)		
	medio_bajo	Skidder	350	350	350
Criterio de Contaminación de Recursos Hídricos					
Ríos con nivel de riesgo alto	Ancho de franja	Metros de río protegidos			
	delgada	0	0	0	
	media	0	0	0	
	ancha	937	937	937	
Ríos con nivel de riesgo medio	delgada	422	422	595	
	media	14.611	14.611	14.438	
Ríos con nivel de riesgo bajo	delgada	22.993	34.452	33.754	
Criterio de Exposición del Paisaje					
Caminos con nivel de exposición alto	Ancho de franja	Metros de camino protegidos			
	delgada	0	0	0	
	media	0	0	0	
	ancha	70	70	70	
Caminos con nivel de exposición medio	delgada	0	0	0	
	media	2.963	2.963	2.963	
Caminos con nivel de exposición bajo	delgada	4.844	4.844	4.844	
Criterio Económico					
VPN (MUS\$)		14.710	14.652	14.623	
Variación (%) respecto del escenario Base		0,4	0,0	-0,2	

Tabla 28: Valores de atributos variando la protección asociada al subcriterio de

EVITAR COSECHAS EN SUELOS MUY EROSIONABLES

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 28 se observa que las variaciones existentes en los atributos son pequeñas. En el escenario de mayor protección, se tiene que aumentan los valores de los atributos relacionados al subcriterio de FAVORECER LA COSECHA EN EPOCA DE MENOR PRECIPITACION respecto de los otros dos escenarios. Además, el escenario de protección alta disminuye su protección para los ríos de riesgo medio colocando una franja delgada en cierto porcentaje de éstos.

Por otro lado, en el escenario de protección baja, se posee una protección de ríos con nivel de riesgo bajo bastante menor respecto de los otros dos escenarios.

El escenario con costos menores, según la Tabla 29, es el de protección base seguido del escenario de protección alta. En cuanto a los beneficios, estos disminuyen a medida que la protección aumenta.

	Resultados económicos		
	P. Baja	Base	P. Alta
VPN	14.710	14.652	14.623
Variación (%)	0,39	0	-0,20
Beneficios	32.516	32.423	32.422
Variación (%)	0,29	0	0
Costos	17.806	17.771	17.799
Variación (%)	0,20	0	0,16

Tabla 29: Resultados económicos (MUS\$). Subcriterio de EVITAR

COSECHAS EN SUELOS MUY EROSIONABLES

Fuente: Elaboración propia

El volumen ofertado por cada producto, según la Tabla 30, se mantiene en los escenarios de protección base y protección alta, pero, para el escenario de protección baja, el volumen ofertado de madera pulpable aumenta.

Volumen de productos ofertados por la empresa			
Producto	P. Baja	Base	P. Alta
Exportable	211,9	211,9	211,9
Aserrable	405,5	405,5	405,5
Pulpable	358,8	354,8	354,7
Total	976,3	972,2	972,2
Variación (%)	0,42	0	0

Tabla 30: Volumen de productos ofertados (1000 m3). Subcriterio de EVITAR COSECHAS EN SUELOS MUY EROSIONABLES

Fuente: Elaboración propia

- b. Favorecer el uso de torres por sobre el de skidders en suelos frágiles.

Para el nivel de susceptibilidad a la erosión (tipo de subsector) medio bajo se tiene cierta cantidad de hectáreas las cuales no pueden ser cosechadas utilizando maquinaria Skidder. Aquí se desea analizar un escenario con un nivel alto de protección (EA) y un nivel bajo de protección (EB), ambas respecto del escenario promedio (Eprom). Este cambio de la protección se hace mediante la variación del nivel de aspiración de la meta asociada a este subcriterio. Los escenarios son los siguientes:

Valores para nivel de aspiración (Ha)			
Susceptibilidad a la erosión	EB	Eprom	EA
Media Baja	425	350	275

Tabla 31: Máxima cantidad de superficie (Ha) a ser cosechada con maquinaria skidder.

Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos se describen en la siguiente tabla:

Resumen de valores para los atributos variando la protección asociada al subcriterio de FAVORECER EL USO DE TORRES POR SOBRE EL DE SKIDDERS EN SUELOS FRAGILES					
Criterio de Erosión de Suelos					
Características de atributos			Valores para cada escenario		
Subcriterios	Características		P. Baja	Base	P. Alta
Evitar cosechas en suelos muy erosionables	Subsector		Superficie cosechada (Ha)		
	medio_bajo		463	462	455
	medio_alto		173	167	166
	alto		175	175	175
Favorecer la cosecha en época de menor precipitación	IAF	Maquinaria	Diferencia de cosechas (Ha)		
	Alta	Skidder	0	0	0
	Media	Skidder	-15	-15	-11
	Baja	Skidder	-102	-102	-102
	Alta	Torres	0	0	0
	Media	Torres	-30	-40	-41
	Baja	Torres	-19	-20	-19
Favorecer el uso de torres por sobre el de skidders en suelos frágiles	Subsector	Maquinaria	Superficie cosechada (Ha)		
	medio_bajo	Skidder	449	350	275
Criterio de Contaminación de Recursos Hídricos					
Ríos con nivel de riesgo alto	Ancho de franja		Metros de río protegidos		
	delgada		0	0	0
	media		0	0	0
	ancha		937	937	937
Ríos con nivel de riesgo medio	delgada		422	422	422
	media		14.611	14.611	14.611
Ríos con nivel de riesgo bajo	delgada		33.829	34.452	36.615
Criterio de Exposición del Paisaje					
Caminos con nivel de exposición alto	Ancho de franja		Metros de camino protegidos		
	delgada		0	0	0
	media		0	0	0
	ancha		70	70	70
Caminos con nivel de exposición medio	delgada		0	0	0
	media		2.963	2.963	2.963
Caminos con nivel de exposición bajo	delgada		4.844	4.844	4.844
Criterio Económico					
VPN (MUS\$)			14.666	14.652	14.618
Variación (%) respecto del escenario Base			0,1	0,0	-0,2

Tabla 32: Valores de atributos variando la protección asociada al subcriterio de FAVORECER EL

USO DE TORRES POR SOBRE EL DE SKIDDERS EN SUELOS FRÁGILES.

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 32 se observa que no hay mayor variación en los atributos. Para el atributo de metros ríos con nivel de riesgo bajo existe un leve aumento a medida que aumenta la protección en el subcriterio de EVITAR COSECHAS EN SUELOS MUY EROSIONABLES. Al mismo tiempo hay una leve caída del VPN de la empresa a medida que hay mayor protección.

	Resultados económicos		
	P. Baja	Base	P. Alta
VPN	14.665	14.652	14.618
Variación (%)	0,09	0	-0,24
Beneficios	32.423	32.423	32.423
Variación (%)	0	0	0
Costos	17.757	17.771	17.805
Variación (%)	-0,08	0	0,19

Tabla 33: Resultados económicos (MUS\$). Subcriterio de FAVORECER EL USO DE TORRES POR SOBRE EL DE SKIDDERS EN SUELOS FRAGILES.

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 33 se puede observar como aumentan los costos a medida que la protección aumenta. Es probable que este aumento en los costos no sólo se deba al aumento de protección para el subcriterio de FAVORECER EL USO DE TORRES POR SOBRE EL DE SKIDDERS EN SUELOS FRAGILES, sino que también está involucrado el aumento de protección de los ríos de riesgo bajo y la disminución de hectáreas cosechadas en subsectores de tipo Medio_alto. Además, como se detalla en la tabla 34 el volumen de venta para cada producto se mantiene constante en cada escenario, lo cual explica el porqué los beneficios de la empresa se mantienen constantes.

Volumen de productos ofertados por la empresa			
Producto	P. Baja	Base	P. Alta
Exportable	211,9	211,9	211,9
Aserrable	405,5	405,5	405,5
Pulpable	354,8	354,8	354,8
Total	972,2	972,2	972,2
Variación (%)	0,00	0,00	0,00

Tabla 34: Volumen de productos ofertados (1000 m3). Subcriterio de FAVORECER EL USO DE TORRES POR SOBRE EL DE SKIDDERS EN SUELOS FRAGILES.

Fuente: Elaboración propia

c. Favorecer la cosecha en época de menor precipitación

Se quiere analizar qué sucede si se aumenta o disminuye la cantidad de hectáreas cosechadas en invierno sujeta a la cosecha de verano. Para esto se tienen los siguientes escenarios, donde se varía la fracción de cosecha invierno-verano:

Fracciones de cosecha invierno-verano				
IAF	Maquinaria	EB	Eprom	EA
Alto	Skidder	0	0	0
	Torre	0,2	0,2	0,1
Medio	Skidder	No hay	0,5	0,25
	Torre	No hay	0,7	0,35
Bajo	Skidder	No hay	0,8	0,4
	Torre	No hay	No hay	No hay

Tabla 35: Fracciones de cosecha invierno verano a utilizar en cada escenario

Fuente: Elaboración propia

El primer escenario (EB) utiliza fracciones de cosecha de verano mayores que implica una protección baja, el segundo es un escenario promedio y el tercero (EA) utiliza fracciones de cosecha de verano menores que el escenario promedio de manera de lograr una alta protección.

Los resultados obtenidos se describen en la siguiente tabla:

Resumen de valores para los atributos variando la protección asociada al subcriterio de FAVORECER LA COSECHA EN EPOCA DE MENOR PRECIPITACION					
Criterio de Erosión de Suelos					
Características de atributos			Valores para cada escenario		
Subcriterios	Características		P. Baja	Base	P. Alta
Evitar cosechas en suelos muy erosionables	Subsector		Superficie cosechada (Ha)		
	medio_bajo		463	462	462
	medio_alto		176	167	170
	alto		175	175	175
Favorecer la cosecha en época de menor precipitación	IAF	Maquinaria	Diferencia de cosechas (Ha)		
	Alta	Skidder	0	0	0
	Media	Skidder	-2	-15	-22
	Baja	Skidder	-97	-102	-119
	Alta	Torres	0	0	0
	Media	Torres	-39	-40	-47

	Baja	Torres	-12	-20	-19
Favorecer el uso de torres por sobre el de skidders en suelos frágiles	Subsector	Maquinaria	Superficie cosechada (Ha)		
	medio_bajo	Skidder	350	350	350
Criterio de Contaminación de Recursos Hídricos					
	Ancho de franja		Metros de río protegidos		
Ríos con nivel de riesgo alto	delgada		0	0	0
	media		0	0	0
	ancha		937	937	937
Ríos con nivel de riesgo medio	delgada		422	422	422
	media		14.611	14.611	14.611
Ríos con nivel de riesgo bajo	delgada		35.057	34.452	34.051
Criterio de Exposición del Paisaje					
	Ancho de franja		Metros de camino protegidos		
Caminos con nivel de exposición alto	delgada		0	0	0
	media		0	0	0
	ancha		70	70	70
Caminos con nivel de exposición medio	delgada		0	0	0
	media		2.963	2.963	2.963
Caminos con nivel de exposición bajo	delgada		4.844	4.844	4.844
Criterio Económico					
VPN (MUS\$)			14.634	14.652	14.653
Variación (%) respecto del escenario Base			-0,1	0,0	0,0

Tabla 36: Valores de atributos variando la protección asociada al subcriterio de FAVORECER LA

COSECHA EN EPOCA DE MENOR PRECIPITACION.

Fuente: Elaboración propia

Según la Tabla 36 la variación existente en los distintos criterios es pequeña. A medida que se desea una mayor protección para el subcriterio en cuestión se tiene un aumento del VPN de la empresa y, por otro lado, la protección de los ríos con nivel de riesgo bajo disminuye.

	Resultados económicos		
	P. Baja	Base	P. Alta
VPN	14.634	14.652	14.653
Variación (%)	-0,13	0	0,01
Beneficios	32.444	32.423	32.423
Variación (%)	0,06	0	0
Costos	17.810	17.771	17.769
Variación (%)	0,22	0	-0,01

Tabla 37: Resultados económicos (MUS\$). Subcriterio de FAVORECER LA

COSECHA EN EPOCA DE MENOR PRECIPITACION

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 37 muestra que existe un aumento de los costos a medida que la protección relacionada al subcriterio de FAVORECER LA COSECHA EN EPOCA DE MENOR PRECIPITACION disminuye. Esto se debe en parte al aumento del volumen ofertado por la empresa a medida que la protección es menor (Tabla 38) y al aumento de la protección de ríos de riesgo bajo.

Volumen de productos ofertados por la empresa			
Producto	P. Baja	Base	P. Alta
Exportable	211,9	211,9	211,9
Aserrable	405,5	405,5	405,5
Pulpable	355,7	354,8	354,8
Total	973,1	972,2	972,2
Variación (%)	0,09	0	0

Tabla 38: Volumen de productos ofertados (1000 m3). Subcriterio de FAVORECER

LA COSECHA EN EPOCA DE MENOR PRECIPITACION

Fuente: Elaboración propia

9. CONCLUSIONES

Las conclusiones que surgen de este trabajo se detallan en los siguientes puntos:

- La herramienta desarrollada en este trabajo permite elaborar alternativas de protección del medioambiente equilibrando la importancia de cada componente medioambiental considerado con el criterio económico de la empresa. A distintos niveles de importancia que la empresa le otorgue al medioambiente, la herramienta entrega alternativas de protección medioambiental conjuntamente con su efecto sobre el VPN.
- A medida que se protege con mayor intensidad al medioambiente, el VPN de la empresa disminuye. La intensidad con la cual se ve afectado el VPN de la empresa al proteger al medioambiente está directamente relacionado con la debilidad medioambiental del terreno forestal en cuestión.
- Si bien la compra o venta de terrenos para fines forestales es una decisión a nivel estratégico, es importante destacar que, dado los efectos que produce la protección del ambiente en el VPN de las empresas, la valoración del terreno forestal para la compra o venta de éste variará según la fragilidad medioambiental que presente.
- Para el problema forestal descrito en este estudio, la herramienta matemática entrega una solución tal que, a pesar de que la empresa forestal le otorga al medioambiente una importancia del 33,3%, la protección de éste está a un 7,14% de la protección definida como adecuada, según el Índice de Protección del Medioambiente. Esta solución entregada por el modelo tiene la particularidad de ofrecer una protección cercana a la óptima sin incurrir en un alto costo, lo cual la hace bastante atractiva. No obstante, es importante mostrar a la empresa forestal un conjunto de soluciones obtenidas variando la importancia del medioambiente respecto del Criterio Económico. De esta manera la empresa conocerá el impacto

económico que posee cada nivel de protección medioambiental tomando una decisión más informada.

- La empresa forestal debe poseer un sistema de información que contenga información tal como la composición de los suelos disponibles para cosecha, densidad arbórea, la pluviometría presente en éstos, sus pendientes, su distribución geográfica referido a cauces de ríos, exposición a caminos públicos, y otros. Esta información permitirá efectuar los análisis y obtener los antecedentes requeridos por el modelo.

10. BIBLIOGRAFIA

- Andalaf R., 1998, "Evaluación Económica de la Implementación de medidas de protección Ambiental de Carácter Táctico en una Empresa Forestal", Memoria, Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de Chile.
- Bertomeu M., Romero C., 2002. "Forest management optimisation models habitat diversity: a goal programming approach". Journal of the Operational Research Society, vol. 53, pp. 1175-1184.
- Calkin D. E., Montgomery C. A., Schumaker N. H., Polasky S., Arthur J. L., Nalle D. J., 2002. "Developing a production possibility set of wildlife species persistence and timber harvest value". Canadian Journal of Forest Research, 32: 1329-1342.
- Caro F., Andalaft R., Silva X., Weintraub A., Sapunar P, Cabello M., 2003. "Evaluating the economic cost of environmental measures in plantation harvesting through the use of mathematical models". Production and Operation Management Society, Vol. 12, No. 3, pp. 290-306.
- Caro F., 1999, "Evaluación Económica Mediante Modelos Matemáticos de la Implementación de Medidas Medioambientales en las Decisiones Tácticas de una Empresa Forestal", Memoria, Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de Chile.
- Darek J. Nalle, Claire A. Montgomery, Jeffrey L. Arthur, Stephen Polasky, and Nathan H. Schumaker, 2004. "Modeling joint production of wildlife and timber". Journal of Environmental Economics and Management, 48: 997-1017.
- Diaz-Balteiro L., Romero C., 2004. "Sustainability of forest management plans: a discrete goal programming approach". Journal of Environmental Management, 71: 351-359.

- Diaz-Balteiro L., Romero C., 2002. "Forest management optimisation models when carbon captured is considered: a goal programming approach". *Forest Ecology and Management*, vol. 174, pp. 447-457.
- Diaz-Balteiro L., Romero C., 2001. "Combine Use of Goal Programming and the Analytic Hierarchy Process in Forest Management". in: *The Analytic Hierarchy Process (AHP) for Natural Resource and Environmental Decision Making*, Kluwer Academic Publishers, 6: 81-95.
- Díaz-Balteiro L., Romero C.. "Multiple Criteria Decision Making in forest planning: Recent Results and Current Challenges". Technical University of Madrid, Department of Forest Economics and Management, Spain.
- Gayoso J., Alarcón D., 1999. "Guía de conservación de suelos forestales". Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile.
- Gayoso J., 1997. "Producción Forestal y Conservación de Suelos". Instituto Manejo Forestal, Universidad Austral de Chile, VIII Silviotecna.
- González-Pachón J., Romero C., [200-]. "Inferring consensus weights from pairwise comparison matrices without suitable properties". Submitted to *Annals of Operation Research*.
- Hannan E. L.,1980. "Nondominance in Goal Programming". *Canadian Journal of Operational Research and Information Processing*, INFOR, Vol. 18, No. 4, pp. 300-309.
- Ignizio J. P., Romero C., 2003. "Goal Programming", in: *Encyclopedia of Information Systems* (Editor: Hossein Bidgoli), Academic Press, vol. 2, pp. 489-500.
- Instituto Forestal, 2004. Boletín estadístico 99, Exportaciones Forestales Chilenas.

- Linares P., Romero C., 2002. "Agregation of preferences in an environmental economics context: a goal programming approach". *Omega*, Vol. 30: 89-95.
- Ministerio de Agricultura, Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, 2005. "Agricultura Chilena 2014: Una Perspectiva de Mediano Plazo". Chile.
- Romero C., 2002a. "Programación por metas (goal programming): pasado, presente y futuro", in: *Toma de Decisiones con Criterios Múltiples*. Revista Electrónica de Comunicaciones y Trabajos de ASEPUMA, Tirant Lo Blanch, Valencia, pp. 75-89.
- Romero C., 2002b. "A general structure of achievement function for a goal programming model". *European Journal of Operational Research*, 153: 675-686.
- Romero C., 2000a. "Extended lexicographic goal programming: a unifying approach". *The International Journal of management Science*, Vol. 29, pp. 63-71.
- Romero C., 2000b. "Risk programming for agriculture resource allocation: A multidimensional risk approach". *Annals of Operation Research*, Vol. 94, pp. 57-68.
- Romero C., 1996. "Análisis de las decisiones multicriterio". Serie de Monografías de Ingeniería de Sistemas, ISDEFE, 1996, Madrid, 114 pp.
- Romero C., 1991. "Handbook of Critical Issues in Goal Programming". Primera edición, U.S.A., Pergamon Press.
- Saaty T. L., 1994. "How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process". *Interfaces* (pp. 19-43).
- Saaty T. L., 1997. "Ranking by Eigenvector Versus Other Methods in the Analytic Hierarchy Process". *Applied Mathematics Letters*, Vol. 11, No. 4, pp. 121-125.
- Saaty T. L., 2002. "Decision-making with the AHP: Why is the principal eigenvector necessary". *European Journal of Operational Research*, 145: 85-91.

- Silva X., 1998, "Incorporación de Políticas Medioambientales en la planeación de Cosecha Forestal a Nivel Táctico", Memoria, Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de Chile.
- Tamiz M., Jones D. F., 1996. "Goal Programming and Pareto Efficiency". Journal of Information and Optimization Sciences, Vol. 17, No. 2, pp. 291-307.
- Weintraub A., Wainer A., Magendzo A., Guignard M., Andalaft P., Andalaft N., 2002. "A problem of forest harvesting and road building solved through model strengthening and lagrangean relaxation". Journal of Operation Research, vol. 51, No. 4, pp. 613-628.
- Weintraub A., Jones G., Magendzo A., Meacham M., Kirby M., 1994. "A Heuristic System to Solve Mixed Integer Forest Planning Models". Operations Research, Vol. 42, pp. 1010-1024.
- Weintraub A., Navon D., 1976. "A Forest Management Planning Model Integrating Silvicultural and Transportation Activities". Management Sciences, Vol. 22, No. 12, pp. 1299-1309.
- Weintraub A., Romero C.. "Operational Research Models and the Management of Agricultural and Forestry Resources: A Review and Comaparison". Interfaces Research Impact: 0.447.

11. ANEXOS

Anexo 1: Ponderaciones de las matrices de comparación (pesos no agregados).

Cálculo de pesos para cada matriz de comparación		
Comparación	Criterios y atributos	Pesos
1	CE	0,666
	MA	0,333
2	CES	0,739
	CRH	0,166
	CCV	0,0938
3	ECSE	0,7418
	FCMP	0,1829
	FTSS	0,0752
4	ECA	0,7927
	ECMA	0,1312
	ECMB	0,076
5	FAT	0,2698
	FMT	0,0665
	FBT	0,0361
	FAS	0,4392
	FMS	0,1546
	FBS	0,0335
6	PRRA	0,7395
	PRRM	0,1665
	PRRB	0,0938
7	PRAA	0,7927
	PRAM	0,1312
	PRAD	0,076
8	PRMM	0,8333
	PRMD	0,1666
9	PCRA	0,7395
	PCRM	0,1665
	PCRB	0,0938
10	PCAA	0,7395
	PCAM	0,1665
	PCAD	0,0938
11	PCMM	0,75
	PCMD	0,25

Anexo 2: Matriz de pagos.

Matriz de pagos												
Subcriterios	Características de atributos		A1	A2	A3	B1	B2	B3	B4	B5	B6	
Evitar cosechas en suelos muy erosionables	Subsector medio bajo		A1	0,0	319,5	570,8	-4,9	-21,1	-99,2	-8,1	-34,9	-133,0
	Subsector medio alto		A2	625,6	0,0	568,4	-4,7	-73,6	-218,0	-12,8	-97,3	-35,1
	Subsector alto		A3	498,1	264,7	0,0	0,0	-67,3	-108,4	0,0	-34,8	-142,9
Favorecer la cosecha en época de menor precipitación	IAF Alta	M. Skidder	B1	622,8	299,4	651,6	0,0	-78,8	-101,0	-11,2	-58,4	-130,6
	IAF Media	M. Skidder	B2	556,8	299,3	634,4	-7,1	0,0	-183,0	-16,5	-55,6	-103,6
	IAF Baja	M. Skidder	B3	559,4	299,6	579,6	-2,1	-9,5	0,0	-14,5	-97,3	-133,3
	IAF Alta	M. Torres	B4	615,2	274,6	607,8	-3,2	-81,1	-81,0	0,0	-32,8	-53,5
	IAF Media	M. Torres	B5	592,9	318,1	641,4	-8,1	-25,9	-159,8	-13,7	0,0	-114,2
	IAF Baja	M. Torres	B6	622,4	296,1	645,5	-7,1	-30,5	-316,7	-15,0	-183,5	0,0
Favorecer el uso de torres por sobre el de skidders en suelos frágiles	medio_bajo	M. Skidder	Z1	620,7	300,0	607,3	-2,9	-5,3	-74,7	-18,9	-63,3	-180,1
Ríos con nivel de riesgo alto	Franja delgada		R1.1	612,3	283,5	611,2	-8,1	-19,1	-189,1	-13,7	-73,2	-71,6
	Franja media		R1.2	625,4	297,8	627,2	-2,9	-15,9	-133,3	-18,9	-97,3	-62,1
	Franja ancha		R1.3	622,3	270,2	592,0	0,0	-31,9	-78,5	-21,8	-97,3	-103,1
Ríos con nivel de riesgo medio	Franja delgada		R2.1	607,8	271,9	550,2	-3,5	-55,1	-78,5	-19,6	-26,0	-95,4
	Franja media		R2.2	540,5	301,0	528,0	-8,0	-30,8	-60,6	-11,4	-66,0	-108,0
Ríos con nivel de riesgo bajo	Franja delgada		R3.1	359,6	288,5	488,0	-1,6	-39,0	-33,9	-12,8	-25,3	-163,7
Caminos con nivel de exposición alto	Franja delgada		C1.1	625,5	308,7	617,5	-6,0	-106,1	-149,6	-20,6	-33,9	-54,0
	Franja media		C1.2	600,8	275,5	607,1	-3,8	-31,9	-119,1	-21,7	-73,2	-109,0
	Franja ancha		C1.3	600,7	256,8	576,5	-5,9	-20,3	-71,9	-15,9	-73,2	-189,3
Caminos con nivel de exposición medio	Franja delgada		C2.1	615,0	291,3	592,2	-1,1	-103,0	-100,1	-21,7	-28,1	-117,8
	Franja media		C2.2	624,2	271,9	601,8	-5,3	-45,1	-111,0	-17,8	-34,9	-58,6
Caminos con nivel de exposición bajo	Franja delgada		C3.1	625,3	301,4	597,3	-7,1	-93,0	-163,0	-12,9	-34,9	-127,2
Atributo económico (VPN)			D	518,3	172,3	295,7	0,0	-111,4	-183,0	0,0	-66,1	-25,7
Peor valor de cada atributo				625,6	319,5	651,6	-8,1	-111,4	-316,7	-21,8	-183,5	-189,3

	Z1	R1.1	R1.2	R1.3	R2.1	R2.2	R3.1	C1.1	C1.2	C1.3	C2.1	C2.2	C3.1	D
A1	0,0	191	0	0	603	0	531	0	0	0	0	0	0	-4.207.025
A2	451,0	156	0	0	188	0	71	0	0	0	0	0	0	-3.238.396
A3	202,1	227	0	0	5.129	9.904	0	0	0	0	0	0	0	-1.718.476
B1	243,4	120	0	0	370	0	838	0	0	0	0	0	280	-6.811.038
B2	92,7	71	0	0	201	0	293	0	0	0	0	0	482	-4.996.120
B3	116,8	35	0	0	201	0	456	0	0	0	0	0	733	-6.577.711
B4	457,0	7	0	0	344	0	140	0	0	0	0	0	0	-5.994.587
B5	237,1	35	0	0	171	0	353	0	0	0	0	0	0	-7.296.423
B6	279,8	0	0	0	60	0	356	0	0	0	0	0	0	-6.400.818
Z1	0,0	35	0	0	261	0	507	0	0	0	0	0	246	-5.139.988
R1.1	184,9	937	0	0	443	0	662	0	0	0	0	0	0	-5.241.832
R1.2	168,7	0	937	0	137	0	558	0	0	0	0	0	236	-6.595.486
R1.3	311,9	0	0	937	81	0	537	0	0	0	0	0	0	-6.869.631
R2.1	321,9	35	0	0	15.033	0	777	70	0	0	0	0	236	-4.131.749
R2.2	179,3	0	0	0	0	15.033	399	0	0	0	0	0	0	-3.689.950
R3.1	110,7	191	0	0	117	0	75.950	0	0	0	0	0	246	-3.716.199
C1.1	412,8	35	0	0	77	0	831	70	0	0	0	0	0	-6.003.912
C1.2	243,6	120	0	0	85	0	597	0	70	0	0	0	1.177	-5.633.619
C1.3	258,5	36	0	0	17	0	515	0	0	70	0	0	948	-5.903.384
C2.1	280,0	155	0	0	77	0	595	70	0	0	2.963	0	295	-4.920.291
C2.2	294,0	156	0	0	239	0	590	0	0	0	0	2.963	0	-5.004.176
C3.1	460,9	0	0	0	111	0	553	0	0	0	0	0	4.844	-6.117.166
D	518,3	71	0	0	569	0	0	0	0	70	0	0	246	13.659.697
518,3 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -7.296.423														

Anexo 3: Valores de los atributos para cada escenario considerado.

Valores de atributos									
Criterio de Erosión de Suelos									
Características de atributos			Valores para cada escenario						
Subcriterios	Características		1 (10.0)	2 (8.2)	3 (6.4)	4 (4.6)	B	5 (2.8)	6 (0.10)
Evitar cosechas en suelos muy erosionables	Subsector		Superficie cosechada (Ha)						
	medio_bajo		418,3	425,0	425,0	451,2	461,9	510,3	518,3
	medio_alto		200,0	164,8	169,1	167,3	166,8	173,7	171,8
	alto		175,0	175,0	175,0	175,0	175,0	175,0	292,8
Favorecer la cosecha en época de menor precipitación	IAF	Maquinaria	Diferencia de superficie cosechada (Ha)						
	Alta	Skidder	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Media	Skidder	0,0	0,0	0,0	-5,7	-14,9	-32,3	-52,9
	Baja	Skidder	0,0	-52,2	-99,4	-101,0	-102,1	-103,6	-183,0
	Alta	Torres	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Media	Torres	0,0	-1,4	-6,8	-43,1	-40,3	-29,1	-53,3
	Baja	Torres	0,0	-4,1	-10,4	-11,8	-20,4	-19,3	-19,4
Favorecer el uso de torres por sobre el de skidders en suelos frágiles	Subsector	Maquinaria	Superficie cosechada (Ha)						
	medio_bajo	Skidder	249,4	346,9	347,9	347,0	350,0	350,0	518,3
Criterio de Contaminación de Recursos Hídricos									
Ríos con nivel de riesgo alto	Ancho de franja		Metros de río protegidos						
	delgada		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	461,0
	media		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	ancha		937,0	937,0	937,0	937,0	937,0	937,0	0,0
Ríos con nivel de riesgo medio	delgada		0,0	0,0	0,0	0,0	422,0	1026,0	4707,0
	media		15033,0	15033,0	15033,0	15033,0	14611,0	14006,0	0,0
Ríos con nivel de riesgo bajo	delgada		75.950	75.456	53.393	38.584	34.452	13.967	14.047
Criterio de Exposición del Paisaje									
Caminos con nivel de exposición alto	Ancho de franja		Metros de camino protegidos						
	delgada		0	0	0	0	0	0	0
	media		0	0	0	0	0	0	0
Caminos con nivel de exposición medio	ancha		70	70	70	70	70	70	70
	delgada		0	0	0	0	0	0	76
Caminos con nivel de exposición bajo	media		2.963	2.963	2.963	2.963	2.963	2.963	0
	delgada		4.844	4.844	4.844	4.844	4.844	4.844	897
Criterio Económico									
VPN (MUS\$)			13.221	14.141	14.490	14.610	14.652	14.738	14.947

Anexo 4: Valores de las variables de desviación para cada escenario.

Valor de las variables de desviación negativas (Valores multiplicados por 100)									
Criterio de Erosión de Suelos									
Características de atributos			Valores para cada escenario						
Subcriterios	Características		1 (10.0)	2 (8.2)	3 (6.4)	4 (4.6)	B	5 (2.8)	6 (0.10)
Evitar cosechas en suelos muy erosionables	Subsector								
	medio_bajo		0,0	0,0	0,0	4,2	5,9	13,6	14,9
	medio_alto		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	alto		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	18,1
Favorecer la cosecha en época de menor precipitación	IAF	Maquinaria							
	Alta	Skidder	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Media	Skidder	0,0	0,0	0,0	5,1	13,4	29,0	47,5
	Baja	Skidder	0,0	16,5	31,4	31,9	32,3	32,7	57,8
	Alta	Torres	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Media	Torres	0,0	0,7	3,7	23,5	22,0	15,9	29,1
	Baja	Torres	0,0	2,2	5,5	6,2	10,8	10,2	10,2
Favorecer el uso de torres por sobre el de skidders en suelos frágiles	Subsector	Maquinaria							
	medio_bajo	Skidder	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	32,5
Criterio de Contaminación de Recursos Hídricos									
Ríos con nivel de riesgo alto	Ancho de franja								
	delgada		100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	50,8
	media		100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
	ancha		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0
Ríos con nivel de riesgo medio	delgada		100,0	100,0	100,0	100,0	97,2	93,2	68,7
	media		0,0	0,0	0,0	0,0	2,8	6,8	100,0
Ríos con nivel de riesgo bajo	delgada		0,0	0,6	29,7	49,2	54,6	81,6	81,5
Criterio de Exposición del Paisaje									
Caminos con nivel de exposición alto	Ancho de franja								
	delgada		100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
	media		100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
	ancha		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Caminos con nivel de exposición medio	delgada		100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	97,4
	media		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0
Caminos con nivel de exposición bajo	delgada		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	81,5
Criterio Económico									
VPN			7,6	3,6	2,1	1,5	1,3	0,9	0,0

Valor de las variables de desviación positivas (Valores multiplicados por 100)									
Criterio de erosión de suelos									
Características de atributos			Valores para cada escenario						
Subcriterios	Características		1 (10.0)	2 (8.2)	3 (6.4)	4 (4.6)	B	5 (2.8)	6 (0.10)
Evitar cosechas en suelos muy erosionables	Subsector								
		medio_bajo	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
		medio_alto	4,7	15,7	14,4	14,9	15,1	13,2	13,5
		alto	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Favorecer el uso de torres por sobre el de skidders en suelos frágiles	Subsector	Maquinaria							
	medio_bajo	Skidder	19,4	0,6	0,4	0,6	0,0	0,0	0,0

Anexo 5: Matriz de pagos utilizada en análisis de sensibilidad para subcriterio de FAVORECER LA COSECHA EN EPOCA DE MENOR PRECIPITACION considerando protección baja.

Matriz de pagos												
Subcriterios	Características de atributos		A1	A2	A3	B1	B2	B3	B4	B5	B6	
Evitar cosechas en suelos muy erosionables	Subsector medio bajo		A1	0,0	319,5	570,8	-4,9	-21,1	-99,2	-8,1	-34,9	-133,0
	Subsector medio alto		A2	625,5	0,0	572,0	-5,9	-45,1	-63,3	-14,4	-52,2	-78,5
	Subsector alto		A3	502,8	261,2	0,0	0,0	-44,5	-63,0	-0,1	-35,3	-95,0
Favorecer la cosecha en época de menor precipitación	IAF Alta	M. Skidder	B1	622,8	299,4	651,6	0,0	-78,8	-101,0	-11,2	-58,4	-130,6
	IAF Media	M. Skidder	B2	571,8	302,4	613,5	-3,1	0,0	-50,6	-18,7	-61,2	-87,1
	IAF Baja	M. Skidder	B3	575,3	265,6	537,3	-7,1	-45,1	0,0	-14,7	-140,7	-92,4
	IAF Alta	M. Torres	B4	615,2	274,6	607,8	-3,2	-81,1	-79,0	0,0	-32,8	-53,5
	IAF Media	M. Torres	B5	497,7	319,8	546,7	-3,1	-33,1	-206,9	-15,2	0,0	-54,1
	IAF Baja	M. Torres	B6	622,4	296,1	645,5	-7,1	-25,5	-315,9	-15,0	-173,1	0,0
Favorecer el uso de torres por sobre el de skidders en suelos frágiles	medio_bajo	M. Skidder	Z1	620,7	300,0	607,3	-2,9	-5,3	-74,7	-18,9	-59,6	-180,1
Ríos con nivel de riesgo alto	Franja delgada		R1.1	612,3	283,5	611,2	-8,1	-19,1	-189,1	-13,7	-73,2	-71,6
	Franja media		R1.2	625,4	297,8	627,2	-2,9	-15,9	-132,6	-18,9	-97,3	-62,1
	Franja ancha		R1.3	622,3	270,2	592,0	0,0	-31,9	-78,5	-21,8	-97,3	-103,1
Ríos con nivel de riesgo medio	Franja delgada		R2.1	607,8	271,9	550,2	-3,5	-55,1	-78,5	-19,6	-26,0	-95,4
	Franja media		R2.2	540,5	301,0	528,0	-8,0	-29,6	-60,6	-11,4	-64,7	-108,0
Ríos con nivel de riesgo bajo	Franja delgada		R3.1	359,6	288,5	488,0	-1,6	-39,0	-33,9	-12,8	-21,8	-163,7
Caminos con nivel de exposición alto	Franja delgada		C1.1	625,5	308,7	617,5	-6,0	-101,5	-144,6	-20,6	-33,9	-54,0
	Franja media		C1.2	600,8	275,5	607,1	-3,8	-31,9	-103,1	-21,7	-73,2	-109,0
	Franja ancha		C1.3	600,7	256,8	576,5	-5,9	-20,3	-71,4	-15,9	-73,2	-189,3
Caminos con nivel de exposición medio	Franja delgada		C2.1	615,0	291,3	592,2	-1,1	-103,0	-99,5	-21,7	-28,1	-117,8
	Franja media		C2.2	624,2	271,9	601,8	-5,3	-45,1	-111,0	-17,8	-34,9	-58,6
Caminos con nivel de exposición bajo	Franja delgada		C3.1	625,3	301,4	597,3	-7,1	-93,0	-163,0	-12,9	-34,9	-127,2
Atributo económico (VPN)			D	518,3	172,3	295,7	0,0	-73,6	-183,0	0,0	-59,3	-25,7
Peor valor de cada atributo				625,5	319,8	651,6	-8,1	-103,0	-315,9	-21,8	-173,1	-189,3

	Z1	R1.1	R1.2	R1.3	R2.1	R2.2	R3.1	C1.1	C1.2	C1.3	C2.1	C2.2	C3.1	D
A1	0,0	191	0	0	603	0	531	0	0	0	0	0	0	-4.207.025
A2	256,4	156	0	0	120	0	88	0	0	0	0	0	0	-4.159.525
A3	413,3	0	686	251	4.440	10.593	40	0	0	70	0	0	0	-2.657.534
B1	243,4	120	0	0	370	0	838	0	0	0	0	0	280	-6.811.038
B2	321,8	71	0	0	106	0	361	70	0	0	0	0	210	-5.649.882
B3	338,0	120	0	0	243	0	230	0	0	0	0	0	246	-5.544.318
B4	457,0	7	0	0	344	0	140	0	0	0	0	0	0	-5.994.587
B5	179,1	120	0	0	128	0	308	0	0	0	0	0	0	-4.996.445
B6	279,8	0	0	0	60	0	356	0	0	0	0	0	0	-6.400.818
Z1	0,0	35	0	0	261	0	507	0	0	0	0	0	246	-5.139.988
R1.1	184,9	937	0	0	443	0	662	0	0	0	0	0	0	-5.241.832
R1.2	168,7	0	937	0	137	0	558	0	0	0	0	0	236	-6.595.486
R1.3	311,9	0	0	937	81	0	537	0	0	0	0	0	0	-6.869.631
R2.1	321,9	35	0	0	15.033	0	777	70	0	0	0	0	236	-4.131.749
R2.2	179,3	0	0	0	0	15.033	399	0	0	0	0	0	0	-3.689.950
R3.1	110,7	191	0	0	117	0	75.950	0	0	0	0	0	246	-3.716.199
C1.1	412,8	35	0	0	77	0	831	70	0	0	0	0	0	-6.003.912
C1.2	243,6	120	0	0	85	0	597	0	70	0	0	0	1.177	-5.633.619
C1.3	258,5	36	0	0	17	0	515	0	0	70	0	0	948	-5.903.384
C2.1	280,0	155	0	0	77	0	595	70	0	0	2.963	0	295	-4.920.291
C2.2	294,0	156	0	0	239	0	590	0	0	0	2.963	0	0	-5.004.176
C3.1	460,9	0	0	0	111	0	553	0	0	0	0	0	4.844	-6.117.166
D	518,3	71	0	0	569	0	0	0	0	70	0	0	246	13.659.697
	518,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-6.869.631

Anexo 6: Matriz de pagos utilizada en análisis de sensibilidad para subcriterio de FAVORECER LA COSECHA EN EPOCA DE MENOR PRECIPITACION considerando protección alta.

Matriz de pagos												
Subcriterios	Características de atributos		A1	A2	A3	B1	B2	B3	B4	B5	B6	
Evitar cosechas en suelos muy erosionables	Subsector medio bajo		A1	0,0	319,5	570,8	-4,9	-21,1	-99,2	-8,7	-34,9	-133,0
	Subsector medio alto		A2	625,5	0,0	572,0	-5,9	-45,1	-69,2	-14,4	-52,2	-78,5
	Subsector alto		A3	502,8	261,2	0,0	0,0	-63,8	-63,0	-0,1	-35,3	-95,0
Favorecer la cosecha en época de menor precipitación	IAF Alta	M. Skidder	B1	622,8	299,4	651,6	0,0	-78,8	-101,0	-11,2	-58,7	-130,6
	IAF Media	M. Skidder	B2	512,4	310,0	599,5	-6,0	0,0	-165,0	-15,8	-86,1	-101,8
	IAF Baja	M. Skidder	B3	557,6	288,7	599,5	-0,1	-108,8	0,0	-15,0	-48,4	-127,1
	IAF Alta	M. Torres	B4	620,1	305,1	642,0	0,0	-78,8	-110,1	0,0	-43,9	-45,8
	IAF Media	M. Torres	B5	605,5	318,5	628,8	-3,5	-38,0	-30,5	-21,7	0,0	-112,0
	IAF Baja	M. Torres	B6	622,4	296,1	645,5	-7,1	-33,0	-318,1	-15,0	-195,5	0,0
Favorecer el uso de torres por sobre el de skidders en suelos frágiles	medio_bajo	M. Skidder	Z1	620,7	300,0	607,3	-2,9	-5,3	-74,7	-18,9	-102,4	-180,1
Ríos con nivel de riesgo alto	Franja delgada		R1.1	612,3	283,5	611,2	-8,1	-19,1	-189,1	-13,7	-73,2	-71,6
	Franja media		R1.2	625,4	297,8	627,2	-2,9	-15,9	-134,6	-18,9	-97,3	-62,1
	Franja ancha		R1.3	622,3	270,2	592,0	0,0	-31,9	-78,5	-21,8	-97,3	-103,1
Ríos con nivel de riesgo medio	Franja delgada		R2.1	607,8	271,9	550,2	-3,5	-55,1	-78,5	-19,7	-31,1	-95,4
	Franja media		R2.2	540,5	301,0	528,0	-8,0	-31,3	-65,8	-11,4	-67,5	-108,0
Ríos con nivel de riesgo bajo	Franja delgada		R3.1	359,6	288,5	488,0	-1,6	-39,0	-34,1	-13,5	-29,5	-163,7
Caminos con nivel de exposición alto	Franja delgada		C1.1	625,5	308,7	617,5	-6,0	-108,4	-167,6	-20,6	-33,9	-54,0
	Franja media		C1.2	600,8	275,5	607,1	-3,8	-31,9	-151,0	-21,7	-73,2	-109,0
	Franja ancha		C1.3	600,7	256,8	576,5	-5,9	-20,3	-77,9	-15,9	-102,7	-189,3
Caminos con nivel de exposición medio	Franja delgada		C2.1	615,0	291,3	592,2	-1,1	-103,0	-101,4	-21,7	-28,1	-117,8
	Franja media		C2.2	624,2	271,9	601,8	-5,3	-45,1	-111,0	-17,8	-34,9	-58,6
Caminos con nivel de exposición bajo	Franja delgada		C3.1	625,3	301,4	597,3	-7,1	-93,0	-163,0	-13,2	-34,9	-127,2
Atributo económico (VPN)			D	518,3	172,3	295,7	0,0	-130,3	-183,0	0,0	-74,0	-25,7
Peor valor de cada atributo				625,5	319,5	651,6	-8,1	-130,3	-318,1	-21,8	-195,5	-189,3

	Z1	R1.1	R1.2	R1.3	R2.1	R2.2	R3.1	C1.1	C1.2	C1.3	C2.1	C2.2	C3.1	D
A1	0,0	191	0	0	603	0	531	0	0	0	0	0	0	-4.207.025
A2	256,4	156	0	0	120	0	88	0	0	0	0	0	0	-4.159.525
A3	413,3	0	686	251	4.440	10.593	40	0	0	70	0	0	0	-2.657.534
B1	243,4	120	0	0	370	0	838	0	0	0	0	0	280	-6.811.038
B2	40,0	36	0	0	141	0	351	0	0	0	0	0	0	-5.174.231
B3	324,2	156	0	0	150	0	539	0	0	0	0	0	0	-5.202.065
B4	301,5	35	0	0	90	0	680	0	0	0	0	0	0	-6.614.249
B5	308,3	71	0	0	120	0	334	0	0	0	0	0	295	-6.712.940
B6	279,8	0	0	0	60	0	356	0	0	0	0	0	0	-6.400.818
Z1	0,0	35	0	0	261	0	507	0	0	0	0	0	246	-5.139.988
R1.1	184,9	937	0	0	443	0	662	0	0	0	0	0	0	-5.241.832
R1.2	168,7	0	937	0	137	0	558	0	0	0	0	0	236	-6.595.486
R1.3	311,9	0	0	937	81	0	537	0	0	0	0	0	0	-6.869.631
R2.1	321,9	35	0	0	15.033	0	777	70	0	0	0	0	236	-4.131.749
R2.2	179,3	0	0	0	0	15.033	399	0	0	0	0	0	0	-3.689.950
R3.1	110,7	191	0	0	117	0	75.950	0	0	0	0	0	246	-3.716.199
C1.1	412,8	35	0	0	77	0	831	70	0	0	0	0	0	-6.003.912
C1.2	243,6	120	0	0	85	0	597	0	70	0	0	0	1.177	-5.633.619
C1.3	258,5	36	0	0	17	0	515	0	0	70	0	0	948	-5.903.384
C2.1	280,0	155	0	0	77	0	595	70	0	0	2.963	0	295	-4.920.291
C2.2	294,0	156	0	0	239	0	590	0	0	0	0	2.963	0	-5.004.176
C3.1	460,9	0	0	0	111	0	553	0	0	0	0	0	4.844	-6.117.166
D	518,3	71	0	0	569	0	0	0	0	70	0	0	246	13.659.697
	518,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-6.869.631