

ARTICULOS

Las consideraciones ambientales en la planificación de cosecha forestal: un análisis usando programación entera*

Environmental considerations in harvesting planning: An analysis using integer programming

JUAN TRONCOSO T.¹, CRISTINA PALMA I.¹, XIMENA IBACACHE J.²

¹Depto. de Ciencias Forestales, Pontificia Universidad Católica de Chile, Casilla 305, Correo 22, Santiago, Chile. E-mail: jtroncot@puc.cl ² Escuela de Ingeniería Forestal. Universidad Mayor.

SUMMARY

The environmental impacts of the harvesting process, especially those related to the skid trails, log landings and roads, make it necessary to consider environmental factors when planning the operations. For this reason, different optimization models were developed to evaluate how results differ in terms of the number and size of the landings when cost and environmental constraints are considered. One of the first results obtained was a decrease of the total number of landings when the cost associated to ground compaction and the loss of site productivity were considered. Nevertheless, environmental care has an explicit associated cost, which must be considered as part of the total cost of harvesting.

Key words: Optimization models, harvesting planning, environmental impact.

RESUMEN

Los impactos ambientales que se producen durante las faenas de cosecha, especialmente relacionados con las huellas de madereo, canchas y caminos, hacen necesario considerar el factor ambiental durante el proceso de planificación de dichas faenas. Por ello, se desarrollaron distintos modelos de optimización para evaluar cómo difieren los resultados en términos de número y dimensión de canchas, cuando se consideran tanto costos como restricciones ambientales. Uno de los principales resultados obtenidos fue la disminución del número total de canchas a construir por rodal, cuando se consideró el costo asociado a la compactación del suelo y a la pérdida de productividad de sitio. Sin embargo, como consecuencia de lo anterior, se produjo un aumento en los costos totales de cosecha, indicando con ello que el cuidado ambiental tiene un costo explícito asociado.

Palabras claves: Modelos de optimización, planificación de la cosecha, impacto ambiental.

INTRODUCCION

Actualmente, la mayoría de las faenas de cosecha forestal realizadas en Chile utilizan el madereo a canchas con el objeto de centralizar las labores de trozado y ordenamiento de la madera y facilitar su posterior carguío en los camiones. Para tal efecto, se hace necesario calcular el número de canchas a construir en un rodal determinado, de modo

que su costo de construcción más el costo de madereo sea mínimo.

Aún más, si se considera que una vez terminada la cosecha forestal las canchas de madereo son reforestadas para la siguiente rotación, y que producto del alto nivel de compactación provocado por la concentración de maquinaria se requiere una mayor inversión de tiempo y recursos en la preparación del sitio, resulta importante contar con una

* Proyecto financiado por la Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal. Pontificia Universidad Católica de Chile.

herramienta que permita al planificador conocer la cantidad y el dimensionamiento óptimos de canchas a construir, incluyendo como criterio los factores de impacto ambiental.

De esta manera, y como consecuencia de una mayor presión ambiental sobre las actividades forestales, se hace necesario cuantificar el impacto que generan tanto la construcción como el uso de las canchas para realizar lo que se denomina una planificación integral de cosecha, la cual, según Troncoso (1998), es difícil de aplicarse en la práctica puesto que la mayoría de la empresas forestales buscan optimizar las faenas propias de la cosecha, considerando únicamente los costos directos de dichas actividades.

Por lo anterior, y en la búsqueda de nuevas herramientas que permitan realizar un plan integral de cosecha, en el presente estudio se evalúan distintos modelos de programación entera del tipo binaria, que permiten, para un conjunto de rodales disponibles, seleccionar aquellos a cosechar, los sistemas de cosecha a utilizar, y la cantidad y dimensión de las canchas de madereo a construir, con tal de maximizar los ingresos netos generados entre el ingreso por venta y el costo de cosecha de la madera obtenida. Dichos modelos fueron formulados con distintos tipos de restricciones, incluyendo restricciones de impacto ambiental y de distancias promedio de madereo, y considerando los principales costos ambientales asociados a la construcción de canchas.

PLANIFICACION DE CANCHAS DE MADEREO

Las complejas decisiones involucradas en la planificación de la cosecha, que incluyen aquellas relacionadas con la construcción de canchas de madereo, el diseño de la red de caminos y la selección de los equipos de cosecha, hacen aconsejable la incorporación de herramientas de tipo cuantitativo que entreguen estándares para dichas variables, con el objeto de facilitar el trabajo del planificador durante el proceso de toma de decisiones (Troncoso 1996).

Una adecuada planificación de las canchas implica que éstas deberán estar bien ubicadas para balancear las actividades de madereo y carguío, especialmente si existen varios skidders made-reando y se produce congestión en ellas. Para solucionar este problema, cada uno de los skidders

deberá operar a distintas distancias de madereo para evitar que todos lleguen al mismo tiempo a la cancha. Con ello, se pueden evitar los "cuellos de botella", sobre todo si el carguío se realiza simultáneamente con el madereo (Conway 1982).

Con respecto a la cantidad de canchas, Troncoso (1996) señala que este ítem se analiza desde el punto de vista del número de canchas y la distancia promedio de madereo (DPM) generado, de tal manera que a mayor cantidad de canchas construidas, menor DPM y viceversa. Así, el análisis se hace en base a la comparación del costo de construcción de canchas y el costo de madereo, eligiéndose la combinación que otorga el mínimo valor.

En este contexto, es importante resaltar que en el presente estudio sólo se compara el costo de madereo con el de construcción de canchas, sin incluir el costo de caminos, dado que actualmente en Chile el madereo a caminos casi no se practica (sólo para la cosecha con Harvester y Forwarder); y los caminos que se construyen sólo cumplen la función de conectar todas las canchas y con ello permitir el transporte de la madera hacia los destinos, por lo que su costo no se agrega al costo de cosecha, pero sí probablemente al costo total de producción, es decir, cosecha, caminos y transporte.

IMPACTO AMBIENTAL DE LAS CANCHAS DE MADEREO Y FAENAS RELACIONADAS

La planificación integral de una cosecha forestal debe considerar que la construcción de caminos y canchas unida a la formación de vías de saca tienen un impacto negativo sobre el suelo y, por consiguiente, en la utilización sustentable del recurso forestal. Al respecto, Gayoso *et al.* (1991) señalan la magnitud de la superficie afectada por este tipo de alteraciones, estableciendo una mayor alteración para el caso del madereo con skidder al afectar a más de un 50% de la superficie total de un rodal en cosecha. De esta forma, la magnitud de la superficie alterada variará según el método de madereo, el tipo de terreno y suelo y la época del año en que se cosecha (Gayoso *et al.* 1991).

En relación a la productividad de sitio, Gayoso *et al.* (1991) señalan que existe una pérdida de crecimiento en sectores de huellas de madereo para todas las condiciones de suelo y edad en relación

con terrenos sin alteraciones. Además, en caminos y canchas altamente compactados se pudo comprobar malformación y ausencia de prendimiento de las plantas. Lo anterior establece que la recuperación total de los árboles ubicados sobre terrenos alterados, ya sea por canchas o por huellas de madereo, no es esperable a la edad de rotación, lo que se reflejará en un menor volumen por árbol, menor valor por producto y menor ingreso por unidad de superficie.

Para el caso de las canchas de madereo, no existen estudios que cuantifiquen la pérdida de volumen, diámetro o altura de los árboles plantados en dicha superficie. Sin embargo, Gayoso *et al.* (1991) establecieron aumentos de hasta 1,5 veces en la densidad aparente bajo la superficie de la cancha en relación a un sitio no compactado. Este factor permitiría indicar que los efectos sobre los árboles plantados en las canchas serían similares o mayores a los de aquellos plantados en las huellas de madereo, pudiendo esperarse que los árboles establecidos en canchas sin tratamiento de suelo (sin subsolado) posean una menor altura, diámetro y volumen comercial a la edad de cosecha.

En relación a la valoración económica del impacto ambiental de faenas de cosecha, Acuña (1997) señala, pero en relación a los caminos forestales, que éstos afectan componentes ambientales que no poseen un precio de mercado definido, pero que sí se conocen las prácticas de control de impacto y sus respectivos costos involucrados son los métodos de valoración indirectos tales como el Costo de Reposición y el Gasto en Mitigación los más adecuados para evaluar económicamente estos impactos.

Por su parte, Gayoso (1996) define los costos ambientales como "los costos de las medidas mitigadoras necesarias para bajar el nivel de impacto, hasta el nivel que hubiese generado el empleo de la mejor tecnología disponible; es decir, aceptando un cierto nivel de tolerancia de impacto que no considera costo ambiental". De esta manera, "la determinación de los costos ambientales se hace por los costos de las medidas de mitigación cuando éstas son técnicamente viables, y por la pérdida de productividad de los sitios o costo de oportunidad cuando el daño se estima no recuperable o resulta impreciso costear la medida".

PLANIFICACION DE LA COSECHA FORESTAL

Planificar la cosecha forestal requiere tomar una serie de decisiones. El uso de la programación matemática ha sido una de las técnicas más usadas en la generación de herramientas para la planificación de faenas forestales (Epstein *et al.* 1999). En Chile tenemos los casos de Planex, Optimed y Opticort, los cuales han permitido a muchas empresas forestales la reducción de sus costos y una mejora en la gestión de las operaciones. Sin embargo, ninguno de ellos ha facilitado la planificación de canchas de madereo, en lo que respecta al número y dimensión para condiciones específicas de cosecha y, aún más, ninguno ha considerado restricciones de tipo ambiental. En este sentido, la modelación matemática presentada en este artículo pretende demostrar cómo el uso de este tipo de técnicas también permite el efecto de consideraciones ambientales sobre las decisiones que se toman durante la planificación.

MATERIALES Y METODOS

Información básica. Para la evaluación de los modelos matemáticos se utilizaron antecedentes generales sobre tres sistemas de cosecha utilizados por Forestal Celco S.A. para ejecutar las faenas a tala rasa durante las temporadas de verano (Troncoso 1996). Además, se configuró un sistema de cosecha adicional (sistema 4) usando los mismos tipos de maquinaria pero en combinaciones distintas, con el objeto de generar una mayor cantidad de alternativas de selección. El cuadro 1 muestra la descripción de los cuatro sistemas utilizados por el modelo.

Para cada maquinaria y equipo se requirió información relacionada con la disponibilidad máxima de cada uno de ellos, costos horarios, porcentajes de utilización y sueldos a trato, entre otros.

Se empleó también un total de 30 rodales en edad de cosecha, cada uno con información sobre su superficie total (ha), volumen total (m³), pendiente media (%), densidad (árboles/ha) y costo de habilitación de la faena de cosecha (US\$), que incluye campamentos, gastos de administración y generales.

Cabe destacar que tanto el número de rodales y sistemas de cosecha, como la cantidad máxima de

CUADRO 1

Descripción de sistemas de cosecha.
Description of harvesting systems.

Sistema	Configuración
1	1 Feller buncher → 5 Motosierristas desrame → 2 Skidders garra → 4 Motosierristas trozado → 2 Cargadores frontales.
2	1 Feller buncher → 5 Motosierristas desrame → 2 Skidders huinche + 1 Skidder garra → 5 Motosierristas trozado → 1 Cargador frontal + 2 Trineumáticos.
3	2 Motosierristas volteo desrame → 1 Skidder huinche → 2 Motosierristas trozado → 1 Trineumático.
4	4 Motosierristas volteo desrame → 2 Skidder huinche → 3 Motosierristas trozado → 2 Trineumáticos.

Fuente: Troncoso (1996).

canchas a construir por rodal y de días disponibles para la ejecución de las faenas (132 días = 6 meses * 22 días/mes), corresponden a los antecedentes que normalmente una empresa forestal dispone para realizar la planificación de cosecha de una temporada de verano cualquiera.

Con respecto al dimensionamiento de las canchas de madereo, se utilizó para ello la metodología propuesta por Troncoso *et al.* (1998), la que emplea un análisis espacial de todas las faenas que se desarrollan en ella.

COSTO DE CONSTRUCCION DE CANCHAS

El costo directo de construcción de canchas en US\$/m² se obtuvo dividiendo los costos horarios de las máquinas (bulldozer y motoniveladora) por sus respectivos rendimientos. De esa forma se obtuvo un costo directo de construcción de canchas de 1,28 US\$/m².

Por su parte, el costo ambiental asociado a la construcción de canchas de madereo fue calculado para las dos situaciones siguientes:

Costo ambiental Tipo 1: Implica la reforestación de la cancha con tratamiento de suelo, y corresponde al costo del subsolado más el valor actualizado de los ingresos por venta de los m³ de madera comercial que se pierden en relación a un sitio no compactado.

Costo ambiental Tipo 2: Considera la reforestación de la cancha sin tratamiento de suelo, y corresponde solamente al valor actual de los ingresos por venta de los m³ de madera perdidos.

Para ambas situaciones se consideró una densidad promedio de 377 arb/ha y un volumen de 0,9 m³/arb (valores promedios obtenidos para los 30 rodales considerados). Además, para efectos de la actualización se utilizaron un valor de la madera en pie de 30 US\$/m³, una tasa de descuento del 6% y una edad de rotación de 20 años.

CUADRO 2

Costos de construcción y ambientales de las canchas de madereo.

Construction and environmental costs of log landings.

Tipo de costo	Pérdida de madera (%)	Costo (US\$/m ²)
Construcción de canchas	nc	1,28
Ambiental Tipo 1	20%	0,11
Ambiental Tipo 2	55%	0,17

nc No corresponde.

En el cuadro 2 se encuentran las pérdidas de volumen (%) consideradas para las situaciones bajo análisis y los costos asociados a la construcción de canchas.

MODELAMIENTO DEL PROBLEMA

Considerando la problemática que presenta la planificación de faenas a tala rasa para una empresa forestal, se desarrollaron modelos de programación entera 0-1 utilizando el lenguaje de optimización LINGO 5.0 en interacción con Microsoft Excel 2000. Los modelos implementados permiten seleccionar los rodales a cosechar y establecer el número y tamaño óptimos de canchas de madereo a construir en cada uno de ellos. Además, permiten determinar el sistema de cosecha, que, en términos de productividad y costos, sea más eficiente.

Sin embargo, dado que el problema de la planificación de cosecha tradicionalmente ha buscado la optimización de las faenas sólo desde un punto de vista económico y productivo, sin considerar impactos ambientales (Opticort, Optimed, Planex, entre otros), se realizaron distintas formulaciones al combinar la función objetivo de maximización de ingresos netos con diferentes conjuntos de restricciones, lo que genera distintos modelos matemáticos. De esa manera, fue posible analizar las variaciones de los resultados óptimos cuando se consideran tanto costos como restricciones de impacto ambiental.

A continuación se presenta la nomenclatura utilizada para formular tanto la función objetivo como las restricciones.

Nomenclatura

Subíndices:

- i = Rodal. (i = 1, ..., I)
- j = Sistema de cosecha. (j = 1, ..., J)
- n = Número de canchas. (n = 1, ..., N)
- s = Tipo de skidder. (s = 1, 2)

Variables de decisión:

FA_{ijⁿ} = Variable binaria que indica si el rodal i se cosecha con el sistema j, construyendo n canchas.

Variables auxiliares:

- PMAD_i = Producción diaria del madereo en el rodal i. (m³/jornada).
- VC_i = Volumen cosechado en el rodal i (m³).
- DPM_i = Distancia promedio de madereo obtenida para el rodal i (km).
- DIM_i = Dimensión de las canchas construidas en el rodal i (m²).
- CVOL_i, CDES_i, CMAD_i, CTRO_i, CORD_i, CCL_i = Costo de las faenas de volteo, desrame, madereo, trozado, ordenamiento y carguío, y construcción de canchas, en el rodal i (US\$/m³).
- CHAB_i = Costo de habilitación del rodal i (US\$/m³).
- CTC_i y CTCOS_i = Costo total de cosecha en el rodal i (US\$/m³ y US\$).
- ING_i = Ingreso total por la venta de la madera cosechada en el rodal i (US\$).
- SALT_i = Superficie total alterada por canchas en el rodal i (ha).
- SC_i = Superficie a cosechar en el rodal i (ha).
- NCAN_i = Número de canchas a construir en el rodal i.
- SIS_i = Sistema de cosecha utilizado en el rodal i.
- DIAS_i = Jornadas requeridas para cosechar el rodal i.

Parámetros de restricciones:

PRODMIN, PRODMAX = Producción mínima y máxima de madera entre todos los rodales cosechados (m³).

NSK_s = Disponibilidad máxima de skidders tipo s (m^3).

NFB, NMVD, NMD, NMT, NCF, NT = Disponibilidad máxima de feller bunchers, motosierristas volteo-desrame, motosierristas desrame, motosierristas trozado, cargadores frontales y trineumáticos, respectivamente.

DMIN, DMAX = Distancia promedio de madereo mínima y máxima en cada rodal (km).

ω_i = Proporción máxima de la superficie del rodal i alterada por canchas (%).

ψ = Proporción máxima de la superficie total cosechada alterada por canchas (%).

Coefficientes técnicos:

mad_{ijn} = Producción de madereo del sistema j, con n canchas en el rodal i ($m^3/jornada$).

d_{min} = Distancia promedio de madereo en el rodal i con n canchas (km).

$dcan_j$ = Dimensión de las canchas para el sistema j (m^2).

f_j = Costo fijo de madereo para el sistema de cosecha j (US\$/ m^3).

co_{jj} = Costo operacional de madereo para el sistema j en el rodal i (US\$/ m^3/km).

d_{ijn} = Jornadas necesarias para cosechar el rodal i, con el sistema j y n canchas construidas.

vt_i = Volumen total cosechable en el rodal i (m^3).

st_i = Superficie total cosechable en el rodal i (ha).

sk_{js} = Número de skidder tipo s en el sistema j.

nh_j = Número de horas de la jornada normal de trabajo.

$fb_j, mvd_j, md_j, mt_j, cf_j$ y t_j = Número de feller bunchers, motosierristas volteo-desrame, motosierristas desrame, motosierristas trozado, cargadores frontales y trineumáticos, respectivamente, en el sistema j.

$pend_i$ = Pendiente media del rodal i (%).

$chvd, chfb, chdes, chtro, chcf, cht$ = Costo horario de un motosierrista volteo-desrame, un feller buncher, un motosierrista desrame, un motosierrista trozado, un cargador frontal y un trineumático, respectivamente (US\$/h).

$chfmad_s, chvmad_s$ = Costo horario fijo y variable de madereo según skidder s (US\$/h).

cl = Costo directo de construcción de canchas (US\$/ m^2).

cal = Costo ambiental de construcción de canchas (US\$/ m^2).

hab_i = Costo de habilitar el rodal i para ser cosechado (US\$).

$stvol_j, stdes_j, strto_j, stord_j$ = Sueldo a trato de las faenas de volteo, desrame, trozado, ordenamiento y carguío, según sistema j (US\$/ m^3).

$stmad$ = Sueldo a trato de madereo (US\$/ m^3).

pv = Precio de venta promedio por unidad de volumen (US\$/ m^3).

Función objetivo:

Maximización del ingreso neto (US\$): A través de esta función se pretende maximizar el ingreso neto de la cosecha, considerando que la madera cosechada es entregada en la cancha de madereo.

$$\text{Max } E_i (\text{ING}_i - \text{CTCOS}_i)$$

Set de restricciones

Restricciones de asignación de recursos (A)

1. Ecuaciones para el cálculo de la producción de madereo en el rodal i ($m^3/jornada$):

$$\text{PMAD}_i - \sum_{jn} \text{mad}_{ijn} * \text{FA}_{ijn} = 0 \quad \forall_i$$

2. Ecuaciones para determinar la cantidad de madera cosechada en el rodal i (m^3):

$$\text{VC}_i - \sum_{jn} (\text{mad}_{ijn} * d_{ijn}) * \text{FA}_{ijn} = 0 \quad \forall_i$$

3. Restricciones para asignar un sistema de cosecha y construir sólo un número de canchas en cada rodal i:

$$\sum_{jn} \text{FA}_{ijn} \leq 1 \quad \forall_i$$

Restricciones de producción de madera (M)

4. Restricciones de producción mínima y máxima de madera considerando todos los rodales (m^3):

$$\sum_i \text{VC}_i \geq \text{PRODMIN}$$

$$\sum_i \text{VC}_i \leq \text{PRODMAX}$$

Restricciones de disponibilidad de recursos (R)

5. Disponibilidad máxima de cada tipo de maquinaria y obrero para configurar los sistemas de cosecha:

$$\sum_{ijn} sk_{js} * \text{FA}_{ijn} \leq \text{NSK}_s \quad \forall_s$$

$$\sum_{ijn} fb_j * FA_{ijn} \leq NFB$$

$$\sum_{ijn} mvd_j * FA_{ijn} \leq NMVD$$

$$\sum_{ijn} md_j * FA_{ijn} \leq NMD$$

$$\sum_{ijn} mt_j * FA_{ijn} \leq NMT$$

$$\sum_{ijn} cf_j * FA_{ijn} \leq NCF$$

$$\sum_{ijn} t_j * FA_{ijn} \leq NT$$

6. Ecuaciones para determinar la cantidad de días requeridos para cosechar el rodal *i* (días):

$$DIAS_i - \sum_{ijn} d_{ijn} * FA_{ijn} = 0 \quad \forall_i$$

7. Restricciones de duración máxima de las faena de cosecha por rodal (días):

$$DIAS_i \leq DIASMAX \quad \forall_i$$

Ecuaciones para canchas de madereo (L)

8. Ecuaciones para determinar la DPM generada en el rodal *i* (km):

$$DPM_i - \sum_{ijn} dm_{in} * FA_{ijn} = 0 \quad \forall_i$$

9. Ecuaciones para el cálculo de la dimensión de las canchas de madereo construidas en el rodal *i* (m²):

$$DIM_i - \sum_{ijn} dcan_j * FA_{ijn} = 0 \quad \forall_i$$

Restricciones para distancias promedios de madereo [DPM] (D)

10. Restricciones de DPM máximas y mínimas para cada rodal *i* (km):

$$DPM_i \geq DMIN * \sum_{ijn} FA_{ijn} \quad \forall_i$$

$$DPM_i \leq DMAX * \sum_{ijn} FA_{ijn} \quad \forall_i$$

Ecuaciones de costos e ingresos (C)

11. Costos por faena para cada rodal *i* (US\$/m³):

$$CVOL_i - \sum_{ijn} [\{ (chvd * mvd_j + chfb * fb_j) * nh_j \} / mad_{ijn} + stvol_j] * FA_{ijn} = 0 \quad \forall_i$$

$$CDES_i - \sum_{ijn} [\{ chdes * md_j * nh_j \} / mad_{ijn} + stdes_j] * FA_{ijn} = 0 \quad \forall_i$$

$$CMAD_i - \sum_{ijn} (f_j + co_{ij} * dm_{in} + stmad) * FA_{ijn} = 0 \quad \forall_i$$

$$CTRO_i - \sum_{ijn} [\{ chtro * mt_j * nh_j \} / mad_{ijn} + sttro_j] * FA_{ijn} = 0 \quad \forall_i$$

$$CORD_i - \sum_{ijn} [\{ (chcf * cf_j + cht * t_j) * nh_j \} / mad_{ijn} + stord_j] * FA_{ijn} = 0 \quad \forall_i$$

$$CCL_i - \sum_{ijn} [n * dcan_{ij} * (cl + cal) / vt_i] * FA_{ijn} = 0 \quad \forall_i$$

$$CHAB_i - [hab_i / vt_i] * \sum_{ijn} FA_{ijn} = 0 \quad \forall_i$$

$$CTC_i - (CVOL_i + CDES_i + CMAD_i + CTRO_i + CORD_i + CCL_i + CHAB_i) = 0 \quad \forall_i$$

12. Costos totales de cosecha para cada rodal *i* (US\$):

$$CTCOS_i - vt_i * CTC_i = 0 \quad \forall_i$$

13. Ingresos totales para cada rodal *i* (US\$):

$$ING_i - PV * VC_i = 0 \quad \forall_i$$

Restricciones de impacto ambiental (I)

14. Restricciones de superficie alterada por canchas de madereo para cada rodal *i* (ha):

$$SALT_i \leq \omega_i * st_i \quad \forall_i$$

15. Restricciones de superficie total alterada por canchas de madereo (ha):

$$\sum_i SALT_i \leq \psi * \sum_i st_i$$

Ecuaciones de contabilidad auxiliares (U)

16. Superficie a cosechar, número de canchas a construir, sistema de cosecha asignado y superficie alterada en el rodal *i*:

$$SC_i - \sum_{ijn} st_i * FA_{ijn} = 0 \quad \forall_i$$

$$NCAN_i - \sum_{ijn} n * FA_{ijn} = 0 \quad \forall_i$$

$$SIS_i - \sum_{ijn} j * FA_{ijn} = 0 \quad \forall_i$$

$$SALT_i - \sum_{ijn} [(n * dcan_{ij} / 10000) * FA_{ijn}] = 0 \quad \forall_i$$

Formulaciones base y parámetros de restricción utilizados. El cuadro 3 muestra las distintas formulaciones del problema analizado, en tanto que en el cuadro 4 se pueden observar los parámetros usados para cada una de las restricciones. Para el caso de las distancias promedio de madereo (DPM) máximas y mínimas se utilizaron valores que representaban restricciones reales para la operación de madereo y que varían entre los 100 y 250 m.

Para el porcentaje máximo de superficie alterada por canchas se emplearon porcentajes entre 1 y 2%, los cuales corresponden a valores promedios encontrados en corridas preliminares realizadas. Estos porcentajes son menores a los encontrados por Gayoso (1991) para faenas de cosecha que utilizaban madereo a canchas, debido a que lo que se persigue es minimizar la superficie alterada por este factor.

CUADRO 3

Formulaciones base modeladas para el problema en estudio.
Basis formulations modeled for the study problem.

Formulación	Función Objetivo	Sujeto a:
Base 1	Maximizar Ingreso neto	$A + R + L + C + M + U$, sin costo ambiental.
Base 2	Maximizar Ingreso neto	$A + R + L + C + M + U + \text{Costo ambiental tipo 1}$
Base 3	Maximizar Ingreso neto	$A + R + L + C + M + U + \text{Costo ambiental tipo 2}$

A, R, L, C, M y U: Conjuntos de restricciones presentadas en la formulación matemática del modelo.

CUADRO 4

Parámetros usados para las restricciones de DPM y ambientales.

Parameters used for the average skidding distance and environmental constraints.

Restricción	Valor
D1	DMIN = 100 m, DMAX = 250 m
D2	DMIN = 125 m, DMAX = 200 m
D3	DMIN = 150 m, DMAX = 200 m
I1	$\omega_1 = 2,0\%$, $\psi = 1,5\%$
I2	$\omega_2 = 1,5\%$, $\psi = 1,5\%$
I3	$\omega_3 = 1,0\%$, $\psi = 1,0\%$

D1, D2, D3, I1, I2 e I3: Conjuntos de restricciones presentadas en la formulación matemática del modelo.
DMIN, DMAX, (ω y ψ): Parámetros y coeficientes técnicos presentados en la formulación matemática del modelo.

RESULTADOS Y DISCUSION

Evaluación de los modelos. A continuación se presentan los diferentes tipos de evaluaciones:

Influencia del costo ambiental de canchas sobre la formulación base. Este análisis se realizó para comparar la influencia del costo ambiental sobre el número de canchas, la DPM y el costo de cosecha obtenido en cada situación. Para tal efecto, se evaluaron las formulaciones Base 1, Base 2 y Base 3, las cuales se diferenciaban únicamente en la consideración del costo ambiental de canchas.

El cuadro 5 presenta los resultados de las tres corridas evaluadas, demostrando la influencia del costo ambiental de canchas en el proceso de planificación. En todas las corridas se seleccionaron los mismos 9 rodales, cosechando una superficie de 1.163 ha (un 35,1% de la superficie total disponible) y un volumen de 410.749 m³ (un 37,3% del

CUADRO 5

Resultados de LINGO para las formulaciones base modeladas.
LINGO outputs for basis formulations modeled

Ítem	Formulación	Total	Resultados por rodal		
			Media	Mínimo	Máximo
Número de canchas					
	Base 1	109	-	10	14
	Base 2	106	-	10	14
	Base 3	102	-	9	14
DPM [km]					
	Base 1	-	0.123	.115	.128
	Base 2	-	0.123	.145	.134
	Base 3	-	0.123	.115	.134
Costo [US\$/m ³]					
	Base 1	-	3,89	3,4	4,4
	Base 2	-	3,93	3,4	4,4
	Base 3	-	3,95	3,5	4,4
Días de trabajo					
	Base 1	-	-	68	131
	Base 2	-	-	69	131
	Base 3	-	-	69	131
Producción [m ³ /día]					
	Base 1	-	-	331	720
	Base 2	-	-	331	720
	Base 3	-	-	331	709

volumen total), indicando que seleccionó aquellos rodales que ofrecían una mayor cantidad de madera. Por otro lado, los sistemas de cosecha escogidos fueron los sistemas 1 y 4, con dimensiones de canchas para cada uno de 1.530 y 1.296 m², respectivamente.

En relación a la densidad de canchas, cuando se consideró el costo ambiental tipo 2 se obtuvo una densidad de 123,1 m² de cancha/ha, un 6,5% menor que cuando no se considera costo ambiental, y un 3,8% menor que cuando se utiliza el costo tipo 1.

Cabe destacar que para las tres formulaciones, las DPM obtenidas por el modelo no superaron los 134 m, generando de esa manera áreas de abastecimiento de madera no mayores a 12,5 ha.

Con respecto a los costos de cosecha, los que siempre fueron menores para el sistema 1, la formulación Base 1 obtuvo el costo promedio más bajo debido a que no considera costo ambiental y porque las DPM elegidas fueron menores, disminuyendo de esa manera el costo de madereo.

Por último, en relación a los valores de la función objetivo, en las formulaciones Base 2 y Base 3 se registró una leve disminución de los ingresos netos debido no sólo a la consideración de los costos ambientales, sino que también a la disminución del número de canchas que provocó un aumento en los costos de madereo. Los ingresos netos con respecto a la formulación Base 1, que obtuvo un valor de US\$ 12777800, se redujeron en un 0,13 y 0,20% para las formulaciones Base 2 y Base 3, respectivamente.

CUADRO 6

Resultados de LINGO para las formulaciones base con restricciones de DPM.
LINGO outputs for basis formulations with average skidding distance constraints

Item	Formulación	Total	Resultados por rodal		
			Media	Mínimo	Máximo
Numero de canchas					
	Base 1+D1	109	-	10	14
	Base 2+D1	106	-	10	14
	Base 3+D1	102	-	9	14
	Base 1+D2	85		5	12
	Base 2+D2	84	-	5	12
	Base 3+D2	85	-	8	12
	Base 1+D3	57	-	5	8
	Base 2+D3	59	-	5	8
	Base 3+D3	59	-	5	8
DPM [km]					
	Base 1+D1	-	0,123	0,115	0,128
	Base 2+D1	-	0,125	0,115	0,134
	Base 3+D1	-	0,128	0,115	0,134
	Base 1+D2		0,141	0,127	0,193
	Base 2+D2	-	0,141	0,127	0,193
	Base 3+D2	-	0,139	0,127	0,156
	Base 1+D3		0,168	0,151	0,195
	Base 2+D3	-	0,164	0,151	0,195
	Base 3+D3	-	0,164	0,151	0,195
Costo [US\$/m ³]					
	Base 1+D1	-	3,89	3,4	4,4
	Base 2+D1	-	3,93	3,4	4,4
	Base 3+D1	-	3,95	3,5	4,4
	Base 1+D2		3,94	3,4	4,4
	Base 2+D2		3,97	3,4	4,4
	Base 3+D2	-	3,96	3,5	4,4
	Base 1+D3		4,00	3,5	4,3
	Base 2+D3	-	4,00	3,5	4,4
	Base 3+D3	-	4,02	3,5	4,4

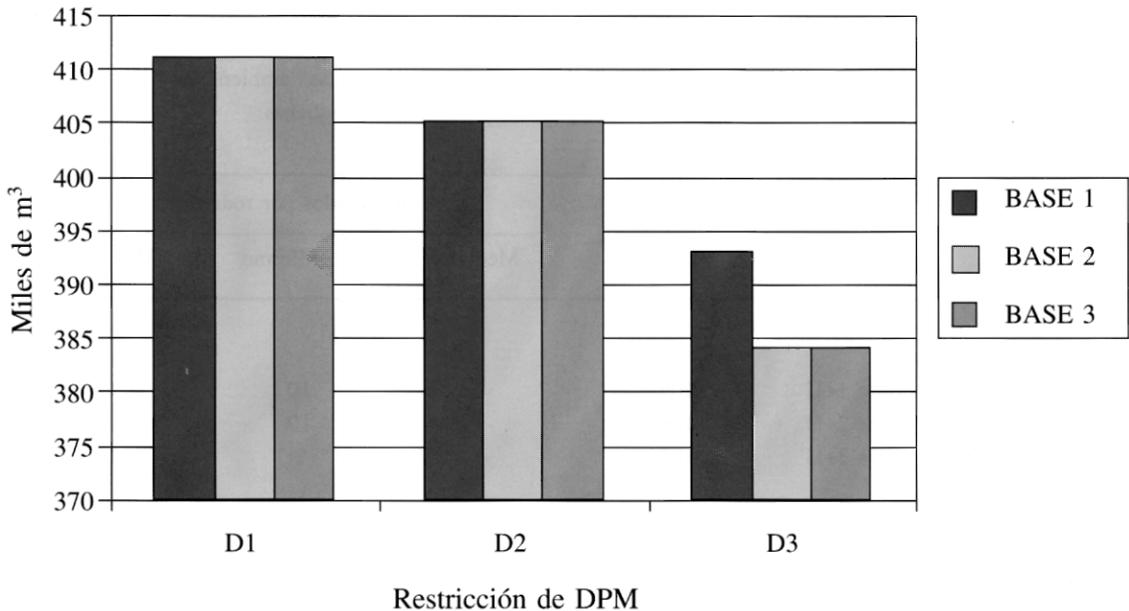


Figura 1. Volumen total cosechado según formulación base y restricción de DPM.
Total harvested volume by basis formulation and ASD constraint.

Efecto de restricciones para las DPM. Esta evaluación se realizó para analizar el comportamiento del número de canchas, la DPM y los costos de cosecha asociados, cuando se restringen las distancias de madereo obtenidas en cada rodal cosechado.

En el cuadro 6 se muestran los resultados, y se observa cómo la cantidad de canchas se reduce al aumentar el valor de la DPM mínima permitida (restricciones D2 y D3). Este factor provocó un alza en los costos de cosecha por influencia directa del costo de madereo.

Además, como se observa en la figura 1, se registra una disminución de la cantidad de madera cosechada, debido, principalmente, a que el aumento de las DPM genera una baja en los rendimientos alargando con ello la duración de las faenas y, por lo tanto, excediendo el número de días disponibles para realizar la cosecha.

En todas las corridas realizadas siempre se seleccionaron los sistemas de cosecha 1 y 4, con dimensiones de canchas similares a las obtenidas en el análisis anterior, y siempre con costos más bajos para el primero de ellos debido a su alta producción diaria.

Con respecto al valor de la función objetivo para las distintas formulaciones bases, se obtuvo una disminución de los ingresos netos cuando fueron sujetas al conjunto de restricciones D2 y D3, registrándose bajas en promedio de 1,53 y 6,14%, respectivamente. Para las restricciones D1 no se registró diferencia en el ingreso neto en comparación con los valores obtenidos en el análisis anterior, probablemente debido a que las DPM asignadas por el modelo se encontraban dentro de las DPM límites que establecen dichas restricciones.

Efecto de restricciones ambientales En este caso se evaluó el efecto de agregar, a cada formulación base, restricciones de impacto ambiental que limitan el porcentaje máximo de alteración por canchas, tanto para cada rodal como para la totalidad de la superficie intervenida.

El cuadro 7 muestra la influencia de los tres niveles máximos de alteración sobre el número de canchas, la DPM y los costos de cosecha, registrándose un comportamiento similar al caso de las restricciones de DPM, pero menos intenso.

A medida que se elevó el nivel de exigencia de las restricciones ambientales, esto es, bajando el

CUADRO 7

Resultados de LINGO para las formulaciones base con restricciones ambientales
 LINGO outputs for basis formulations with environmental constraints

Item	Formulación	Total	Resultados por rodal		
			Media	Mínimo	Máximo
Número de canchas					
	Base 1+I1	109	-	10	14
	Base 2+I1	106	-	10	14
	Base 3+I1	102	-	9	14
	Base 1+I2	107	-	10	14
	Base 2+I2	105	-	10	14
	Base 3+I2	101	-	8	14
	Base 1+I3	75	-	8	9
	Base 2+I3	75	-	8	9
	Base 3+I3	75	-	8	9
DPM [km]					
	Base 1+I1	-	0,123	0,115	0,128
	Base 2+I1	-	0,125	0,115	0,134
	Base 3+I1	-	0,128	0,115	0,134
	Base 1+I2	-	0,124	0,115	0,128
	Base 2+I2	-	0,124	0,115	0,134
	Base 3+I2	-	0,128	0,115	0,134
	Base 1+I3	-	0,145	0,138	0,155
	Base 2+I3	-	0,145	0,138	0,155
	Base 3+I3	-	0,145	0,138	0,155
Costo [US\$/m ³]					
	Base 1+I1	-	3,89	3,4	4,4
	Base 2+I1	-	3,93	3,4	4,4
	Base 3+I1	-	3,95	3,5	4,4
	Base 1+I2	-	3,89	3,4	4,4
	Base 2+I2	-	3,93	3,4	4,4
	Base 3+I2	-	3,95	3,5	4,4
	Base 1+I3	-	3,91	3,4	4,3
	Base 2+I3	-	3,93	3,5	4,3
	Base 3+I3	-	3,95	3,5	4,3

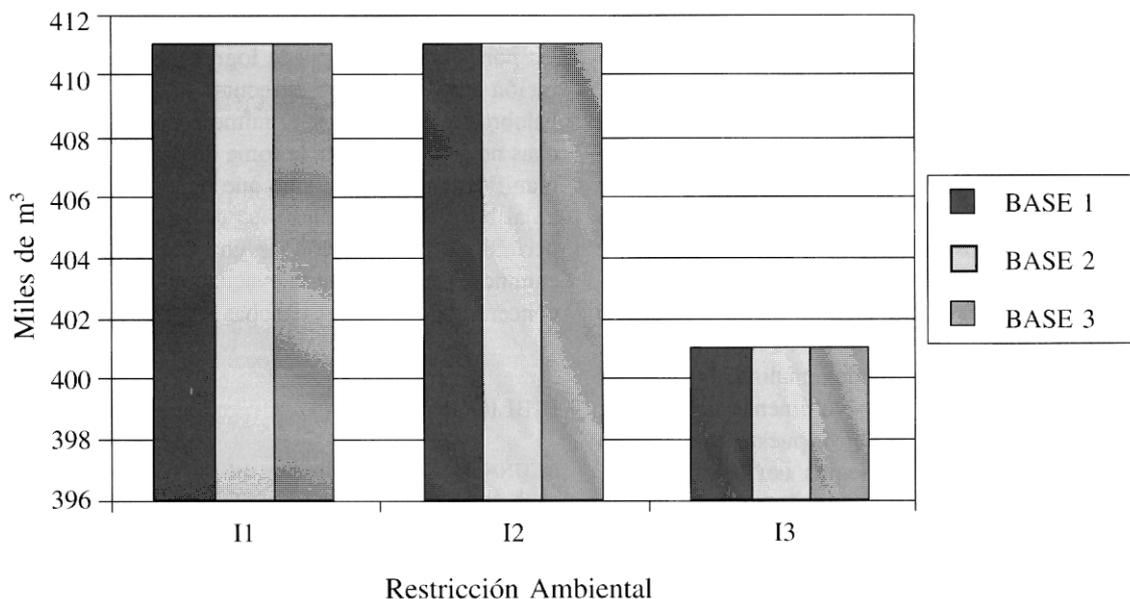


Figura 2 Volumen total cosechado según formulación base y restricción ambiental.
Total harvested volume by basis formulation and environmental constraint

porcentaje máximo de superficie alterada, se produjo una baja en el número de canchas a construir por rodal, generando mayores DPM y, por ende, un aumento de los costos de cosecha. Por otro lado, también se redujo la cantidad de madera extraída debido a la disminución en las producciones diarias de madera (ver figura 2). Otro efecto detectado es la poca influencia del costo ambiental sobre el cálculo del número de canchas, debido probablemente a la necesidad de cosechar una cantidad de madera que permita una buena utilización de la maquinaria y equipos disponibles, y a la vez obtener un mayor ingreso neto.

En todas las corridas realizadas se seleccionaron los sistemas de cosecha 1 y 4, con dimensiones de cancha que se mantienen constantes, independientes del tipo de corrida y del tipo de evaluación. Ello, debido a que la dimensión depende exclusivamente de la maquinaria que conforma el sistema de cosecha.

Con respecto al valor de la función objetivo, en este análisis sólo se obtuvo una disminución notoria de los ingresos netos cuando las formulaciones base fueron sujetas al conjunto de restricciones I3 (alteración menor al 1% de la superficie), registrándose bajas en promedio de 2,45%. Para el resto de las restricciones (I1 e I2) no se registraron diferencias significativas en los ingresos netos en comparación con los valores obtenidos en el análisis

de las formulaciones base con el costo ambiental. Por lo tanto, las cantidades óptimas de canchas que asigna el modelo junto con sus dimensiones, corresponden a valores que generan bajos porcentajes de alteración, y no superan el 2% de la superficie de los rodales.

CONCLUSIONES

Para disminuir el impacto ambiental en el bosque durante una faena a tala rasa es primordial la realización de una planificación integral que implique un buen diseño de las huellas de madereo y, por ende, una óptima localización y tamaño de las canchas. Sin embargo, estas premisas requieren de herramientas que incorporen el factor ambiental dentro de su estructura.

Por ello, los modelos aquí desarrollados están innovando en dicha materia al incorporar tanto costos como restricciones ambientales en la planificación de la cosecha forestal, y generar una disminución en la cantidad de canchas a construir en un rodal cualquiera. En este contexto, las evaluaciones realizadas demuestran que consideraciones ambientales no generan reducciones importantes de los ingresos netos, por lo que es un buen incentivo para que aquellas empresas que todavía tienen como objetivos principales los económicos y

productivos, realicen innovaciones en sus procesos de planificación y tomen en cuenta la sustentabilidad y el cuidado de sus recursos forestales.

De los tres análisis realizados, la influencia del costo ambiental fue la menos influyente sobre el valor de la función objetivo y sobre los volúmenes de madera cosechados. Sin embargo, este efecto puede deberse a que faltaron algunos gastos de mitigación que podrían incluirse en investigaciones futuras, tales como la fertilización adicional o técnicas de preparación de suelo más intensivas. Con respecto a los otros dos análisis, la que más afecta, sobre todo en los volúmenes de madera, son las restricciones de DPM, puesto que reducen notoriamente los rendimientos de los skidders y con ello la producción diaria de madera. En segundo lugar se encuentran las restricciones de superficie máxima alterada, las cuales reducen los ingresos y los volúmenes de madera, pero en niveles que no impiden el cumplimiento de las demandas.

En general, la mayoría de los modelos evaluados obtienen resultados que son aceptables tanto económica como ambientalmente. No debe olvidarse que los porcentajes de alteración de superficie obtenidos por rodal nunca sobrepasaron el 2%, indicando que el número de canchas determinado es una cantidad adecuada, si comparamos ese porcentaje con el encontrado para algunos predios por Gayoso *et al.* (1991), situación donde ni la cantidad ni el tamaño de canchas tuvieron valores de referencia para su planificación.

Finalmente, es importante destacar que los modelos desarrollados optimizan la ejecución de la faena de cosecha desde un punto de vista produc-

tivo y económico, a la vez que establecen las pautas por las cuales se puede lograr una menor alteración ambiental sobre el recurso bosque. En otras palabras, al determinar el número óptimo de canchas no sólo se facilita la toma de decisiones en la planificación de éstas, sino que también se favorece al buen diseño de las vías de saca, además de permitir la construcción de una adecuada red de caminos que posibilite la evacuación de la madera concentrada en dichas canchas.

BIBLIOGRAFIA

- ACUÑA, M. 1997. Proposición y aplicación de metodologías de evaluación ambiental para caminos forestales. Tesis de Grado. Ingeniería Forestal, Facultad de Ciencias Forestales Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile. 99 p.
- CONWAY, S. 1982. *Logging Practices: Principles of Timber Harvesting Systems*. ed. rev. Miller Freeman. San Francisco. USA, 432 p.
- EPSTEIN, R., M. MORALES, J. SERON, A. WEINTRAUB 1999. "Use of OR Systems in the Chilean Forest Industries", *Interfaces* 29(1): 7-29.
- GAYOSO, J., A. IROUME, A. ELLIES. 1991. Degradación de suelos forestales asociada a operaciones de cosecha. En: Actas III Taller de Producción Forestal. Grupo de Producción Forestal y Fundación Chile. Concepción. Chile, pp 97-106.
- GAYOSO, J. 1996. "Costos ambientales en plantaciones de *Pinus radiata* D. Don", *Bosque* 17(2): 15-26.
- TRONCOSO, J. 1996. PLADEC: Un modelo para la planificación de sistemas de cosecha en *Pinus radiata* D. Don Tesis de Grado. Ingeniería Forestal, Facultad de Recursos Naturales, Universidad de Talca, Talca, Chile, 90 p.
- TRONCOSO, J., R. NEUENSCHWANDER, J. GUTIERREZ 1998. "Dimensionamiento de canchas de madereo", *Bosque* 19(1): 81-89
- TRONCOSO, J. 1998. "Nueva herramienta para la cosecha forestal", *Revista Agronomía y Forestal UC* 1(1): 34-37.