

NOTAS

## Asignación óptima de equipos en faenas de cosecha forestal

Optimal assignment of equipment in forest harvesting activities

CRISTIAN PALMA I., JUAN TRONCOSO T.

Pontificia Universidad Católica de Chile, Casilla 306, Correo 22, Santiago, Chile.

### SUMMARY

Logging activities require consideration of a large number of resource combinations, and there is a need to use the money invested in them effectively. For this reason, computational tools, principally optimization models, are used in their design. This paper shows a practical application of this technique for planning horizons of variable length (three months ideally), divided into five periods. The model is designed to guide the operative harvest decisions, such as choosing harvest areas, logging equipment and labor considerations. This application proves the feasibility and advantages of its utilization for minor companies.

*Key words:* harvest planning, linear programming, resource allocation.

### RESUMEN

La gran cantidad de combinaciones posibles en el diseño de faenas de producción forestal y la necesidad de un máximo aprovechamiento de la alta inversión que éstas significan han llevado a las empresas a apoyar su planificación con diversas herramientas computacionales, en su mayoría modelos de optimización. El presente trabajo muestra la aplicación de esta técnica a un problema práctico, mediante un modelo diseñado para guiar las decisiones operativas de cosecha que permite seleccionar las unidades a cosechar y determinar los equipos y el personal requeridos en cada uno de ellos, para un horizonte de planificación de longitud variable (idealmente tres meses) dividido en cinco períodos. Se demuestra con esto la conveniencia y factibilidad de uso de dicha técnica en empresas de tamaño mediano.

*Palabras claves:* planificación de la cosecha, programación lineal, asignación de recursos.

### INTRODUCCION

Los actuales niveles de inversión necesarios para la ejecución de las faenas operativas de cosecha, producto de la gran magnitud y alta mecanización que éstas representan, hacen especialmente relevantes los procesos de organización y planificación.

En este sentido, la Planificación Operativa establece la programación detallada de las actividades de corto plazo (como la definición de esquemas de trozado, maquinaria requerida por unidad de cosecha, contratación de faenas, transporte de productos), a realizar de acuerdo con los compromisos y restricciones que afectan en forma inmediata

a la empresa, teniendo predeterminadas las condiciones de producción (Morales y Weintraub, 1989). En el caso particular de la cosecha forestal, y sobre la base de los tres factores de producción (el bosque, el hombre y la máquina), el planificador desarrollará los procedimientos de extracción de madera que puedan adaptarse a las condiciones predominantes en la empresa y que garanticen operaciones seguras.

Es así como se puede señalar que en ausencia de planes operativos de cosecha las operaciones son difíciles de coordinar, imposibles de controlar adecuadamente y no garantizan una utilización sostenible de los productos del bosque. Los pro-

blemas surgidos durante la ejecución de las operaciones se traducirán, por tanto, en una subutilización de los recursos productivos y excesivos costos (Conway, 1982).

Todo lo anterior ha llevado a las empresas forestales a utilizar técnicas de programación matemática, algoritmos y modelos computacionales como herramientas de apoyo al proceso de toma de decisiones, con el fin de aumentar el rendimiento de las faenas y optimizar los sistemas productivos. Al respecto, las técnicas más usadas en planificación forestal corresponden a la Simulación y a la Programación Lineal (García, 1990). Mediante modelos de simulación es posible describir el comportamiento de un determinado sistema dadas ciertas condiciones iniciales. Por su parte, la programación lineal, así como otras técnicas de programación matemática, están diseñadas para permitir la elección de alternativas óptimas a partir de un conjunto de posibles alternativas (Kent, 1989). En este sentido, los modelos de optimización permiten encontrar buenas soluciones a problemas de programación de actividades, tales como la selección de esquemas de manejo, la producción de rollizos y la asignación de transporte (Laroze *et al.*, 1997).

En relación a la cosecha forestal, los modelos de simulación se orientan a la estimación de tasas de producción de diversos sistemas de cosecha, la duración y los costos asociados a las operaciones, pudiendo evaluarse diferentes escenarios y configuraciones de equipos. Por otro lado, los principales modelos optimizantes utilizados en nuestro país permiten, por ejemplo, la selección de rodales a cosechar, maquinarias a utilizar y esquemas de trozado a aplicar (OPTICORT), el diseño óptimo de caminos (PLANEX), las decisiones de comercialización y transporte de rollizos (MAXBEN) y apoyo en las decisiones diarias de cosecha (ASIPRO) y transporte (ASICAM), entre otras cosas.

Este artículo muestra la aplicación de un modelo de programación lineal a una situación particular de planificación de cosecha, dejando de manifiesto la flexibilidad de dicha técnica y la factibilidad y conveniencia de su utilización en el proceso de toma de decisiones.

## MATERIAL Y METODOS

El modelo fue resuelto utilizando el software de optimización Lingo 4.0 en interacción con Mi-

crosoft Excel 97, el cual provee una adecuada interfaz que permite el ingreso de la información requerida por el modelo, a la vez que facilita la presentación de soluciones, quedando disponibles al usuario todas las funciones propias del software. Adicionalmente, el uso de planillas electrónicas permite la generación de ciertos coeficientes técnicos utilizados en el proceso de optimización.

**DESCRIPCION DEL MODELO.** El modelo es de tipo lineal entero con variables binarias (0-1) asociadas a la selección de sistemas de madereo y a restricciones lógicas. Sus principales componentes se señalan a continuación (Palma, 1999).

*Horizonte de planificación:* está compuesto por 5 períodos, cuya longitud es definida por el usuario, pero se sugiere un horizonte total de aproximadamente 3 meses (ver cuadro 1). El horizonte es móvil, por lo que se implementa la solución del primer período de planificación, manteniéndose los otros períodos como referencia.

*Función objetivo:* consiste en la minimización de los costos totales relevantes para el horizonte de planificación considerado e incluyen los costos de faenas (volteo, desrame, madereo, trozado, ordenamiento y carguío) y de traslado de maquinaria entre unidades de cosecha. El costo de transporte de la producción no es relevante para las condiciones del problema, por lo que no es considerado en la función objetivo.

*Variables de decisión:* incluyen la selección de las unidades a cosechar a lo largo del horizonte de planificación y la asignación de los sistemas de cosecha<sup>1</sup> a utilizar en cada caso. Al respecto, como unidades de cosecha se consideran las zonas dentro de cada predio que presentan características similares para efectos del uso de equipos de madereo, distinguiéndose entre zonas de madereo aéreo y terrestre. Junto con esto, se determinan las cantidades requeridas de maquinaria de carguío y de motosierristas necesarios para las labores de volteo, desrame y trozado de la madera.

<sup>1</sup> Corresponden a combinaciones de maquinaria de madereo definidas previamente por el usuario y que se encuentran diferenciados en sistemas de madereo aéreos y terrestres (cuadro 5).

*Restricciones:* el conjunto de restricciones asegura volúmenes mínimos de producción aserrable en cada período de planificación y limita la madera a cosechar y la utilización de recursos productivos a su disponibilidad. Por otro lado, un conjunto de restricciones lógicas permite enmarcar las decisiones dentro de los requerimientos técnicos de las faenas de cosecha, como son el desarrollo de faenas continuas en el tiempo y la extracción total de madera al finalizar las faenas, entre otras.

## FORMULACION MATEMATICA

### Nomenclatura utilizada

#### *Subíndices:*

$i, j$  : Unidades de cosecha disponibles.  
 $s$  : Sistemas de cosecha.  
 $m$  : Maquinaria de madereo.  
 $t$  : Períodos de planificación.

#### *Variables de decisión:*

$A_{ist}, C_{ist}$  : Variables binarias de apertura y cierre de faenas en la unidad  $i$ , sistema  $s$ , período  $t$ .  
 $F_{ist}$  : Variable binaria de uso de sistema de cosecha  $s$ , en la unidad  $i$ , durante el período  $t$ .  
 $S_{is}$  : Variable binaria de asignación del sistema de cosecha  $s$  a la unidad  $i$ .  
 $V_{ist}$  : Volumen cosechado en la unidad  $i$ , con el sistema  $s$ , durante el período  $t$ . [ $m^3$ ]

#### *Variables auxiliares:*

$R_{mijt}$  : Cantidad de maquinaria  $m$  enviada desde la unidad de cosecha  $i$  a la  $j$  en el período  $t$ .  
 $VT_i, VA_i$  : Volúmenes totales cosechados con los sistemas terrestre y aéreo en la unidad  $i$ . [ $m^3$ ]  
 $W_{mjt}$  : Cantidad de maquinaria  $m$  enviada desde la empresa de servicios a la unidad  $j$  en el período  $t$ .  
 $Z_{mit}$  : Cantidad de maquinaria  $m$  enviada desde la unidad  $i$  a la empresa de servicios en el período  $t$ .

#### *Parámetros de las restricciones:*

$Amin_t$  : Volumen aserrable mínimo a producir en el período  $t$ . [ $m^3$ ]  
 $B_{is}$  : Parámetro binario de uso actual del sistema de cosecha  $s$  en la unidad  $i$ .  
 $Momax$  : Cantidad máxima disponible de motosierristas.  
 $Mamax_m$  : Cantidad máxima disponible de maquinaria de madereo  $m$ .  
 $Trmax$  : Cantidad máxima disponible de trineumáticos.  
 $Vdt_t, Vda_i$  : Volúmenes totales disponible para madereo terrestre y aéreo en la unidad  $i$ . [ $m^3$ ]

#### *Coefficientes técnicos:*

$cmaq_{ms}$  : Cantidad de maquinaria  $m$  presente en el sistema  $s$ .  
 $d_t$  : Duración del período  $t$ . [días]  
 $nhj$  : Número de horas por jornada.  
 $nmd_{mi}$  : Motosierristas de desrame requeridos por la maquinaria  $m$  en la unidad de cosecha  $i$ .  
 $nmt_{mi}$  : Motosierristas de trozado requeridos por la maquinaria  $m$  en la unidad de cosecha  $i$ .  
 $nmv_{mi}$  : Motosierristas de volteo requeridos por la maquinaria  $m$  en la unidad de cosecha  $i$ .  
 $np$  : Número de períodos de planificación.  
 $ntr_{mi}$  : Cantidad de trineumáticos requeridos por la maquinaria  $m$  en la unidad de cosecha  $i$ .  
 $ppa_i$  : Proporción de producto aserrable a obtener en la unidad de cosecha  $i$ .  
 $rdto_{mi}$  : Rendimiento de la maquinaria de madereo  $m$  en la unidad de cosecha  $i$ . [ $m^3/hr$ ]

### Función objetivo

#### *Minimizar:*

$$\text{Costo Total} = CTM + \sum_i (CV_i + CD_i + CM_i + CTRO_i + CO_i)$$

Donde

$CTM$  = Costo de traslado de la maquinaria  
 $CV_i, CD_i, CM_i, CTRO_i, CO_i$  = Costos de volteo, desrame, madereo, trozado y ordenamiento por unidad de cosecha

Conjunto de restricciones

*Restricciones de disponibilidad de madera:*

[cálculo de la producción total de los sistemas terrestre y aéreo por unidad de cosecha]

$$VT_1 - \sum_{t, s \in s \text{ terr}} V_{1st} = 0 \quad \forall_{1, s}$$

$$VA_1 - \sum_{t, s \in s \text{ aéreo}} V_{1st} = 0 \quad \forall_{1, s}$$

[disponibilidad de madera por unidad de cosecha]

$$VT_1 - Vdt_1 \leq 0 \quad \forall_{1, s}$$

$$VA_1 - Vda_1 \leq 0 \quad \forall_{1, s}$$

*Restricciones de producción:*

[máxima producción posible por unidad de cosecha, sistema y período]

$$V_{1st} - \sum_m (rdto_{ms} * cmaq_{ms}) * nhj_t * d_t * F_{1st} \leq 0 \quad \forall_{1, s, t}$$

[producción aserrable mínima por período]

$$\sum_{1, s} ppa_1 * V_{1st} \geq Amin_t \quad \forall_t$$

*Restricciones de disponibilidad de recursos:*

[disponibilidad máxima de motosierristas, trineuáticos y maquinaria de madereo]

$$\sum_{1, s, m} ((nmv_{m1} + nmd_{m1} + nmt_{m1}) * cmaq_{ms} * F_{1st}) \leq Momax \quad \forall_t$$

$$\sum_{1, s, m} (ntr_{m1} * cmaq_{ms} * F_{1st}) \leq Trmax \quad \forall_t$$

$$\sum_{1, s} (cmaq_{ms} * F_{1st}) \leq Mamax_m \quad \forall_{m, t}$$

*Restricciones adicionales:*

[asignación de sistemas de madereo por unidad de cosecha]

$$\sum_t F_{1st} - np * S_{1s} \leq 0 \quad \forall_{1, s}$$

$$\sum_{s \in sist \text{ terr}} S_{1s} \leq 1 \quad \forall_1$$

$$\sum_{s \in sist \text{ aéreo}} S_{1s} \leq 1 \quad \forall_1$$

[continuidad de faenas]<sup>2</sup>

$$F_{1st} = A_{1st} + B_{1s} \quad \forall_{1, s, t=1}$$

$$(F_{1st} - F_{1st-1}) - (A_{1st} - C_{1st-1}) = 0 \quad \forall_{1, s, t > 1}$$

$$\sum_t A_{1st} + B_{1s} - 1 \leq 0 \quad \forall_{1, s}$$

$$\sum_t C_{1st} - 1 \leq 0 \quad \forall_{1, s}$$

[extracción total de madera al cerrar las faenas]

$$Vdt_1 * (1 - \sum_{t, s \in s \text{ terr}} C_{1st}) - (Vdt_1 - VT_1) \geq 0 \quad \forall_{1, s}$$

$$Vda_1 * (1 - \sum_{t, s \in s \text{ aéreo}} C_{1st}) - (Vda_1 - VA_1) \geq 0 \quad \forall_{1, s}$$

[cosecha de zonas de madereo aéreo]<sup>3</sup>

$$\sum_t (\sum_{s \in s \text{ aéreo}, p \leq t} A_{1sp}) - (1 - \sum_{s \in s \text{ aéreo}} B_{1s}) * \sum_t (\sum_{s \in s \text{ terr}, p \leq t} C_{1sp}) \geq 0 \quad \forall_{1, s}$$

[ecuaciones de traslado de maquinaria]

$$\sum_s (cmaq_{ms} * A_{1st}) - W_{mjt} = 0 \quad \forall_{m, j, t=1}$$

$$\sum_s (cmaq_{ms} * A_{1st}) - W_{mjt} - \sum_{j \neq i} R_{mijt} = 0 \quad \forall_{m, j, t > 1}$$

$$\sum_s (cmaq_{ms} * C_{1st}) - Z_{mit} - \sum_{j \neq i} R_{mijt} = 0 \quad \forall_{m, i, t}$$

**INFORMACION UTILIZADA.** Este modelo fue diseñado para condiciones específicas de operación abordadas en el trabajo de Palma (1999). El cuadro 1 muestra la duración definida para cada pe-

CUADRO 1

Antecedentes sobre períodos de planificación.  
Planning period information.

Período	Duración [días]	Prod. Aserrable Mínima [m <sup>3</sup> ]
1	5	3.500
2	5	3.500
3	10	7.000
4	20	14.000
5	20	14.000

<sup>2</sup> Basadas en Laroze *et al.*, 1997.

<sup>3</sup> Mediante estas restricciones, en cada predio se inician las faenas con torre necesariamente antes que sean cerradas las faenas de madereo terrestre.

ríodo de planificación junto con la producción mínima exigida en cada uno de ellos. Se puede observar una definición semanal que permite un mayor nivel de detalle para los períodos iniciales, para posteriormente incluir varias semanas por período hasta totalizar un horizonte de planificación aproximado de 3 meses.

En el cuadro 2 se puede apreciar la información de las unidades de cosecha (UN) disponibles, todas provenientes de la planificación anual de la cosecha y destinadas a la producción en temporada de verano.

Por otro lado, en el Cuadro 3 se encuentra la información de la maquinaria y de la mano de obra, la que consiste principalmente en sus rendimientos (carga útil en el caso del madereo terrestre y rendimiento horario para el madereo aéreo, maquinaria de carguío y motosierristas), costos (horarios y a trato) y su disponibilidad. Cabe señalar que el rendimiento horario esperado de la maquinaria de madereo terrestre es calculado de acuerdo a las condiciones particulares de operación en cada unidad de cosecha (DPM, pendientes, densidad, etc.), como lo señala Troncoso (1996). No

CUADRO 2

Información de unidades de cosecha.  
Harvesting unit information

Unidad de cosecha	Densidad [arb/ha]	Volumen [m <sup>3</sup> /ha]	Porcentaje aserrable [%]	Pend. Media Mad.		Superficies de madereo [ha]	
				Terrestre [%]	Terrestre [%]	Terrestre	Aéreo
UN-1	450	238	89	30		28	23
UN-2	300	276	92	25		72	13
UN-3	450	262	88	30		40	32

CUADRO 3

Información de maquinaria y mano de obra.  
Equipment and labor information.

ítem	Rendimiento	Costo [US\$/hr]	Sueldo a Trato [\$/m <sup>3</sup> ]	Disponibilidad
<i>Madereo terrestre*</i>				
Skidder huinche	3,8 m <sup>3</sup> /viaje	40,0	50	3
Skidder garra	4,1 m <sup>3</sup> /viaje	44,5	46	1
<i>Madereo aéreo</i>				
Torre	12,6 m <sup>3</sup> /hr	46,0	50	1
<i>Carguío</i>				
Grúa	45 m <sup>3</sup> /hr	36,0	45	5
<i>Motosierristas</i>				
Volteo	25 arb/hr	1,2	40	25
Desrame	12 arb/hr	1,2	40	25
Trozado	25 arb/hr	1,2	40	25

\* El rendimiento es calculado internamente por el modelo como función de la carga útil promedio y de características propias de operación en cada rodal (Troncoso, 1996). Para skidder huinche los rendimientos estuvieron entre 24,3 y 24,8 m<sup>3</sup>/hr, y para skidder garra entre 29,3 y 30 m<sup>3</sup>/hr.

ocurre lo mismo en el caso de equipos aéreos, en que el rendimiento se ve fuertemente afectado por la frecuencia y dificultad de instalación de las torres más que por características de las unidades de cosecha, por lo que se utiliza un valor de rendimiento promedio esperado.

El cuadro 4, por su parte, presenta la información de distancia entre las unidades de cosecha, la cual permite establecer la ubicación relativa de éstas, antecedentes relevantes al momento de decidir la secuencia temporal de las operaciones y el traslado de maquinaria. Al respecto, los costos de traslado de maquinaria (que incluyen el traslado de la respectiva maquinaria de carguío) son de \$ 4.500 y \$ 5.100 por kilómetro, para las líneas de madereo terrestre y aérea, respectivamente.

Finalmente, para el desarrollo de la planificación se consideraron jornadas de trabajo de 9 horas, un tipo de cambio de \$ 468 = US\$ 1 y la definición de sistemas de madereo mostradas en la nota del cuadro 5.

CUADRO 4

Distancia entre unidades de cosecha.  
Distance between harvesting units.

Origen	Distancia según destino [km]		
	UN-1	UN-2	UN-3
Contratistas	87	79	92
<i>Unidades:</i>			
UN-1		8	179
UN-2	-		171
UN-3	-	-	-

## RESULTADOS

La solución generada significó un valor para la función objetivo de US\$ 241.329, que representa el costo total de las faenas mencionadas anteriormente para la cosecha de los primeros tres meses de la temporada 1999. El modelo fue corrido en un computador Pentium de 133 MHz, encontrándose una solución al problema en un tiempo aproximado de 18 minutos.

ASIGNACION DE SISTEMAS DE COSECHA. La solución generada, mostrada en el cuadro 5, indica el inicio de faenas en las unidades de cosecha UN-2 y UN-3, asignando 2 líneas de skidder huinche (sistema 3) en el primer caso, y 1 línea de skidder garra y 1 de madereo con torre (sistemas 2 y 5) en el segundo. Las decisiones para los períodos posteriores podrán servir de referencia al planificador en cuanto al inicio y término aproximado de las faenas, teniendo en consideración el menor nivel de detalle de los períodos finales. Es necesario recordar que las decisiones implementadas corresponden a las del período inicial, y que es posible que las de períodos futuros se modifiquen en corridas posteriores en la medida que se actualice la información y se ingresen nuevos rodales disponibles para los meses siguientes (horizonte móvil). Al respecto, en la siguiente corrida del modelo se deberán fijar los sistemas de cosecha en aquellas unidades en que se encuentran trabajando, de modo que las decisiones futuras sean consistentes con las actuales.

RESULTADOS GENERALES POR PERIODO. Los resultados generales del uso de recursos productivos en cada período de planificación se muestran en el

CUADRO 5

Asignación de sistemas de cosecha\* por unidad y período.  
Table 5. Harvesting system allocation by unit and period.

Unidad de cosecha	Período de planificación				
	1	2	3	4	5
UN-1				5	2 - 5
UN-2	3	3	3	3	3
UN-3	2 - 5	2 - 5	2 - 5	2 - 5	5

\* Sistemas: 1 = 1 sk. huinche; 2 = 1 sk. garra; 3 = 2 sk. huinche; 4 = 1 sk. huinche y 1 sk. garra; 5 = 1 torre.

cuadro 6. Estos indican que los niveles de producción exigidos podrían alcanzarse con el uso de 3 skidder y la torre de madereo disponible. Asimismo, los requerimientos de motosierristas y maquinaria de carguío permiten conocer la utilización y liberación de recursos a lo largo del horizonte de planificación.

El uso excesivo de maquinaria en los períodos finales se produce por la ausencia de restricciones en su disponibilidad máxima para los períodos 4 y 5. Esto ocurre debido a que, producto de su extensión (los últimos dos períodos totalizan 8 semanas de operaciones), la maquinaria utilizada en estos períodos, aunque fuera por pocos días, no queda disponible para ser usada en otras unidades, resul-

tando en frecuentes soluciones infactibles. No obstante lo anterior, esto no representa inconvenientes dado que se trata de un horizonte de planificación móvil en que dichos períodos serán planificados en detalle en corridas posteriores del modelo.

**RESULTADOS POR UNIDAD DE COSECHA.** Conocidas las decisiones de inicio de faenas para el primer período, se puede obtener una información más detallada de las operaciones realizadas en las distintas unidades de cosecha, como se muestra en el cuadro 7. Así, por ejemplo, en UN-3 la cuadrilla utilizada para la línea de madereo terrestre (skidder garra) debiera estar formada por 2, 4 y 2 motosierristas en las faenas de volteo, desrame y

CUADRO 6

Asignación de recursos y producción por período.  
Resource allocation and production by period

Concepto	Período de planificación				
	1	2	3	4	5
<i>Recurso</i>					
Skidder huinche	2	2	2	2	2
Skidder garra	1	1	1	1	1
Torre	1	1	1	2	2
Motosierristas	20	20	20	24	24
Grúa	4	4	4	5	5
<i>Producción</i>					
Pulpable [m <sup>3</sup> ]	386	384	7618	1619	1562
Aserrable [m <sup>3</sup> ]	3500	3500	70000	14000	14000
Total [m <sup>3</sup> ]	3886	3884	77618	15619	15562

CUADRO 7

Asignación de recursos por unidad de cosecha.  
Resource allocation by harvesting units

Concepto	UN-2			UN-3		
	Sk. huinche	Sk. Garra	Torre	Sk. huinche	Sk. garra	Torre
Número de líneas	2	0	0	0	1	1
Motosierristas - Volteo	2	0	0	0	2	1
Motosierristas - Desrame	4	0	0	0	4	2
Motosierristas - Trozado	2	0	0	0	2	1
Grúa	2	0	0	0	1	1

trozado, respectivamente. En UN-2, y producto del menor rendimiento esperado con el skidder huinche, cada línea de madereo estará formada por 1 motosierrista volteando, 2 desramando y 1 trozando, además de su correspondiente maquinaria de carguío. En el caso del madereo aéreo, la única torre disponible es asignada a UN-3, dada la exigencia del modelo de comenzar estas faenas antes de terminar la cosecha con skidder (restricción) y la poca disponibilidad de maquinaria; de este modo, en corridas posteriores del modelo el equipo de madereo aéreo será asignado a la unidad de cosecha UN-2.

**RESULTADO DE COSTOS.** Finalmente, el cálculo de costos para la programación propuesta de la cosecha en UN-2 y UN-3 fue de US\$ 3,7/m<sup>3</sup> y US\$ 3,5/m<sup>3</sup>, respectivamente, para el caso del madereo terrestre. Estos valores debieran representar una reducción en los costos de cosecha como resultado de una organización espacio-temporal del uso de los recursos disponibles (Palma, 1999).

El cálculo del rendimiento de los equipos de madereo para las condiciones particulares de operación de cada unidad es un factor fundamental, pues es la base para lograr la óptima asignación espacial y temporal de los recursos, es decir, que a cada unidad se asigne el equipo más eficiente, en la medida que la solución global lo permita. Este efecto no es posible de observar en el caso de la asignación del equipo de madereo aéreo, en que los US\$ 7,3/m<sup>3</sup> registrados en UN-3 (en UN-2 no se utiliza torre durante el horizonte de planificación) pueden no significar una reducción en los costos de cosecha producto de la ausencia de un cálculo de rendimientos para distintas condiciones de terreno, y a la falta de otras opciones de maquinaria.

Idealmente, la programación de las operaciones de cosecha deberá reevaluarse cada 1 ó 2 semanas, repitiendo el proceso de optimización con los nuevos datos de entrada. Las modificaciones en estos datos estarán principalmente en las superficies que quedarán disponibles para la cosecha, y en la renovación de las unidades disponibles para cosechar. Además, se deberán fijar los sistemas de cosecha que se encuentran funcionando en cada unidad de cosecha, de modo que las futuras decisiones tomen en consideración las decisiones pasadas.

## CONCLUSIONES

El trabajo muestra la factibilidad de utilizar herramientas de optimización en empresas de tamaño mediano dada la actual existencia de paquetes de optimización de fácil manejo y la flexibilidad para modelar una gran cantidad de situaciones, facilitando el trabajo de los encargados de la planificación y mejorando la calidad de las decisiones.

En este sentido, la calidad de las soluciones generadas por este tipo de modelos va a depender de la calidad de la información disponible. En este caso, la solución presentada resultó ser bastante robusta frente a distintos valores de los principales parámetros y coeficientes, siendo principalmente sensible a los coeficientes de rendimiento de los equipos de madereo (cambios de un 10% en los rendimientos del madereo terrestre en distintas unidades de cosecha significaron una asignación absolutamente distinta). La relación existente entre la producción de los equipos en las distintas unidades de cosecha determina la asignación de la maquinaria a cada lugar, de modo de conseguir un aprovechamiento máximo de los equipos de acuerdo a las condiciones particulares de trabajo. En este punto resulta importante contar con buenos métodos de estimación de los rendimientos de la maquinaria o, de lo contrario, las decisiones obtenidas no tendrán validez.

Por otro lado, dado el alto costo del madereo aéreo en relación con el madereo terrestre, el uso de modelos matemáticos como apoyo al proceso de toma de decisiones en la cosecha forestal debe tener en consideración la necesidad de exigir, de una u otra forma, la cosecha de las unidades destinadas a madereo aéreo. De no ser así, dichas unidades nunca serían consideradas en la solución óptima.

No obstante los beneficios de la utilización de estos sistemas de apoyo a la toma de decisiones, debemos tener presente que corresponden a representaciones simplificadas de la realidad, lo que hace que sólo deban ser consideradas como una ayuda al planificador, sirviendo como complemento de mucha utilidad al criterio y experiencia de los profesionales del campo forestal.

## BIBLIOGRAFIA

- CONWAY, S. 1982. *Logging Practice: Principles of Timber Harvesting Systems*. Miller Freeman Publications, San Francisco, USA, 432 p.
- GARCIA, O. 1990. "Linear Programming and Related Approches in Forest Planning", *New Zealand Journal of Forestry Science* 20(3): 307-331.
- KENT, B. 1989. *Forest Service Land Management Planners' Introduction to Linear Programming*. Gen. Tech. Rep. RM-173. USDA Forest Service. 36 p.
- LAROZE, A., P. PINTO, F. MUÑOZ. 1997. "Evaluación de diferentes modelos de optimización para la planificación de faenas silvícolas", *Bosque* 19(1): 13-26.
- MORALES, R., A. WEINTRAUB. 1989. *El enfoque jerárquico en la planificación forestal*. Actas II Taller de Producción Forestal, Fundación Chile, Concepción, Chile.
- PALMA, C. 1999. *Modelo de planificación operativa de cosecha para Forestal Copihue S.A.* Tesis de Pregrado, Departamento de Cs. Forestales, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile. 46 p.
- TRONCOSO, J. 1996. *PLADEC: Un modelo para la planificación de sistemas de cosecha en Pinus Radiata*. Tesis de Licenciado en Ciencias Forestales, Universidad de Talca, Chile. 90 p.