

## MODELACION DE LOGISTICA ESTRATEGICA EN LA INDUSTRIA FORESTAL

Rodrigo Garrido Hidalgo<sup>1</sup> y Juan José Troncoso<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería de Transporte

<sup>2</sup> Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal

Pontificia Universidad Católica de Chile

Casilla 306, Cod. 105, Santiago 22, Chile

Tel: 56-2-686 4270 Fax: 56-2-553 0281

[rgarrido@ing.puc.cl](mailto:rgarrido@ing.puc.cl), [jtroncot@puc.cl](mailto:jtroncot@puc.cl)

### RESUMEN

Este artículo presenta una modelación matemática para el Problema de Producción y Logística en la Industria Forestal. Específicamente se formuló un modelo dinámico de programación mixta para resolver tres problemas comunes en el ámbito forestal, el de Producción Forestal, el de Localización de Instalaciones Forestales y el de Distribución de Carga Forestal.

El modelo matemático implementado permite la elección estratégica del sitio y tamaño óptimos para la instalación forestal que se desee construir, además de la identificación de los niveles de producción y de los flujos de carga que se generarán en el horizonte de planificación considerado.

Finalmente se realizó la aplicación práctica del modelo, validando su utilidad en la localización de un aserradero. El modelo fue óptimamente resuelto utilizando LINGO 5.0, el cual también permitió evaluar la capacidad de respuesta del modelo frente a cambios en la información considerada en la planificación inicial, así como la comparación de las decisiones y los tiempos de solución para distintos escenarios de demanda, de costos de transporte, de precios de compra de madera aserrable, y de rendimientos del proceso de aserrío.

## 1. INTRODUCCION

El auge económico de Chile en la última década ha sido acompañado por un fuerte desarrollo del sector forestal chileno, particularmente en base a plantaciones de *Pinus radiata* y del género *Eucalyptus*. Lo anterior ha motivado la creación de grandes plantas de transformación de la madera, en especial plantas de celulosa, aserraderos y plantas de tableros, principalmente orientados a la exportación de sus productos.

Al analizar las proyecciones de disponibilidad de madera a futuro (INFOR, 1999), se advierte que habrá un déficit de instalaciones forestales, en especial, plantas de transformación mecánica (Aserraderos, Plantas de Tableros y Chapas, Plantas de Remanufactura, entre otras), debido a que la madera aserrable disponible se duplicará en el trienio 2001-2003 y casi se triplicará para el trienio 2025-2027. Esto motiva la necesidad de rápidas decisiones estratégicas, pues se deberá disponer de la capacidad instalada que permita procesar toda esa madera, y a la vez, comercializarla en el mercado internacional transformada en productos con alto valor agregado.

Este artículo presenta un enfoque de modelación matemática para el Problema de Producción y Logística Integrada en la Industria Forestal. Se modela simultáneamente los problemas de Producción Forestal (PPF), Localización de Instalaciones Forestales (PLIF) y de Distribución de Carga Forestal (PDCF), de manera que pueda servir de apoyo a la toma de decisiones para futuras inversiones en plantas de transformación, relativo a su localización y tamaño óptimo conjuntamente con la planificación agregada de la producción y transporte de productos forestales.

## 2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA A ESTUDIAR

La optimización de una cadena logística debe partir en la generación/extracción de materias primas transportables para luego avanzar hasta el consumidor final. Así, en la industria forestal existen dos fuentes principales en la generación de carga: primero los bosques, quienes abastecerán con la madera necesaria a la instalación localizada para fabricar los distintos tipos de productos, y segundo la instalación que elaborará los productos terminados en función de las demandas proyectadas.

Para el caso del PPF, a nivel mundial existen varios sistemas desarrollados con programación matemática y que permiten su planificación estratégica, sin embargo, ninguno integra tales decisiones con las de localización de instalaciones. En el ámbito nacional, la única herramienta desarrollada para la planificación estratégica es la presentada en (Epstain *et al.*, 1999), y denominada MEDFOR. Este software apoya las decisiones de producción de madera, para un horizonte de planificación dado, así como el flujo hacia las plantas industriales, sin embargo, tampoco integra las decisiones de localización.

Son pocas las publicaciones que han abordado el PLIF, remitiéndose básicamente a la evaluación de posibles localizaciones de plantas procesadoras de madera en un esquema de enumeración de posibilidades, como por ejemplo el caso de plantas de OSB (Oriented Strandboard) (ver Lin *et al.*, 1996). También es posible encontrar algunas aplicaciones de la teoría de localización de instalaciones a la planificación de la cosecha forestal (Dykstra y Riggs, 1977).

El objetivo principal de este artículo es generar un modelo de planificación estratégica para resolver en forma conjunta los problemas PPF, PLIF y PDCF, considerando todas las particularidades de la industria forestal y adaptado para ser aplicado a distintos tipos de instalaciones forestales (IF). El modelo será capaz de indicar la construcción de  $p$  IF en sitios previamente definidos como posibles, agrupados en tres categorías: sitios en zonas de predios, sitios en zonas de demanda y sitios en interzonas (entre los dos anteriores).

Por otra parte, además de definir el lugar y el tamaño de la instalación, también habrá que determinar si es necesaria una expansión de la capacidad instalada en cualquiera de los períodos de planificación.

Unido a los problemas anteriores está el de cuantificar la producción de madera, identificando los niveles de cosecha o extracción por período en cada rodal, con el objeto de abastecer a la IF con la cantidad de madera necesaria para producir el volumen de producto demandado. Adicionalmente, si la oferta propia de madera fuese insuficiente en cualquiera de los períodos, será posible realizar la compra de madera a terceros.

Finalmente, también se deberá planificar la distribución de carga forestal, identificando los distintos flujos de madera y de productos que se generarán entre los diferentes pares origen-destino en cada período, de modo que se pueda planificar el transporte global de carga forestal desde los bosques hacia la IF y desde ésta hacia los centros de demanda. Con esto último será posible identificar, a nivel estratégico, qué rutas serán las usadas para el transporte de madera y de productos, y cuántos camiones serán necesarios para el traslado de dicha carga. Así, el problema a tratar puede definirse como Problema Dinámico de Producción y Logística Integrada en la Industria Forestal (PDPLIIF).

## 2.1. Sitios Posibles de Localización y Distancias de Transporte

En la literatura usualmente se ha utilizado un grafo bipartito para modelar los problemas de localización, considerando un primer conjunto de nodos para representar todos los sitios disponibles para la localización, y en el segundo grupo aquellos correspondientes a los centros de demanda. Este enfoque implica el considerar sólo los costos de distribución de los productos terminados y no se incluya el costo de transporte de las materias primas que también es afectado por la ubicación de la instalación. Por esta razón, el enfoque de este artículo utiliza un grafo completo con tres conjuntos de nodos como se indica en la Figura 1 (ver anexo), de manera similar a la utilizada por Faminow y Sarhan (1983) y Klincewicz (1990), con la diferencia de que estos autores no consideran arcos entre los nodos de un mismo conjunto de sitios.

## 2.2. El Tamaño de la Instalación y la Posibilidad de Expansión

Pese a que en la literatura son pocas las aplicaciones que además de definir la ubicación óptima entregan el tamaño óptimo de la instalación (ver Klof y Blakley, 1971; Faminow y Sarhan, 1983; Swersey y Thakur, 1995 y Lin *et al*, 1996), el modelo presentado en este artículo determina conjuntamente ambas variables. Para ello, junto con todos los sitios posibles que tiene el problema para localizar la IF, también se cuenta con un número dado de posibles tamaños para

darle a la instalación, y cuya decisión está influenciada principalmente por las demandas que existan en los distintos períodos. Para ello, se aprovechan las ventajas de modelos de localización dinámicos (múltiples períodos), que permiten decidir, posterior a la construcción de la instalación, alguna expansión de su capacidad en cualquiera de los períodos en que la demanda sea mayor que la capacidad instalada inicial. De esta manera, el modelo determina cuándo resulta más conveniente realizar una expansión de la capacidad de la IF para satisfacer las demandas.

### **2.3. Niveles de Corte de Madera y su Transporte**

A diferencia de otras aplicaciones forestales previas, este modelo permite determinar los niveles de cosecha en los rodales que abastecerán de madera a la IF, en cada uno de los períodos. Esta información permitirá guiar otro tipo de decisiones a nivel estratégico, como por ejemplo la planificación de la red de caminos que será necesario disponer, y algunas decisiones de cosecha forestal. Un factor importante para definir los niveles de cosecha de madera, es que la variable de decisión será la cantidad de hectáreas cortadas por período, en cada uno de los rodales que conforman los distintos predios. Esto requiere utilizar el crecimiento volumétrico del bosque como un dato de entrada (proveniente de algún modelo externo de proyección) y con ello posibilitar que en la superficie no cortada en un período dado, se siga incrementando el volumen disponible por hectárea para su futuro aprovechamiento. Además de los niveles de cosecha, el modelo presentado también determina los flujos de madera desde los predios hacia la ubicación seleccionada, por lo que será posible identificar las rutas que serán utilizadas en cada período, y por ende, determinar los caminos a usar y la cantidad de camiones que se necesitarán para el transporte de toda esa madera.

## **3. FORMULACIÓN MATEMÁTICA DEL MODELO**

El modelo formulado para resolver el Problema Dinámico de Producción y Logística Integrada en la Industria Forestal (PDPLIF), corresponde a un modelo dinámico de programación mixta de acuerdo a la siguiente nomenclatura:

Índices:

- i : Predios forestales. (1, ..., I)
- r : Rodales en cada Predio. (1, ..., R)
- j : Nodos intermedios. (1, ..., J)
- n, m : Centros de demanda. (1, ..., N)
- s : Tamaños posibles de la instalación. (1, ..., S)
- k : Niveles posibles de expansión en capacidad (1, ..., K)
- t, p : Período de planificación. (1, ..., T)

Variables:

- $\rho$  : Tasa de descuento del capital.
- $CTA_t$  : Costo total de abastecimiento de madera en el período  $t$ .
- $CTTM_t$  : Costo total de transporte de madera en el período  $t$ .

- $CTO_t$ : Costo total de producción en el período  $t$ .  
 $CTTP_t$ : Costo total de transporte de productos en el período  $t$ .  
 $CTE_t$ : Costo de expansión de la capacidad productiva en el período  $t$ .  
 $CFI_t$ : Costo fijo de instalación en el período  $t$ .  
 $LP_{ist}$ : Variable binaria que indica si una instalación de tamaño  $s$  se localiza en el predio  $i$  en el período  $t$ .  
 $LI_{jst}$ : Variable binaria que indica si una instalación de tamaño  $s$  se localiza en el nodo intermedio  $j$  en el período  $t$ .  
 $LD_{nst}$ : Variable binaria que indica si una instalación de tamaño  $s$  se localiza en el centro de demanda  $n$  en el período  $t$ .  
 $CAPI$ : Nivel de capacidad de producción inicial seleccionada por el modelo.  
 $cap_s$ : Capacidad de producción para una instalación de tamaño  $s$ .  
 $capx_k$ : Capacidad adicional de producción para una expansión de nivel  $k$ .  
 $EX_{kt}$ : Variable binaria que indica si la capacidad de producción de la instalación se aumenta en un nivel  $k$  durante el período  $t$ .  
 $D_{nt}$ : Nivel de demanda en el centro de demanda  $n$ , en el período  $t$ .  
 $SUCO_{irt}$ : Superficie a cosechar en el rodal  $r$  perteneciente al predio  $i$  en el período  $t$ .  
 $Sudi_{ir}$ : Superficie disponible para corta en el rodal  $r$  perteneciente al predio  $i$ .  
 $VCOR_{it}$ : Volumen de madera cortada en el predio  $i$  en el período  $t$ .  
 $vol_{irt}$ : Volumen de madera cosechable por unidad de superficie del rodal  $r$  perteneciente al predio  $i$  en el período  $t$ .  
 $RMA_t$ : Requerimiento total de madera en el período  $t$ .  
 $fconv$ : Factor de conversión de una unidad de producto en volumen de madera.  
 $VOLT_t$ : Volumen total de madera cosechada desde los predios en el período  $t$ .  
 $MAC3_t$ : Volumen de madera comprada a terceros en el período  $t$ . [ $m^3$ ])  
 $VMTP_{ilt}$ : Volumen de madera transportada desde el predio  $i$  hasta la instalación localizada en el predio  $l$ , durante el período  $t$ .  
 $VMTI_{ijt}$ : Volumen de madera transportada desde el predio  $i$  hasta la instalación localizada en el nodo intermedio  $j$ , durante el período  $t$ .  
 $VMTD_{int}$ : Volumen de madera transportada desde el predio  $i$  hasta la instalación localizada en el centro de demanda  $n$ , durante el período  $t$ .  
 $VPTP_{int}$ : Volumen de producto transportado desde la instalación localizada en el predio  $i$  hasta el centro de demanda  $n$ , durante el período  $t$ .  
 $VPTI_{jnt}$ : Volumen de producto transportado desde la instalación localizada en el nodo intermedio  $j$  hasta el centro de demanda  $n$ , durante el período  $t$ .  
 $VPTD_{mnt}$ : Volumen de producto transportado desde la instalación localizada en el centro de demanda  $m$  hasta el centro de demanda  $n$ , durante el período  $t$ .

$$\text{Min VPN} = \sum_{t=1}^T \left\{ \frac{CTA_t + CTTM_t + CTO_t + CTTP_t + CTE_t + CFI_t}{(1+\rho)'} \right\} \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{i=1}^I \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T LP_{ist} + \sum_{j=1}^J \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T LI_{jst} + \sum_{n=1}^N \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T LD_{nst} \leq p \quad (2)$$

$$CAPI_t = \sum_{s=1}^S \left[ cap_s \left( \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^{t-1} LP_{isp} + \sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^{t-1} LI_{jsp} + \sum_{n=1}^N \sum_{p=1}^{t-1} LD_{nsp} \right) \right] \quad \forall t \quad (3)$$

$$\sum_{p=1}^{t-1} CAPI_p + \sum_{k=1}^K \left( capx_k \sum_{p=1}^{t-1} EX_{kp} \right) \geq \sum_{n=1}^N D_{nt} \quad \forall t \quad (4)$$

$$\sum_{s=1}^K \sum_{t=1}^T LP_{ist} \leq 1 \quad \forall i \quad (5)$$

$$\sum_{s=1}^K \sum_{t=1}^T LI_{ist} \leq 1 \quad \forall i \quad (6)$$

$$\sum_{s=1}^K \sum_{t=1}^T LD_{ist} \leq 1 \quad \forall i \quad (7)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T EX_{kt} \leq q \quad (8)$$

$$\sum_{k=1}^K EX_{kt} \leq 1 \quad \forall t \quad (9)$$

$$\sum_{t=1}^T SUCO_{rt} \leq Sudi_r \quad \forall i, r \quad (10)$$

$$VCOR_u = \sum_{r=1}^R (vol_{rt} \times SUCO_{rt}) \quad \forall i, t \quad (11)$$

$$RMA_t = \left( fconv \times \sum_{n=1}^N D_{nt} \right) \quad \forall t \quad (12)$$

$$VOLT_t = \sum_{i=1}^I VCOR_u \quad \forall t \quad (13)$$

$$VOLT_t + MAC3_t = RMA_t \quad \forall t \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^I VMTP_{it} \leq \left( \sum_{s=1}^S LP_{is} \right) \times RMA_t \quad \forall i, t \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^J VMTI_{jt} \leq \left( \sum_{s=1}^S LI_{js} \right) \times RMA_t \quad \forall j, t \quad (16)$$

$$\sum_{i=1}^N VMTD_{int} \leq \left( \sum_{s=1}^N LD_{ns} \right) \times RMA_t \quad \forall n, t \quad (17)$$

$$\sum_{i=1}^I VMTP_{it} + \sum_{j=1}^J VMTI_{jt} + \sum_{n=1}^N VMTD_{int} = VCOR_u \quad \forall i, t \quad (18)$$

$$VPTP_{int} = \left( \sum_{s=1}^S LP_{is} \right) \times D_{nt} \quad \forall i, n, t \quad (19)$$

$$VPTI_{jnt} = \left( \sum_{s=1}^S LI_{js} \right) \times D_{nt} \quad \forall j, n, t \quad (20)$$

$$VPTD_{mnt} = \left( \sum_{s=1}^S LD_{ms} \right) \times D_{nt} \quad \forall m, n, t \quad (21)$$

La función objetivo (1) minimiza el valor presente de los costos totales de abastecimiento y transporte de madera, los costos de operación, los costos de transporte de productos y los costos fijos de expansión en el período que corresponda, además de la inversión asociada a la construcción de la instalación en cualquiera de los sitios disponibles. Las restricciones del modelo establecen lo siguiente: (2) se puede construir a lo más  $p$  instalaciones de un tamaño dado. (3) cada tamaño de instalación tiene una capacidad de producción inicial fija. (4) la capacidad inicial de cada instalación más una posible expansión (en cualquier período), debe ser a lo menos igual a la demanda total en cada período de planificación. (5), (6), (7) a lo más una instalación de cualquier tipo puede activarse en cada predio, nodo intermedio y nodo de demanda. (8) se permite a lo más  $q$  expansiones de capacidad en todo el horizonte de planificación, en que cada expansión aumenta la capacidad en una cantidad fija, dentro de  $K$  posibilidades. (9) en un mismo período sólo puede haber a lo más un tipo de expansión. (10) la superficie a cortar en cada rodal (de cualquier predio) no puede sobrepasar la superficie disponible. (11) entregan el volumen total de madera cortada desde cada predio por período, en base a la multiplicación del volumen de madera por hectárea ( $vol_{irt}$ ) que habría durante un período determinado en cualquiera de los rodales, por la superficie cosechada en ese rodal. De esta manera es posible calcular el volumen cortado sin la necesidad de trabajar con inventarios, ya que el término  $vol_{irt}$  refleja el crecimiento de madera por hectárea de un período a otro. (12) entregan la cantidad de madera requerida por período para producir una cantidad dada de producto terminado. Para tal efecto se utiliza un factor de conversión ( $\geq 1$ ) que transforma los  $m^3$  de productos terminados en  $m^3$  de madera. (13) indican los volúmenes totales de madera cosechada por período desde todos los predios intervenidos. (14) aseguran que los requerimientos de madera sean satisfechos con oferta propia o a través de compra de madera a terceros por cada período. (15), (16) y (17) establecen el volumen total máximo de madera transportada desde los distintos predios hacia las instalaciones. (18) obligan a que la madera transportada desde cada predio por período, sea igual al volumen de madera cortado en ese predio. (19), (20) y (21) entregan el volumen total de producto transportado desde las instalaciones hacia los distintos centros de demanda.

Adicionalmente se necesitan las siguientes ecuaciones de costos:

$$CTA_t = p0_t \times VOLT_t + p3_t \times MADC3_t \quad \forall t \quad (22)$$

donde:

$p0_t$ : Precio por abastecimiento de madera desde bosques propios en el período  $t$ .

$p3_t$ : Precio por abastecimiento de madera desde terceros en el período  $t$ .

$$CTTM_t = ctm_t \times \left\{ \left( \sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^I dpp_{il} \times VMTP_{il} \right) + \left( \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J dpi_{ij} \times VMTI_{ijt} \right) + \left( \sum_{i=1}^I \sum_{n=1}^N dpd_{in} \times VMTD_{int} \right) \right\} \quad \forall t \quad (23)$$

donde:

$ctm_t$ : Costo de transporte de madera por unidad de distancia en el período  $t$ .

$dpp_{il}$ : Distancia de transporte entre los predios  $i$  y  $l$ .

$dpi_{ij}$ : Distancia de transporte entre el predio  $i$  y el nodo intermedio  $j$ .

$dpd_{in}$ : Distancia de transporte entre el predio  $i$  y el centro de demanda  $n$ .

$$CTO_t = \left[ cop_t \times \left( \sum_{n=1}^N D_{nt} \right) \right] \quad \forall t \quad (24)$$

donde:

$cop_t$ : Costo unitario de producción durante el período  $t$ .

$$CTTP_t = ctpro_t \times \left\{ \left( \sum_{i=1}^I \sum_{n=1}^N dpd_{in} \times VPTP_{int} \right) + \left( \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N did_{jn} \times VPTI_{jnt} \right) + \left( \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N ddd_{mn} \times VPTD_{mnt} \right) \right\} \quad \forall t \quad (25)$$

donde:

$ctpro_t$ : Costo de transporte de producto por unidad de distancia en el período  $t$ .

$did_{jn}$ : Distancia de transporte entre el nodo  $j$  y el centro de demanda  $n$ .

$ddd_{mn}$ : Distancia de transporte entre los centros de demanda  $m$  y  $n$ .

$$CFI = \left[ \left( \sum_{i=1}^I \sum_{s=1}^S cfp_{is} \times LP_{is} \right) + \left( \sum_{j=1}^J \sum_{s=1}^S cfli_{js} \times LI_{js} \right) + \left( \sum_{n=1}^N \sum_{s=1}^S cfd_{ns} \times LD_{ns} \right) \right] \quad (26)$$

donde:

$cfp_{is}$ : Costo fijo de localizar una instalación de tamaño  $s$  en el predio  $i$ .

$cfli_{js}$ : Costo fijo de localizar una instalación de tamaño  $s$  en el nodo  $j$ .

$cfds_{ns}$ : Costo fijo de localizar una instalación de tamaño  $s$  en el centro de demanda  $n$ .

$$CTE_t = \left( \sum_{k=1}^K cex_{kt} \times EX_{kt} \right) \quad \forall t \quad (27)$$

donde:

$cex_{kt}$ : Costo de expandir la capacidad en un nivel  $k$  en el período  $t$ .

Cuyo significado es el siguiente:

(22) el costo total de abastecimiento de madera por período es la suma del costo por cosecha de madera en bosques propios y el gasto en compra de madera a terceros. (23) el costo total de transporte de madera es el producto del costo por unidad de distancia (US\$/m<sup>3</sup>-km) de transporte de madera, por la suma de todos los volúmenes transportados entre todos los pares posibles. (24) determinan los costos totales de producción por período, multiplicando el costo unitario de producción por la demanda total del producto. (25) calculan el costo total de transporte del producto elaborado (análogamente a 23). (26) calcula el costo de inversión de construir la instalación de un tamaño dado, en cualquiera de los sitios disponibles para la localización. Para ello, cada una de las variables de localización y tamaño, es multiplicada por el costo total de inversión (costo de terreno, habilitación de terreno y costo de construcción completa de la planta) existente para cada combinación de ubicación y tamaño. La ecuación (3f) es la que cuantifica el costo total por concepto de inversión en expansión de la capacidad de producción de la planta, para lo cual se multiplica la variable de expansión que establece el nivel de aumento y el período a realizarla, por el costo de expandir en un cierto nivel k en cada período.

## 4. APLICACIÓN DEL MODELO

### 4.1. Instancia Resuelta

La instancia estudiada consistió en la localización de un nuevo aserradero en la VIII Región de Chile que implica la decisión de dónde y de qué tamaño se construirá el aserradero, y cuáles serán las producciones y los flujos de madera aserrable y aserrada en todos los períodos del horizonte de planificación. Esta instancia fue resuelta utilizando el modelo implementado para la solución del Problema Dinámico de Producción y Logística Integrada en la Industria Forestal (PDPLIIF), considerando las dimensiones que se presentan en la Tabla 1 (ver anexo).

### 4.2. Topología de la Red

Los 20 predios que se indican en la Tabla 1 están ubicados en diferentes puntos entre la VIII y IX Región de Chile. Los nodos intermedios se localizaron en empalmes identificados se ubican generalmente a un costado de la Carretera Panamericana Sur. Finalmente, los nodos de demanda se encuentran representados por las ciudades de Chillán, Concepción y Los Angeles, las cuales constituyen lo que se denomina mercado nacional. El resto corresponde a mercado de exportación, por lo que el nodo de demanda considerado es el Puerto de San Vicente.

Luego de definir las posibles ubicaciones geográficas para los 20 predios, 10 nodos intermedios y 4 nodos de demanda, se procedió a determinar las distancias mínimas de transporte entre cada par de nodos. La red resultante, que posee en total 34 nodos, corresponde a una red fuertemente conexa. Estas dimensiones generan un total de 29.112 variables de decisión asociadas al modelo presentado en la sección 3. de las cuales 230 son variables binarias. Las restricciones son 4.944.

### 4.3. Superficie disponible

Para estimar el volumen de madera disponible por período, se utilizó el Software denominado Simulador Radiata Plus V5.0, versión estudiantil (ver Fundación Chile, 1997). Además del volumen que existe en cada uno de los rodales por período, también es necesario saber el máximo de superficie que se puede cortar en cada uno de ellos, puesto que es el factor limitante al momento de planificar las cortas a través de todo el horizonte de planificación. En este caso, la superficie disponible corresponde a un parámetro del modelo representado por la sigla  $Sudi_{ir}$ .

### 4.4. Crecimiento de la Demanda

En este artículo se asumió que la demanda crece a una tasa constante que es proporcional al nivel de demanda en cada instante del tiempo:

$$\frac{dD_t}{dt} = \alpha D_t \quad (28)$$

donde  $D_t$  es la demanda en el período  $t$  y  $\alpha$  es la tasa de crecimiento. Este supuesto es adecuado a situaciones con gran crecimiento de la demanda, como es el caso chileno. Resolviendo la ecuación diferencial ordinaria (28) se obtiene la función que permite proyectar el crecimiento de la demanda a distintos períodos:

$$D_t = D_{t_0} e^{\alpha(t-t_0)} \quad (29)$$

### 4.5. Técnica de Solución

La instancia fue resuelta utilizando el Software de Optimización LINGO 5.0 (Lindo Systems Inc., 1999), el cual emplea el algoritmo de *Branch & Bound* para resolver problemas enteros o mixtos. Debido a las características de la instancia a resuelta, los tiempos de solución obtenidos en diferentes corridas efectuadas como pruebas del modelo, variaron de 15 minutos a alrededor de 8 horas de CPU de un procesador Pentium II-300MHz, considerando el mismo tamaño del problema pero sólo cambiando los datos de entrada. Esto puede llegar a ser una limitante en la aplicación práctica de este modelo para casos con más alternativas o un mayor número posible de instalaciones ( $p>1$ ). Sin embargo, si se observa la estructura del modelo dado por las expresiones (1) a (27) se aprecia que es posible aplicar una descomposición del modelo global en tres submodelos, reduciéndose con ello el tiempo total de solución.

El modelo considera tres tipos de nodos candidatos para localización (predios, nodos intermedios y nodos de demanda) lo cual hace que la formulación sea perfectamente separable en tres modelos más pequeños, cada uno de ellos considerando la localización en un solo tipo de nodo. Estos tres submodelos requieren de la modificación de algunas restricciones, que implica la extracción de los términos que se asocian a las variables de localización en los sitios no habilitados. Esta descomposición sólo es posible debido a la independencia que existe entre las variables de localización en los tres tipos de nodos. El resultado de esta descomposición es la disminución del

tiempo total requerido para la solución del modelo completo obteniéndose la solución óptima (no se trata de una heurística). En otras palabras, para solucionar el problema en cuestión, cada uno de los tres submodelos debe resolverse en forma separada y la solución óptima global al problema completo, corresponderá a la del submodelo que arroje el mínimo valor para la función objetivo. A esto último debe agregarse que el tiempo total de solución, que se obtiene sumando los tiempos de solución individuales de cada submodelo, presenta una reducción promedio cercana al 53% con respecto al tiempo empleado en el problema completo.

#### **4.6. Resultados de la Aplicación del Modelo**

La solución del modelo indicó la construcción del aserradero en el predio 2 que está ubicado a 150 km. del puerto de San Vicente, principal punto de demanda. El aserradero a construir, en base a las demandas pronosticadas, tiene una capacidad de producción anual de 250.000 m<sup>3</sup> de madera aserrada. Además, debido a un incremento de las demandas a partir del 5<sup>to</sup> año, que superan la capacidad inicial, el modelo decidió realizar una expansión de la capacidad de producción en 20.000 m<sup>3</sup>/año, en el año 4.

Por otro lado, en cuanto al abastecimiento con madera aserrable, el modelo sólo aprovecha el patrimonio de la empresa para tal efecto, es decir un abastecimiento en un 100% con madera propia. Los predios escogidos para la producción de madera aserrable durante los 20 años son los predios 1, 2, 5, 8, 10, 18 y 19. Esto implica que de los 20 predios existentes, 13 de ellos no fueron utilizados para abastecer el aserradero, quedando disponibles para evaluar, por ejemplo, la construcción de otra instalación forestal. En cuanto a la superficie total cosechada en el horizonte de planificación, ésta alcanza una cantidad de 21.504 hectáreas, correspondientes al 35% de la superficie total considerada.

En relación a los niveles de producción, y basado en las demandas pronosticadas, los volúmenes anuales de madera aserrable requerida por el aserradero varían de 520.000 m<sup>3</sup> en el año 1 a casi 550.000 m<sup>3</sup> en el año 20, con un promedio de 533.000 m<sup>3</sup>.

Con respecto al valor de la función objetivo, el costo mínimo actualizado fue levemente superior a los 231 millones de dólares, de los cuales el 11% corresponde a la inversión en el aserradero, el 8 y 6% comprende los gastos en transporte de madera aserrable y aserrada, respectivamente; el 41% son costos de operación del aserradero y finalmente, el 34% es por abastecimiento de madera aserrable.

### **5. CONCLUSIONES**

Se ha presentado un modelo para la solución del Problema Dinámico de Producción y Logística Integrada en la Industria Forestal que involucra las principales decisiones estratégicas que debe tomar una empresa forestal para la optimización de sus recursos a mediano y largo plazo. Este modelo incorpora elementos que no han sido presentados anteriormente en la literatura especializada en este campo. El modelo, pese a ser de gran tamaño y de carácter mixto, fue posible de subdividir en subproblemas que conducen a la solución óptima en un tiempo de computación razonablemente bajo para instancias de aplicación real. El modelo fue aplicado a un

caso práctico de localización de una planta de transformación mecánica de madera en el sur de Chile, de acuerdo a datos reales.

La instancia estudiada fue resuelta exitosamente, con un tiempo de solución de 53 minutos y 36 segundos en un computador Pentium II con velocidad de 300 Mhz., demostrando la utilidad del modelo como herramienta de apoyo en la planificación estratégica en el área forestal

Dentro de las futuras líneas de investigación está el tratamiento de la demanda, cuyas características de comportamiento temporal son aún desconocidas en el sector forestal.

## REFERENCIAS

INFOR (1999) Disponibilidad de Madera de Pino Radiata en Chile 1998-2027. Informe Técnico N°142.

Epstein, R., Morales, R., Serón, J. y Weintraub, A. (1999) Use of OR Systems in the Chilean Forest Industries. **Interfaces**, Vol 29 N°1. pp. 7-29.

Lin, W., Carino, H. F. y Muchlenfeld, K. J. (1996) OSB/LOCATION: A Computer Model for Determining Optimal Oriented Strandboard Plant Location and Size. **Forest Products Journal**, Vol 46 N°2. pp. 71-78.

Dykstra, D. P. y Riggs, J. L. (1977) An Application of Facilities Location Theory to the Design of Forest Harvesting Areas. **AIIE Transactions**, Vol 9 N°3. pp. 270-277.

Faminow, M. D. y Sarhan, M. E. (1983) The Location of Fed Cattle Slaughtering and Processing in the United States: An Application of Mixed Integer programming. **Canadian Journal of Agriculture Economics**, Vol 31 N°3. pp. 425-436.

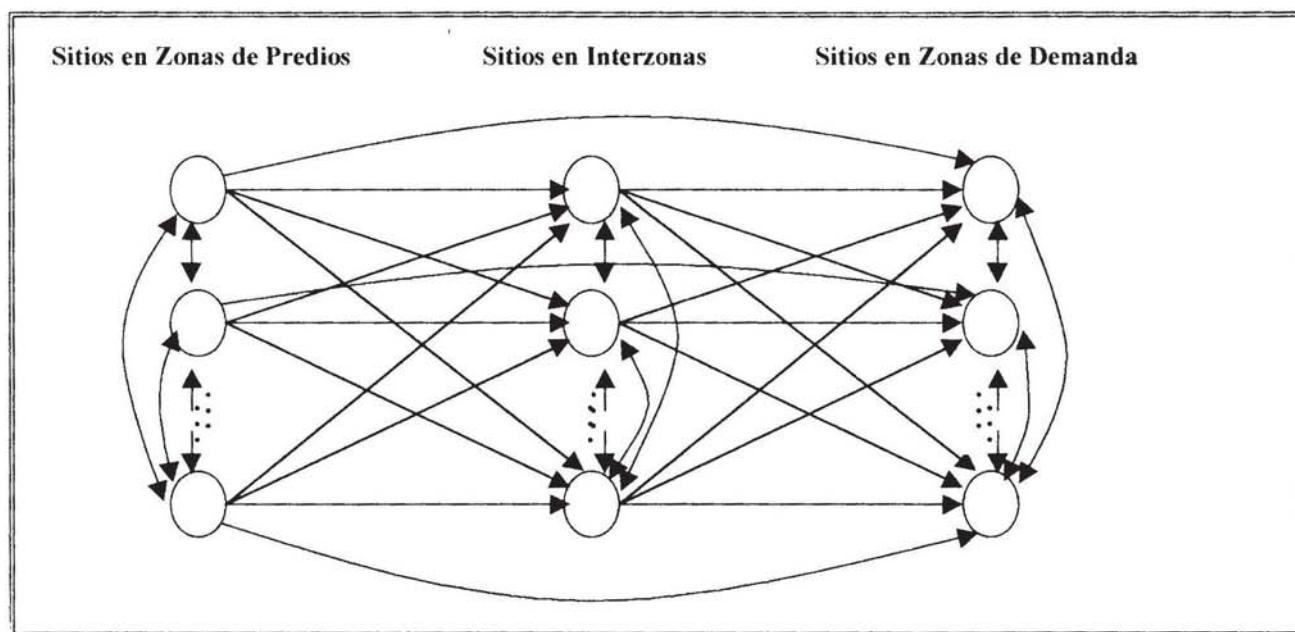
Klincewicz, J. G. (1990) Solving a Freight Transport Problem Using Facility Location Techniques. **Operations Research**, Vol 38 N°1. pp. 99-109.

Kloth, D. W. y Blakley, L. V. (1971) Optimun Dairy Plant Location with Economies of Size and Market-Share Restrictions. **American Journal of Agriculture Economics**, Vol 53 N°3. pp. 461-466.

Swersey, A. J. y Thakur, L. S. (1995) An Integer Programming Model for Locating Vehicle Emissions Testing Stations. **Management Science**, Vol 41 N°3. pp. 496-512.

FUNDACIÓN CHILE (1997) Modelo Nacional de Simulación de Pino Radiata: Manual del Usuario Simulador Radiata Plus V5.0. Circulación Restringida. 65 p.

LINDO SYSTEMS INC. (1999) LINGO The Modeling Language and Optimizer. Manual del Usuario.

**ANEXO TABLAS Y FIGURAS****Figura 1: Grafo del Problema en Estudio**

Ítem	Dimensión Máxima
Predios	20
Rodales por Predio	30
Nodos Intermedios	10
Centros de Demanda	4
Períodos de Planificación	20
Tamaños de la Instalación	5
Niveles de Expansión	3

**Tabla 1: Dimensiones para la Instancia Resuelta**