

Optimización del trozado de fustes en el nivel de unidad de manejo forestal

Tree-stem bucking optimization at the forest management unit level

P. Yapura¹, G. Sañudo², A. Keller³, H. Fassola³, E. Crechi³, A. Winck³, S. Barth³ y H. Caraballo²

¹Laboratorio de Investigación de Sistemas Ecológicos y Ambientales (LISEA), Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales (UNLP). Correo-e: ypf@agro.unlp.edu.ar. Diagonal 113 N° 469, (1900) La Plata, Buenos Aires.

²Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales (UNLP). Avenida 60 esquina 119, (1900) La Plata, Buenos Aires.

³EEA Montecarlo (INTA), Avenida El Libertador N° 2472, (3384) Montecarlo, Misiones.

El trabajo se desarrolló como parte del Proyecto de Investigación Aplicada (PIA) N.º 14072, Programa de Competitividad y Sustentabilidad Forestal - BID 2853, Unidad para el Cambio Rural (UCAR), Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación.

Abstract

In planning forest harvests the bucking optimization problem arises at tree-level as well as stand- and forest management unit-level. In a former project, Dynamic Programming has been coded in spreadsheets for obtaining optimal bucking patterns at tree-level for major species in NE Argentina. At the stand- and forest-level the problem has been formulated as a linear programming, master problem, and using a longest path algorithm for sub-problem, bucking pattern generation. GLPK and Java were used for coding *OptimEsus*, a software tool aimed at solving problems at these levels. A three stand problem was solved as a prototypical example.

Keywords: bucking pattern, longest path algorithm, linear programming.

Resumen extendido

Los árboles cortados, tanto en las operaciones de raleo como de cosecha, deben ser desramados y trozados para su posterior procesamiento industrial. El trozado o seccionamiento transversal de un fuste desramado produce rollos, es decir, segmentos más cortos del fuste. La industria forestal suele especificar los tipos de rollos que procesará indicando las dimensiones (longitudes y diámetros) y calidades (forma, estado sanitario, ramosidad) apropiadas para los diferentes destinos comerciales, o sea tipificando la materia prima. Además, suele comunicar sus preferencias a través de precios diferenciados para distintas combinaciones de dimensiones y calidad de los rollos. Independientemente de los métodos y máquinas empleadas en estas intervenciones silviculturales, siempre será relevante saber cuál es la mejor combinación de rollos que se debe producir con el trozado de fustes si el objetivo es maximizar el valor de la producción primaria. En este contexto, una secuencia particular de rollos tipificados que se obtiene de un fuste dado es lo que se conoce como un patrón de trozado y el problema de optimizar la obtención de estos patrones es un problema clásico de la investigación de operaciones. Si bien es un típico problema de la planificación operacional, es decir de muy corto plazo y altamente detallado, Laroze (1999) ha señalado que se presenta en tres niveles diferentes: el de árbol individual, el de rodal y el de unidad de manejo forestal (UMF).

Para resolver el problema en el nivel de árbol individual es necesario conocer la tipificación de rollos y la correspondiente estructura de precios, además de contar con una herramienta predictora de la forma del fuste, tal como los modelos matemáticos de perfil. La primera publicación detallada de la aplicación de la Programación Dinámica (PD) a la solución de este problema se le acredita a

Pnevmaticos y Mann (1972) y, desde entonces, ha sido la técnica de optimización más empleada. Para tres especies ampliamente cultivadas en el NE argentino se han ajustado funciones de forma del fuste y los modelos resultantes han sido programados en una planilla de cálculo que implementa el algoritmo de la PD para optimizar el trozado en el nivel de árboles individuales (Yapura *et al.*, 2016).

En el nivel de rodal, el problema busca optimizar simultáneamente el trozado de todos los árboles que lo componen. Todos los aspectos del problema en el nivel de árbol individual están presentes, pero ahora se agregan los requerimientos cuantitativos por tipo de rollo. En su especificación más simple, para cada tipo de rollo, se exige que la solución esté contenida en un rango de volúmenes mínimos y máximos, dictados por obligaciones de comercialización. En el nivel de UMF el problema es semejante, es decir que también se especifican requerimientos volumétricos por tipo de rollo, aunque el hecho de que la cosecha se constituya con más de un rodal le agrega otra dimensión. Además de requerir una mayor capacidad de cómputo, para la optimización en este nivel es de gran relevancia la consideración de los costos de aprovechamiento y flete, los cuales normalmente serán específicos para cada rodal cosechado.

Casi simultáneamente, Eng *et al.* (1986) y Mendoza y Bare (1986) propusieron una solución para el problema en el nivel de rodal fundada en su formulación como un problema de Programación Lineal (PL) en el cual las variables de decisión son las cantidades de árboles que se asignan a cada patrón de trozado identificado. Este problema en sí podría ser resuelto para encontrar el óptimo global si se pudieran suministrar todos los patrones de trozado posibles para cada árbol. Puesto que este número de patrones puede ser teóricamente importante (del orden de los miles a decenas de miles por árbol), normalmente no es posible incluirlos a todos en la formulación. Justamente, la técnica propuesta por estos autores implica resolver el problema de PL, al que se denomina *maestro*, con un pequeño conjunto de patrones que permitan proveer una solución meramente factible. Luego, mediante un mecanismo que emplea los precios sombra del problema maestro se buscan nuevos patrones de trozado formulando un *subproblema* para cada árbol. Para resolver estos subproblemas se usa la PD y los nuevos patrones encontrados se agregan a una nueva versión del problema maestro sólo si garantizan una mejor solución global. Este algoritmo iterativo se repite hasta que no es posible encontrar nuevos patrones que mejoren el óptimo global. En el nivel de UMF se puede emplear la misma técnica, con la única dificultad apuntada de una mayor demanda computacional. El trabajo de Laroze (1999) constituye uno de los ejemplos pioneros y más completos con este enfoque. También merece citarse como antecedente relevante para este problema el trabajo de Arce *et al.* (2002).

El objetivo del presente proyecto de investigación fue desarrollar un modelo de optimización del trozado de fustes en las operaciones de cosecha o de raleo de las principales especies cultivadas del NE argentino. El modelo debía permitir la planificación de estas operaciones en el nivel de uno o varios rodales simultáneamente y codificarse en un programa de computadora con una interfaz sencilla e intuitiva.

El modelo matemático adoptado es semejante al de Eng *et al.* (1986). Los árboles quedan descriptos por su pertenencia a una clase de diámetro, a una de altura y a un rodal. La tipificación de los rollos, la estructura de sus precios y los requerimientos volumétricos son suministrados por el usuario. Para la solución del problema maestro se empleó el paquete de software libre GLPK (*GNU Linear Programming Kit*), una librería desarrollada en el lenguaje de programación C a la que se accedió mediante el lenguaje de programación Java, para lo cual se emplearon librerías

especializadas en las traducciones (*bindings*). Por eficiencia de cómputo, la solución de los subproblemas no apeló a la PD, sino que se codificó como un algoritmo de redes. Concretamente, la optimización del trozado de fustes individuales también se codificó en Java, como una instancia específica del algoritmo de redes conocido como el de la *ruta más larga*, siguiendo en general el seudocódigo publicado por Simosol (2016). Todas las demás rutinas necesarias para conformar un sistema, al que se denominó *OptimEsus*, fueron programadas en Java. El prototipo operativo desarrollado ya incluye una interfaz con el usuario.

Como un ejemplo de aplicación se construyó un problema con datos de un ensayo de densidades de *Pinus taeda* de la EEA Montecarlo. Se seleccionaron tres densidades contrastantes y con edades diferentes para emular la situación típica de cosecha de varios rodales en un año cualquiera. Para simplificar, se consideró que cada rodal cubría 1 ha de superficie, es decir que se simuló la cosecha de 3 ha en total. En la Tabla 1 se presenta la información relevante a la tipificación de los rollos y los requerimientos volumétricos establecidos.

Tabla 1: Datos para la construcción de un problema de cosecha representativo.

Rollo	Longitud (pies)	Diámetro menor (cm)	Precios relativos	Volumen mínimo (m ³)	Volumen máximo (m ³)
Aserrado largo (AsL)	20 (~ 6,10 m)	25,0	1,00	400	2.000
Aserrado corto (AsC)	12 (~ 3,65 m)	25,0	0,75	300	2.000
Astillado (Ast)	7 (~ 2,10 m)	7,0	0,30	0	2.000

En la Tabla 2 se presentan los resultados de la optimización obtenidos con *OptimEsus*. En el óptimo global se generaron 4 patrones de trozado para cada una de las 96 clases combinadas de diámetros y alturas en los tres rodales, aunque solamente se emplearon 1 o 2. El volumen total cosechado fue de 1.585,2 m³, entregándose prácticamente los niveles mínimos requeridos en ambos volúmenes de rollos aserrables. El valor de la función objetivo fue de 895,4.

Tabla 2: Datos de los tres rodales de 1 ha de superficie cosechados y resultados de la optimización del trozado.

Rodal	Edad (años)	Densidad (árboles.ha ⁻¹)	DAP medio (cm)	Volúmenes cosechados (m ³ .ha ⁻¹)			
				AsL	AsC	Ast	Total
1	13	1666	23,9	133,3	47,2	579,8	760,3
2	16	415	34,6	181,3	109,5	160,0	450,9
3	19	207	44,2	92,4	143,7	137,9	374,0

La herramienta desarrollada resulta apropiada para que una UMF, independientemente de su escala, planifique las operaciones de raleo y cosecha para maximizar su valor económico ante cualquier combinación de tipificación de rollos y requerimientos volumétricos que se le presente. También podrá cuantificar los costos de oportunidad de la estructura de precios relativos asociados a una tipificación de rollos especificada.

Bibliografía

- Arce, J., Carnieri, C., Sanquetta, C. y Figueiredo Filho, A. (2002). A forest-level bucking optimization system that considers customer's demand and transportation costs. *Forest Science*, 48(3), 492-503.
- Eng, G., Daellenbach, H. y Whyte, A. (1986). Bucking tree-length stems optimally. *Canadian Journal of Forest Research*, 16(5), 1030-1035.
- Laroze A. (1999). A linear programming, tabu search method for solving forest-level bucking optimization problems. *Forest Science*, 45(1), 108-116.
- Mendoza, G. y Bare, B. (1986). A two-stage decision model for log bucking and allocation. *Forest Products Journal*, 36(10), 70-74.
- Pnevmaticos, S. y Mann, S. (1972). Dynamic programming in tree bucking. *Forest Products Journal*, 22(2), 26-30.
- Simosol. (2016). SIMO: Adaptable Simulation & Optimization. SIMO Documentation. Release 1.0.0. Simosol Oy, Finlandia. Recuperado el 4/2/2017 de <http://www.simo-project.org/>
- Yapura, P., Sañudo, G., Fassola, H., Crechi, E., Keller, A. y Caraballo, H. (2016). Proyecto de Investigación Aplicada (PIA 10107): Optimización del trozado de fustes de pinos y eucaliptos cultivados en Misiones y Corrientes. En: C Llavallol (Ed.), *Investigación forestal 2011-2015: los proyectos de investigación aplicada*, Ciudad Autónoma de Buenos Aires: UCAR, pp. 371-374.