



REVISTA TÉCNICA

DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

Una Revista Internacional Arbitrada
que está indizada en las publicaciones
de referencia y comentarios:

- SCOPUS
- Compendex
- Chemical Abstracts
- Metal Abstracts
- World Aluminium Abstracts
- Mathematical Reviews
- Petroleum Abstracts
- Current Mathematical Publications
- MathSci
- Revencyt
- Materials Information
- Periódica
- Actualidad Iberoamericana

UNIVERSIDAD DEL ZULIA



Quiébranos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Zulia

Patrimonio del Estado Zulia e
interés Cultural desde 2001

Fecha de Construcción:
1954-1958

Diseño: Arquitecto Carlos Raúl
Villanueva, con elementos
novedosos de adaptación
climática.

Policromía de la obra: Artista
Zuliano Víctor Valera.

Comparison of optimization-simulation models for resources allocation in a forest harvest system

Jaime Castillo Pincheira^{1*} , *Rodrigo Mancilla Vargas*¹ , *Celso Navarro Cárcamo*²

¹Departamento de Procesos Industriales, Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de Temuco, Rudecindo Ortega # 02950, Temuco, Chile.

²Departamento de Ciencias Ambientales, Facultad de Recursos Naturales, Universidad Católica de Temuco, Rudecindo Ortega # 02950, Temuco, Chile.

*Autor Contacto: jcastill@uct.cl

<https://doi.org/10.22209/rt.ve2019a06>

Recepción: 20/06/2019 | Aceptación: 25/10/2019 | Publicación: 01/12/2019

Abstract

This article presents a comparison between two techniques to solve machinery allocation problems, around the tactical planning of forestry harvesting tasks. The first is a simulated optimization, which is based on a solution obtained from an integer linear programming model. The second technique is an optimization via simulation, described as an iterative process that links an optimization model and a discrete event simulation model. Both techniques were analyzed for their production, variability and unit cost of production. As tools for decision-making allowed more flexible the planning, this through the analysis of different scenarios, granting reliability to meeting deadlines and cost calculation effectiveness. In addition, it is proposed that the use of probabilistic methods for the allocation of resources in productive systems, such as the studied, makes it possible to increase and improve information in decision-making.

Keywords: Forest harvest, Resource allocation, Optimization via simulation, linear programming.

Comparación de modelos de optimización-simulación para la asignación de recursos en un sistema de cosecha forestal

Resumen

Este artículo presenta una comparación entre dos técnicas para resolver problemáticas de asignación de maquinaria, en torno a la planificación táctica de faenas de cosecha forestal. La primera es una optimización simulada, que se basa en una solución obtenida de un modelo de programación lineal entera. La segunda técnica es una optimización vía simulación, descrito como un proceso iterativo que vincula un modelo de optimización y un modelo de simulación de eventos discretos. Ambas técnicas fueron analizadas en cuanto a su producción, variabilidad y costo unitario de producción. Como herramientas para la toma de decisiones permitieron flexibilizar la planificación, por medio del análisis de distintos escenarios, otorgando confiabilidad al cumplimiento de plazos y efectividad en el cálculo de los costos. Además, se plantea que el uso de métodos probabilísticos para la asignación de recursos en sistemas productivos, como el estudiado, permite aumentar y mejorar la información en la toma de decisiones.

Palabras clave: Cosecha forestal, Asignación de recursos, Optimización vía simulación, Programación lineal.

Introducción

La importancia de la industria forestal en Chile se aprecia en un aporte al PIB de 2.696 billones de pesos, junto con la generación de 114 mil puestos de trabajos a nivel nacional, en el año 2017. Las plantaciones forestales en el país ascienden a 2,4 millones de hectáreas, de las cuales el 57,6% corresponden a *Pinus radiata* D. Don. El consumo de madera se cuantificó en 45,7 millones de m³ssc en 2017, lo que significó un crecimiento del 2,7%, respecto al año anterior [1].

El ciclo forestal tradicional está compuesto por distintas actividades, siendo las más relevantes: plantación, manejo, cosecha y transporte. La magnitud de esta industria ha traído una alta inversión, principalmente, en las operaciones de cosecha y transporte [2], impulsadas por grandes empresas de celulosa que dominan el sector forestal [3].

Las operaciones de cosecha forestal tienen el objetivo de extraer árboles desde el bosque, para posteriormente ser convertidos en rollizos. Principalmente, intervienen operaciones de volteo, desramado y trozado. Para esto, se utiliza maquinaria diseñada o modificada para tales actividades, como tractores forestales, torres de madereo, cosechadoras, entre otras [4].

La planificación táctica de la cosecha forestal busca tomar decisiones, principalmente, por medio de la maximización del valor presente neto. Este objetivo reúne diferentes decisiones de gestión, sujetas a un conjunto de restricciones, como la disponibilidad de maquinaria o de tiempo [5]. Una ineficiente planificación táctica, o ausencia de esta, en las faenas de cosecha forestal, resulta en distintas consecuencias para el sistema productivo como, por ejemplo: subutilización de recursos, desbalances de líneas de producción, alto volúmenes de inventario en proceso, incumplimiento de plazos de abastecimiento, entre otras. Lo anterior, se traduce en elevados costos unitarios de producción y la disminución de la rentabilidad del sistema [6,7].

La planificación de la cosecha forestal conlleva distintas problemáticas que han sido estudiadas en las últimas décadas por diversos autores. Caglayan *et al.* [8] proponen una taxonomía actualizada para los modelos de optimización en esta área. Se clasifican estas problemáticas en programación de cosecha [9], riesgo [5], incertidumbre [10, 11], cadena de suministro [12], selección de áreas a cosechar [13]. Además, de manera transversal, la mayor cantidad de estudios se concentra en la programación de cosecha, vinculados al apoyo en la planificación de mediano plazo.

Por su parte, los autores en [14,15] realizan un estado del arte de modelos matemáticos en planificación forestal de mediano plazo, donde se aborda la cosecha

forestal desde perspectivas como: la construcción de caminos, la localización de maquinaria y la selección de áreas de cosecha. Respecto a la última, destaca el estudio de [16] que incluye el efecto de la incertidumbre, resolviendo este tipo de problema a través de un modelo de programación entera estocástica multi-etapa. En cambio, autores han abordado esta problemática a partir de otra perspectiva, dejando fija la demanda de madera y, por ende, centrando el foco en estudiar la asignación de recursos para satisfacer un volumen de producción definido. En esta área, se encuentra el trabajo de [17], donde se busca una asignación óptima para un volumen mínimo de producción, por medio de un modelo de programación lineal entera que permite seleccionar las unidades a cosechar y determinar los equipos y el personal requerido.

Las herramientas para la toma de decisiones en cosecha forestal detalladas en la literatura abarcan dos disciplinas. En primer lugar, se encuentran técnicas de optimización, que no son lo suficientemente precisas al verse enfrentadas a factores estocásticos que afecten la operación del sistema productivo [18]. Estos factores están vinculados a retrasos, averías de equipos y demoras en las operaciones. En segundo lugar, se presentan técnicas de simulación, las que permiten evaluar diferentes condiciones de operación, que podrían mejorar el desempeño de las operaciones en estudio [19]; aunque estas, por sí mismas no permiten encontrar una alternativa de operación óptima. Por lo cual, es oportuna la interacción de ambas técnicas, en busca de resultados que consideren las condiciones reales de operación y sean cercanos al óptimo.

La interacción entre las técnicas de optimización y simulación son descritas en dos enfoques por [20]. El primero es de optimización para simulación, que implica un ciclo iterativo de entradas, obtenidas por simulación de Monte Carlo, a un modelo de optimización, hasta encontrar la mejor solución para el problema en estudio. En segundo lugar, se menciona la optimización por simulación, también conocida como optimización vía simulación. Esta se describe como un ciclo iterativo, en el que un algoritmo de optimización genera candidatos para ser evaluado en desempeño por un modelo de simulación de eventos discretos (DES, por sus siglas en inglés), buscando la mejor configuración para las variables de decisión [21]. Esta cuenta con una variante, que trata de la generación de una solución determinista para ser evaluada en desempeño por un modelo de DES, sin generar una retroalimentación o mejora en la solución encontrada.

Bajo este contexto, este artículo desarrolla una comparación de modelos matemáticos para la asignación de recursos, que incluyan un enfoque de interacción entre técnicas de optimización y simulación de eventos discretos. Esto con el propósito de apoyar la toma de decisiones en el contexto de la planificación táctica, aplicado a una línea de cosecha forestal con central de trozado en predio, de

una compañía forestal al sur de Chile.

Junto con esta sección, este artículo consta de 4 secciones. En la sección 2 se presentan los procedimientos metodológicos utilizados en este estudio. En la sección 3 se presentan y discuten los resultados obtenidos. Por último, en la sección 4 se presentan las conclusiones de este trabajo.

Materiales y Métodos

Caso de estudio

El sistema de cosecha forestal estudiado corresponde a uno de tipo multi-máquina con central de trozado en predio. Este consta de cinco subsistemas: preparación de madera, madereo o transporte menor, clasificación y ordenamiento, procesamiento, y transporte intermedio; totalizando diez operaciones secuenciales desarrolladas por maquinaria especializada (Figura 1). El estudio de la línea de producción no considera el volteo, ni las operaciones anteriores, así como la operación de carguío en el transporte mayor (central de trozado).

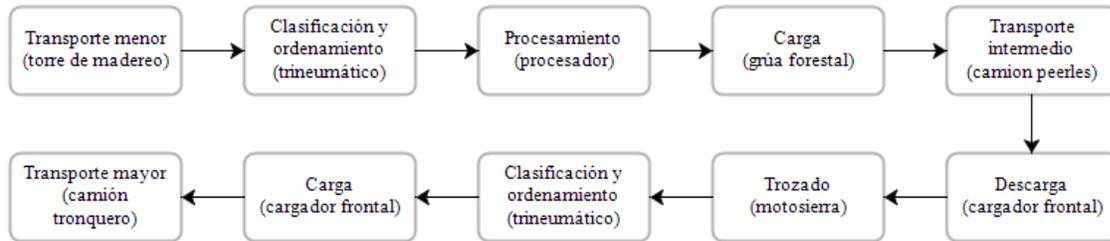
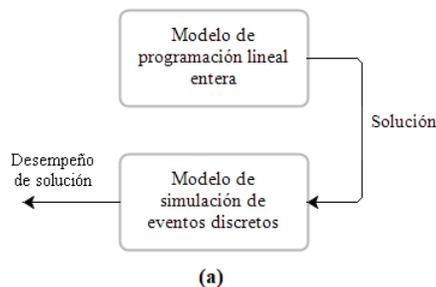


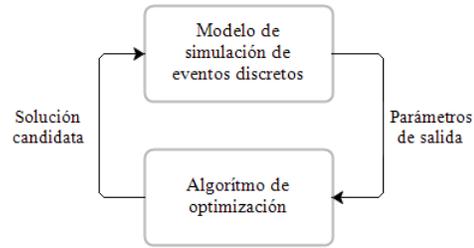
Figura 1. Operaciones secuenciales del sistema de cosecha forestal multi-máquina estudiado.

Los datos utilizados en el presente estudio fueron levantados de una faena de cosecha forestal de pino radiata, en período estival, en un predio de pendiente inclinada (mayor a 35°), al sur de Chile

Se buscó resolver el problema de asignación de maquinaria a cada operación de la línea productiva. Para esto, se definen tres niveles (escenarios) de demanda mínima de madera en metros cúbicos, en un periodo mensual. La metodología utilizada aborda dos técnicas que permiten la interacción de las herramientas de optimización y de simulación, según lo propuesto por [20]. En la Figura 2 se aprecia el enfoque de interacción de ambas técnicas.



(a)



(b)

Figura 2. Enfoques de interacción de optimización y simulación. (a) Optimización simulada (Técnica 1). (b) Optimización vía simulación (Técnica 2). Elaborado en base a [20].

Subíndices

i = Tipo de máquina [1,2,3,4,5,6,7,8,9,10]

1: Torre de madereo Urus I.

2: Torre de madereo Urus III.

3: Trineumático en madereo.

4: Procesador.

5: Grúa forestal

6: Camión peerles.

7: Cargador frontal.

8: Motosierrista de trozado

9: Trineumático etapa de trozado.

k = Actividad del cargador frontal [1,2]

1: Etapa de descarga.

2: Etapa de carga.

Técnica 1: Optimización simulada.

Esta implica la obtención de configuraciones de maquinaria (soluciones) a través de un modelo de programación lineal entera, las que son evaluadas en torno a su desempeño por medio de un modelo de simulación de eventos discretos (Figura 2a).

Descripción del modelo: El modelo utilizado es el planteado por [22]. Este es de tipo lineal entero, con variables asociadas a la asignación de maquinaria a cada operación, buscando minimizar el costo unitario de producción para un escenario determinado.

Variables de decisión:

X_i = Cantidad de máquinas a asignar tipo i .

Constantes

C_i = Costo unitario de producción de máquina i (\$/m³).
 R_i = Rendimiento de maquinaria del tipo i (m³/h)
 D = Demanda mínima para el período (m³).
 H = Horas efectivas de trabajo en el período (h).
 T = Días hábiles período de planificación (días).
 P_k = Porcentaje de jornada cargador frontal dedicado a actividad k (%).

Función objetivo

$$\min z = \sum_{i=1}^9 C_i X_i \quad (1)$$

Restricciones

$$\sum_{i=1}^2 X_i R_i H T \geq D \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^2 X_i = X_3 \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^2 P_k X_i R_i H T \geq D; \quad \forall i=7, k=1, 2 \quad (4)$$

$$X_i R_i H T \geq D; \quad \forall i \neq 1, 2, 7 \quad (5)$$

$$X_i \geq 0; \quad \forall i \quad (6)$$

$$X_i \in Z; \quad \forall i \quad (7)$$

La ecuación 2 asegura que la producción mínima de las torres de maderero debe ser mayor o igual a la demanda del periodo planificado. La ecuación 3 busca la asignación de un trineumático por cada torre de maderero en operación. La ecuación 4 establece que el cargador frontal debe realizar dos actividades en el sistema de producción en estudio. Un 75% de su jornada efectiva se usa para descargar camiones peerles, provenientes del área de acopio junto a las torres de maderero, y el 25% de su jornada efectiva restante se usa para cargar los camiones tronqueros, que llevan madera al destino final. Además, la producción mínima requerida para cada una de las actividades debe ser mayor o igual a la demanda del periodo planificado. La ecuación 5 asegura que la producción mínima de los procesadores, camiones peerles, motosierristas y trineumáticos deben ser mayor o igual a la demanda del periodo planificado, respectivamente. Las ecuaciones 6 y 7 especifican la naturaleza de la variable de decisión.

El problema fue programado y resuelto con el software LINGO para tres escenarios de mínima demanda, de 6.000 m³, 8.000 m³ y 10.000 m³ de madera.

Las soluciones obtenidas fueron configuradas en el simulador de eventos discreto SIMIO 9.0 versión docen-

te. Donde se incorporó el efecto de la variabilidad del problema estudiado por medio de funciones de distribución de probabilidad de rendimiento, que incluyen tiempos efectivos de producción, demoras y tiempos ocioso.

Para la formulación del modelo de simulación cada máquina se consideró como un servidor en la línea de producción. El modelo comienza con la producción en las torre maderero. Las operaciones intermedias se consideran como servidores de la línea de operaciones. Las unidades procesadas corresponden a árboles volteados, equivalente a 1 m³ de madera sólida, que son procesadas secuencialmente en la línea de operaciones hasta el carguío en camiones tronqueros.

El transporte intermedio se trató como un problema de ruteo, donde se debe recorrer una distancia de 10 km, con una velocidad promedio del camión de 18,9 km/h y 22 km/h con carga y sin carga, respectivamente. Además, la capacidad máxima de carga de los camiones es de 40 m³.

Técnica 2: Optimización vía simulación.

Esta consiste en la interacción cíclica de un modelo de optimización estocástica y uno de simulación de eventos discretos, mediante el análisis realizado por un algoritmo de optimización (Figura 2b). Este genera soluciones candidatas que son evaluadas en el modelo de simulación, para efectuar un análisis del desempeño de estas. La implementación se realizó en el software SIMIO 9.0 versión Docente que incorpora el complemento Opt-Quest, el cual contiene el algoritmo de optimización. Este algoritmo se fundamenta en las heurísticas de búsqueda dispersa, redes neuronales y búsqueda tabú [23].

Parámetros de entrada

Cf_i = Costo fijo de producción de máquina [\$/h].
 Cv_i = Costo variable de producción de máquina [\$/h].
 T = Tiempo de trabajo para el periodo planificado [h].
 $D_{inferior}$ = Demanda mínima requerida para el escenario evaluado [m³].
 $D_{superior}$ = Demanda máxima requerida para el escenario evaluado [m³].
 $X_i^{máx}$ = Cantidad máxima de máquinas tipo i a asignar.

Parámetros de salida

ρ_i = Rendimiento de maquina [m³/h].
 t_i = Tiempo de trabajo efectivo de máquina [h].
 Q_i = Producción de máquina i [m³].

Función objetivo

$$\min z = \sum_{i=1}^9 \frac{(Cf_i T + Cv_i t_i)}{Q_i} X_i \quad (8)$$

Restricciones

$$Q_i = \begin{cases} t_i \rho_i, & X_i > 0 \\ 1, & X_i = 0 \end{cases}; \quad \forall i=1, 2, \dots, m \quad (9)$$

$$D_{inferior} \leq \sum_{i=1}^2 Q_i \leq D_{superior} \tag{10}$$

$$D_{inferior} \leq Q_i \leq D_{superior}; \forall i=1, 2 \tag{11}$$

$$X_i \leq X_i^{max}; \forall i=1, 2, \dots, m \tag{12}$$

$$\sum_{i=1}^2 X_i = X_3 \tag{13}$$

$$X_i \geq 0; \forall i=1, 2, \dots, m \tag{14}$$

$$X_i \in Z; \forall i=1, 2, \dots, m \tag{15}$$

La ecuación 9 establece el valor de la producción obtenida en cada operación como un parámetro de salida a partir de la variable aleatoria (rendimiento) y el tiempo efectivo de operación de cada máquina asignada. La ecuación 10 indica que la producción ambos tipos de torres de madereo deben acotarse a los límites de producción definidos para el modelo. La ecuación 11 establece que la producción obtenida en cada operación debe acotarse a los límites definidos para el modelo. La ecuación 12 acota el espacio de solución, restringiendo la asignación máxima de unidades en cada operación. La ecuación 13 busca la asignación de un trineumático por cada torre de madereo en operación. Las ecuaciones 14 y 15 especifican la naturaleza de la variable de decisión.

El modelo de optimización se configuró en OptQuest bajo las características planteadas por [24]. Asimismo, las condiciones y supuestos utilizados para la construcción del modelo de simulación de eventos discretos son idénticas a las utilizadas para la técnica 1. Aunque se debe construir un modelo más amplio y complejo para permitir la simulación de las distintas configuraciones que entrega el algoritmo de optimización utilizado.

Resultados y Discusión

Se realizó el análisis de los rendimientos de la maquinaria que participa en cada operación, obteniendo los rendimientos promedios de cada una. Además, se realizó un ajuste del rendimiento de cada máquina a funciones de distribuciones de probabilidad (Tabla 1).

Tabla 1. Rendimiento de maquinaria para el sistema de cosecha forestal estudiado.

Máquina	Rendimiento (m³ h⁻¹)	Distribución de probabilidad*
Torre de madereo Urus I	12,91	Normal (12,09 5,569)
Torre de madereo Urus III	21,43	Weibull (2,804 24,04)
Trineumático etapa madereo	75,74	Normal (75,74 30,65)
Procesador	78,05	Normal (40,73 7,206)
Grúa forestal	40,73	Weibull (3,796 212,2)
Camión peerles	18,19	-
Cargador frontal	192,43	Normal (45,44 7,017)
Motosierrista de trozado	45,44	Normal (52,33 12,75)
Trineumático etapa trozado	53,33	Weibull (2,138 75,21)

*Validado por prueba de bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov (K-S), P > 0,05.

Se ejecutaron 50 réplicas por cada solución (técnica 1) y cada solución candidata (técnica 2), con un nivel de confianza de 95%. Además, por economía computacional, se debieron establecer dos criterios de detención para el proceso de optimización vía simulación (técnica 2). El primero es la obtención de una solución óptima, y el segundo es la ejecución de 500 ciclos iterativos.

Para realizar el contraste de las técnicas utilizadas, se definieron tres escenarios de mínima producción: 6.000 m³ (escenario 1), 8.000 m³ (escenario 2) y 10.000 m³ (escenario 3).

Por medio de las dos técnicas utilizadas, se obtuvieron las siguientes configuraciones de maquinaria para cada escenario de mínima producción definido (Tabla 2).

Tabla 2. Asignación de maquinaria obtenida para cada escenario de mínima producción.

Escenario	Técnica 1			Técnica 2		
	1	2	3	1	2	3
Torre de madereo Urus I	0	1	0	3	0	3
Torre de madereo Urus III	2	2	3	0	2	1
Trineumático (madereo)	2	3	3	3	2	4
Procesador	1	1	1	2	2	2
Grúa forestal	1	2	2	2	2	3
Camión peerles	2	3	4	2	4	4
Cargador frontal	1	1	2	2	2	3
Motosierrista	1	2	2	2	2	3
Trineumático (trozado)	1	1	2	2	2	3

Las asignaciones resultantes para cada escenario de mínima de producción permiten obtener la producción descrita en el Tabla 3. Asimismo, se obtienen los costos unitarios de cada configuración, donde se aprecia que, con ambas técnicas, se establece el menor costo unitario para el escenario 2. En el caso del escenario 3, la técnica 1 no permite cumplir con la mínima producción requerida; además, este escenario presenta los costos unitarios más elevados usando ambas técnicas.

Tabla 3. Producción y costo unitario de producción obtenido para cada escenario.

Escenario	Técnica 1			Técnica 2		
	1	2	3	1	2	3
Producción (m ³)	6.090	8.241	9.614	6.216	9.175	10.920
Costo Unitario (\$ m ⁻³)	9.891	9.419	10.340	10.876	9.391	11.541
Inventario en proceso (m ³)	89	139	256	596	92	591
Inventario en proceso (%)	1,47%	1,69%	2,66%	9,59%	1,10%	5,41%

Además, de manera transversal, las técnicas utilizadas presentan niveles de inventario intermedio (en proceso) bajos, lo cual obedece a que las configuraciones de maquinaria resultantes permiten un balance de línea satisfactorio.

En la Figura 3 se aprecia el efecto de la variabilidad, propia de los rendimientos de cada maquinaria, resultante de la rutina de simulación implementada en ambas técnicas. Se visualiza que efectivamente la solución entregada por la técnica 1, para el escenario 3, no logra en ninguna iteración alcanzar la producción mínima requerida. Además, para el mismo escenario, la técnica 2 debe asignar una configuración para producciones cercanas a los 11.000 m³, y así lograr minimizar el costo unitario. Lo anterior es similar en el escenario 2, donde se alcanza una producción cercana a los 9.000 m³ para minimizar el costo unitario. Respecto al escenario 1, se aprecia que las asignaciones de ambas técnicas obtienen producciones cercanas al valor mínimo requerido.

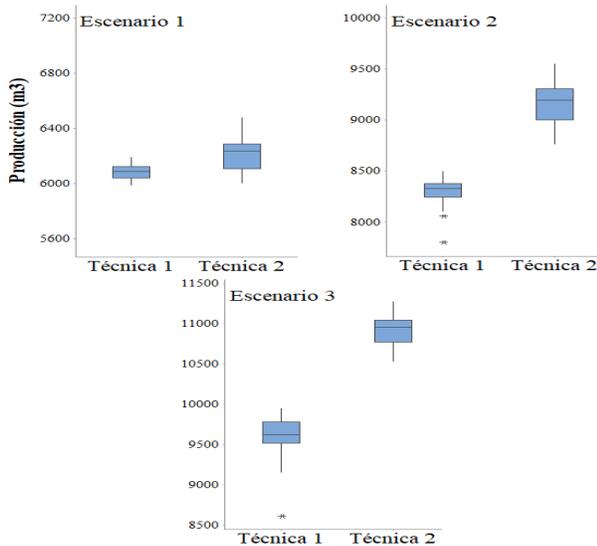


Figura 3. Distribución de los valores de producción obtenidos en el proceso de simulación para cada escenario de mínima producción con las técnicas de asignación utilizadas.

Respecto a los costos unitarios de producción, en la Figura 4 se puede apreciar que ambas técnicas logran la menor proporción de la componente fija en el escenario 2, con un 70,34% y 77,62% para la técnica 1 y técnica

2, respectivamente. Si bien, en este escenario la técnica 2 presenta un mayor costo fijo, el costo unitario obtenido es menor en comparación a la otra técnica. Lo anterior es ocasionado por un aprovechamiento de la economía de escala.

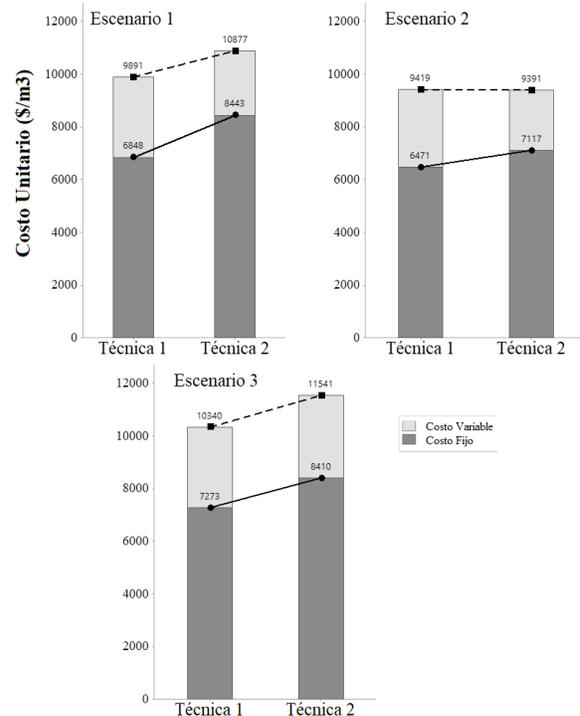


Figura 4. Composición del costo unitario de producción obtenido para cada escenario evaluado.

Conclusiones

Para el caso estudiado, el aporte de la variabilidad de la producción de la maquinaria, junto a las demoras y tiempos ociosos, no es relevante para cambiar la asignación del modelo determinista en los escenarios 1 y 2 de producción. Respecto a la técnica 2 (optimización vía simulación), no se genera un aporte significativo a la variabilidad del sistema.

La asignación propuesta por la técnica de optimización simulada consigna al escenario 1 y 2 con costos

unitarios similares. Aunque se considera al segundo como el más eficiente y seguro para el sistema en estudio, debido a que se obtiene una producción mayor.

La asignación propuesta por la técnica de optimización vía simulación entrega la mejor asignación para una producción asociada al escenario 2 de mínima demanda; siendo también la más eficiente en términos productivos en comparación a las asignaciones para los demás escenarios.

El modelo determinista, basado en programación lineal entera, es una solución sencilla para asignar maquinaria, cuando las restricciones que se plantean tienen que ver solo con el cumplimiento de una demanda definida. En cambio, método de optimización vía simulación permite evaluar un gran número de escenarios de producción, siendo una herramienta de mayor precisión para identificar un volumen de producción óptimo o cercano. En relación con la propuesta, se aprecia que las técnicas de optimización y de simulación son complementarias para la asignación de maquinaria. Permitiendo mejorar la eficiencia en la asignación; visualizando las posibles restricciones, los porcentajes de utilización de la maquinaria y manejar opciones de mejora para satisfacer requerimientos o eliminar restricciones.

El uso de modelos de simulación permite determinar las horas de operación efectiva de las máquinas (utilización), haciendo posible estudiar la composición de los costos productivos. Por lo que se convierte en un aporte para los planificadores a la hora de estudiar los costos de la producción, junto con la negociación de tarifas con empresas contratistas.

Respecto a las técnicas estudiadas, y en relación con la literatura sobre modelos de asignación, ambas propuestas permiten flexibilizar la planificación, accediendo a probar distintos escenarios que otorguen confiabilidad al cumplimiento de plazos y efectividad en el cálculo de los costos.

Referencias Bibliográficas

- [1] INFOR.: Anuario forestal, Boletín estadístico. Instituto Forestal, No. 163 (2018). Disponible en <https://www.wef.infor.cl/publicaciones/anuario/2018/Anuario2018.pdf>.
- [2] Acuña E., Drake F. y Garcias M.: A application to decision support system in logging machineries costs. *Rev. Arvore*, Vol. 35, No. 1 (2011) 165-172. DOI: 10.1590/S0100-67622011000100020.
- [3] Mac Donagh P., Botta G., Schlichter T. y Cubbage F.: Harvesting contractor production and costs in forest plantations of Argentina, Brazil, and Uruguay. *Int. J. Forest Eng.*, Vol. 28, No. 3 (2017) 157-168. DOI: 10.1080/14942119.2017.1360657.
- [4] Linfati-Medina R., Pradenas-Rojas L. y Ferland J.: Aggregate planning in forest harvest: A mathematical programming model and solution. *Maderas-Cienc. Tecnol.*, Vol. 18, No. 4 (2016) 555-566. DOI: 10.4067/S0718-221X2016005000048.
- [5] Robinson AP, McLarin M. y Moss I.: A simple way to incorporate uncertainty and risk into forest harvest scheduling. *For. Ecol. Manage.*, Vol. 359 (2016.) 11-18. DOI: 10.1016/j.foreco.2015.09.027.
- [6] Carey P.: Metodología y diseño de un sistema para el apoyo en la planificación de operaciones forestales. *Bosque*, Vol. 18, No. 1 (1997) 83-88.
- [7] Parra M. y Carey P.: Consideraciones metodológicas para la evaluación de la cortadora-procesadora (harvester) en operaciones forestales. *Bosque*, Vol. 21, No. 2 (2000) 137-146.
- [8] Caglayan I., Yesil A., Cinar D. y Cieszewski C.: Taxonomy for the optimization in forest management: a review and assessment. *Forestist*, Vol. 68, No. 2 (2018) 122-135. DOI: 10.26650/forestist.2018.354789.
- [9] Palma CD. y Vergara FP.: A multiobjective model for the cutting pattern problem with unclear preferences. *For. Sci.*, Vol. 62, No. 2 (2016) 220-226. DOI: 10.5849/forsci.14-100.
- [10] Veliz FB, Watson JP, Weintraub A., Wets RJB. y Woodruff DL.: Stochastic optimization models in forest planning: a progressive hedging solution approach. *Ann. Oper. Res.*, Vol. 232, No. 1 (2015) 259-274. DOI: 10.1007/s10479-014-1608-4.
- [11] Garcia-Gonzalo J., Pais C., Bachmatiuk J. y Weintraub A.: Accounting for climate change in a forest planning stochastic optimization model. *Can. J. For. Res.*, Vol. 46, No. 9 (2016) 1111-1121. DOI: 10.1139/cjfr-2015-0468.
- [12] Alvarez P. y Vera JR.: Application of robust optimization to the sawmill planning problem. *Ann. Oper. Res.*, Vol. 219, No. 1 (2014) 457-475. DOI: 10.1007/s10479-011-1002-4.
- [13] Bettinger P., Demirci M. y Boston K.: Search revision within s-metaheuristics: Impacts illustrated with a forest planning problem. *Silva. Fenn.*, Vol. 49, No. 2 (2015) 1-20. DOI: 10.14214/sf.1232.
- [14] Weintraub A, Church RL., Murray AT. y Guignard M.: Forest management models and combinatorial algorithms: Analysis of state of the art.

- Ann. Oper. Res., Vol. 96 (2000) 271-285. DOI: 10.1023/A:1018991116559.
- [15] Weintraub A.: Integer programming in forestry. Ann. Oper. Res., Vol. 149, No. 1 (2007) 209-216. DOI: 10.1007/s10479-006-0105-9.
- [16] Alonso-Ayuso A., Escudero L., Guignard M., Quinteros M. y Weintraub A.: Forestry management under uncertainty. Ann. Oper. Res., Vol. 190, No. 1 (2011) 17-39. DOI: 10.1007/s10479-009-0561-0.
- [17] Palma CD. y Troncoso J.: Asignación óptima de equipos en faenas de cosecha forestal. Bosque, Vol. 22, No. 1 (2001) 65-73.
- [18] Wei R. y Murray AT.: Spatial uncertainty in harvest scheduling. Ann. Oper. Res., Vol. 232, No. 1 (2015) 275-289. DOI: 10.1007/s10479-012-1178-2.
- [19] Rebolledo MM. y Abufarde FB.: The use of artificial intelligence for the optimization of a simulation model applied to a radiata pine manufacturing process. Maderas-Cienc. Tecnol., Vol. 3, No. 1-2 (2001) 52-62.
- [20] Marques AF, de Sousa JP, Rönnqvist M. y Jafe R.: Combining optimization and simulation tools for short-term planning of forest operations. Scand. J. Forest Res., No. 29 (2014) 166-177. DOI: 10.1080/02827581.2013.856937.
- [21] Rytwinski A. y Crowe KA.: A simulation-optimization model for selecting the location of fuel-breaks to minimize expected losses from forest fires. For. Ecol. Manage., Vol 260, No. 1 (2010) 1-11. DOI: 10.1016/j.foreco.2010.03.013.
- [22] Castillo J.: Propuesta para la asignación de equipos en un sistema de cosecha forestal, incorporando escenarios de variabilidad. Tesis Magister en Ingeniería Industrial y de Sistemas. Concepción, Chile. Facultad de Ingeniería, Universidad del Desarrollo. (2016) 69 p.
- [23] Jerbi A., Ammar A., Krid M. y Salah B.: Performance optimization of a flexible manufacturing system using simulation: the Taguchi method versus OptQuest. Simulation, (2019). DOI: 10.1177/0037549718819804.
- [24] Laguna M. y Martí R.: Neural network prediction in a system for optimizing simulations. IIE Trans., Vol. 34, No. (3) (2002) 273-282. DOI: 10.1080/07408170208928869.



UNIVERSIDAD
DEL ZULIA

REVISTA TECNICA

DE LA FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DEL ZULIA

Volumen Especial, 2019, No. 1, pp. 154 - 262_____

*Esta revista fue editada en formato digital y publicada en Diciembre de 2019, por el **Fondo Editorial Serbiluz**, Universidad del Zulia. Maracaibo-Venezuela*

www.luz.edu.ve
www.serbi.luz.edu.ve
www.produccioncientificaluz.org