

LA INVESTIGACIÓN OPERATIVA, LA INGENIERÍA FORESTAL Y LOS PROBLEMAS SECTORIALES: ANTE LA NECESIDAD DE UN CAMBIO DE PARADIGMA

OPERATIONAL RESEARCH, FORESTRY ENGINEERING AND SECTORAL PROBLEMS: CONSIDERING THE NEED FOR A CHANGE OF PARADIGM

Fecha de recepción: 16/09/2016 // Fecha de aceptación: 02/05/2017

Diego Broz

Facultad de Ciencias Forestales, UNaM. Calle Bertoni 124, Eldorado, Misiones, Argentina. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Bahía Blanca Buenos Aires, Argentina. Email: diego.broz@uns.edu.ar

Patricio Mac Donagh

Facultad de Ciencias Forestales, UNaM. Calle Bertoni 124, Eldorado, Misiones, Argentina. Email: mdonagh@facfor.unam.edu.ar

Julio Arce

Departamento de Ciências Florestais, UFPR. Av. Prof. Lothário Meissner, 900 - Campus III Jardim Botânico, Curitiba, Brasil. Email: jarce@ufpr.br

P. Yapura

Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP. Avda. 60 y 119 - S/Nº, La Plata, Buenos Aires, Argentina. Email: ypf@agro.unlp.edu.ar

Daniel Rossit

Diego Rossit

Antonella Cavallín

Departamento de Ingeniería, UNS. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Bahía Blanca Bs As, Argentina. Email: daniel.rossit@uns.edu.ar; diego.rossit@uns.edu.ar; antonella.cavallin@uns.edu.ar

RESUMEN

La Investigación de Operaciones (IO) presenta los fundamentos adecuados para resolver problemas de organizaciones complejas, siendo un soporte que contribuye a la toma de decisiones que conducen a un fin lo más favorable posible para el sistema. El sector forestal se caracteriza por la multi-dimensionalidad de sus sistemas, desde la gestión de las masas hasta aspectos de logística y aprovechamiento de los recursos forestales. Bajo este contexto la IO es el enfoque versátil y robusto para abordar los problemas de dichos sistemas. A partir de un análisis contextual se concluye que la IO es una herramienta de gran utilidad para el ingeniero forestal, lo cual fundamenta la incorporación de la asignatura en el plan de estudio de la carrera.

Palabras Clave: herramientas de soporte a las decisiones, programación matemática, competitividad profesional

SUMMARY

Operations Research offers the proper scientific foundation to solve complex organizational problems, giving substantial support to the decision-making process that leads to the most favorable ending for the system. The forestry sector is characterized for dealing with multi-dimensional systems, being necessary to consider from forest mass management to logistics distribution and efficient forest resources' usage. Under this scenario, Operations Research presents a versatile and robust approach to deal with the forestry systemic problems. Based on a contextual analysis, we conclude that Operations Research is a useful and enriching tool for the forestry engineer and, therefore, we strongly recommend its implementation on the university curricula.

Key Words: Decision support tools, mathematical programming, professional competitiveness.

INTRODUCCIÓN

A partir de la revolución industrial, el mundo ha sido testigo de un crecimiento importante del tamaño y la complejidad de las organizaciones. Esto hace que sea difícil asignar los recursos disponibles a las diferentes actividades de una manera eficiente. El continuo aumento en la complejidad de los sistemas trajo aparejado problemas nuevos en numerosas organizaciones; algunos de los cuales aún hoy perduran sin haberse encontrado una solución satisfactoria, sobre todo en el sector forestal y foresto-industrial. Una de las herramientas más poderosas que permite modelar un sistema complejo, resolverlo y asignar dichos recursos de la mejor manera posible es la *Investigación de Operaciones* (IO).

Si bien el origen de algunas técnicas de IO se remonta a 1564, fue durante la Segunda Guerra Mundial donde se dio un punto de inflexión en el desarrollo de la IO por sus aplicaciones con fines militares vinculado a, entre otras cuestiones, la necesidad de asignar recursos escasos a las distintas maniobras militares y a las actividades que componían cada operación. La administración militar reunió a científicos (especialmente matemáticos, físicos e ingenieros) para que realizaran *investigaciones sobre las operaciones militares*, siendo éste el momento donde se acuñó el nombre para esta disciplina. Debido al éxito de la IO en la guerra, ésta fue llevada a los ámbitos civiles como ser organizaciones industriales, de negocios y del gobierno. Es importante recalcar que esto no sería posible sin los aportes pioneros de George Dantzig en el año 1947, el *Método Simplex*, y los avances en el campo de la computación (Hillier y LIEBERMAN, 2010). En la actualidad, en muchos estamentos de I+D+i se refieren a la IO con el término *management science* o *ciencia de la administración* como sinónimo, incluso en algunos caso se utiliza directamente el término *optimización*.

En este trabajo se realizó un análisis sobre la aplicación e importancia de la IO en el sector forestal, en la formación del ingeniero forestal y su desempeño profesional; además se brinda una perspectiva de algunos problemas del sector (operaciones, cadena de suministro, etc.) y de la investigación operativa como núcleo de un *Sistema de Soporte a las Decisiones* (ó DSS por sus siglas en inglés *Decision Support System*) para abordar dichos problemas. Aunque el desarrollo de la IO en el sector forestal no ha alcanzado la extensión que poseen otros campos, no debe dejar de considerarse el potencial de aplicación que dicha herramienta puede aportar al sector. Especialistas en IO se han ocupado de diferentes problemas relacionados con la planificación forestal, cadena de suministro, transporte, planificación de la producción industrial, lucha contra los incendios forestales y plagas, entre otros aspectos que intervienen en la producción y utilización de la madera y demás productos del bosque. Esto pone en evidencia la

necesidad de contar con profesionales con sólidos conocimientos en IO para que puedan tomar decisiones sobre cualquier sistema complejo, ya sea natural o artificial.

METODOLOGÍA

Existen varias áreas de investigación científica dependiendo del método y de los fines que se persiguen. En este caso de estudio, se desarrolló una investigación del tipo descriptiva. Según TAMAYO (2003) ésta comprende la descripción, registro, análisis e interpretación de la naturaleza actual y de la composición o procesos de los fenómenos. El enfoque se hace sobre conclusiones dominantes o sobre cómo una persona, grupo o cosa se conduce o funciona en el presente. Su objetivo es describir la estructura de los fenómenos y su dinámica e identificar aspectos relevantes de la realidad (RIVERO, 2008). En este trabajo, se plantea una investigación documental o investigación basada en fuentes secundarias en la cual se pretende analizar documentación, fenómenos y manifestaciones de la realidad actual relacionadas con la IO en el área forestal.

REVISIÓN Y DISCUSIÓN

La logística como herramienta de competitividad

Hasta los años 80 cada uno de los componentes de la red logística operaba en forma relativamente independiente, constituyéndose cada uno en un compartimento estanco. Dado el aumento de la complejidad de los sistemas, producto de la globalización, las actividades empezaron a integrarse bajo la organización logística. Importantes desarrollos científicos permitieron acelerar esta integración y mejorar el desempeño de cada uno de los agentes del sistema, y también, al sistema como un todo. El área de investigación y desarrollo en lo que respecta a la logística y, especialmente, a las SCM (*Supply Chain Management*) en Argentina es muy incipiente. Este aspecto es un reflejo de la poca competitividad de los mercados nacionales en algunos sectores. Según GONZÁLEZ *et al.* (2008), en la Argentina, los costos de logística representan el 27% del PBI, en Brasil 26%, en Colombia 23%, en Chile el 18%, en USA el 9,5% y, en promedio, en la OECD² representa un 9%. Si bien no hay trabajos que desagregan los costos logísticos para Argentina, JUNIOR *et al.* (2014) plantea, para el caso de Brasil, que el 60% corresponde al transporte, 28% al stock, 7% amortizaciones y los restantes 3% a los gastos administrativos. Según Schwab (2014), la Argentina ocupa el puesto 104, sobre un total de 144 naciones, en el ranking de competitividad global 2014-2015, siendo las principales causas de tan bajo

² La *Organization for Economic Cooperation and Development* (OECD) es un organismo que está compuesta por 35 estados, con sede en Francia.

posicionamiento la infraestructura y el tipo de transporte utilizado. En el mismo informe se menciona que una infraestructura extensiva y eficiente es crítica para asegurar el funcionamiento de la economía. Este es un factor importante en la localización de actividades económicas, el tipo de actividad y el sector involucrado, contribuyendo al desarrollo del país, ya que permite el flujo en la cadena de suministro.

La vinculación entre logística y competitividad refiere a la capacidad de capturar valor a partir de disminuir los costos y hacer más eficiente los procesos de abastecimiento, producción y comercialización de bienes. Esto es de suma importancia tanto en el sector privado, como en el sector público. Para el sector privado, los progresivos incrementos en los costos, conllevan la necesidad de repensar estrategias tendientes a incrementar los actuales niveles de competitividad y sostener la rentabilidad. En tal sentido, la tendencia de los proveedores de carga no es minimizar el costo del transporte, sino sus costos logísticos totales, e ir integrando paulatinamente sus SCM, tanto en tráficos locales como internacionales. Por otro lado, desde el ámbito público, la planificación del sistema logístico se funda en la premisa de articular una serie de objetivos complementarios, tal como: reducción de costos, competitividad cambiaria, abastecimiento de los mercados internos, infraestructura y transporte multimodal (CANITROT Y GARCÍA, 2012).

El primer y más importante componente de la SCM es el transporte. En Argentina, el costo de la transporte de mercaderías por camión es 3 y 5 veces más alto que el empleado en los trenes y barcos respectivamente (MARTINEZ *et al.*, 2014). Para traslados de más de 1.000 km, el crecimiento de los costos de transporte en camión, se explica principalmente –aunque no exclusivamente– por las subas en el precio del combustible y en menor medida por la mano de obra.

Según CAÑETE (2011) en Argentina el 84% de la mercadería se traslada por camión, esto implica que ocho de cada diez productos de cualquier rama de actividad, utiliza a lo largo de su cadena de valor al menos dos veces el camión. Por este motivo, el mismo autor expone que el costo de transportar un contenedor de 20' y 10t desde Singapur o Shangai a Buenos Aires (USD 1.800) es más económico que llevarlo desde Buenos Aires a Salta (USD 2.200).

En Argentina, el costo logístico sectorial es dispar, por un lado, en las actividades primarias como la agricultura, ganadería, pesca y silvicultura, este costo representa el 12% del valor agregado. Por otro lado, en la construcción y en la industria manufacturera, esta incidencia es del orden del 20% (Figura 1).

En relación al costo logístico y el tamaño de las organizaciones, en la Figura 2 se aprecia que los mismos representan un 42% de las ventas totales (VT) en las empresas de menor tamaño, de los cuales el 12,7% corresponde al transporte y distribución y el 29,4% al almacenamiento y gestión de inventarios. Por otro lado, para empresas con un nivel de ventas superiores a USD 5.000.000 anuales, los costos logísticos oscilan en torno a 18%.

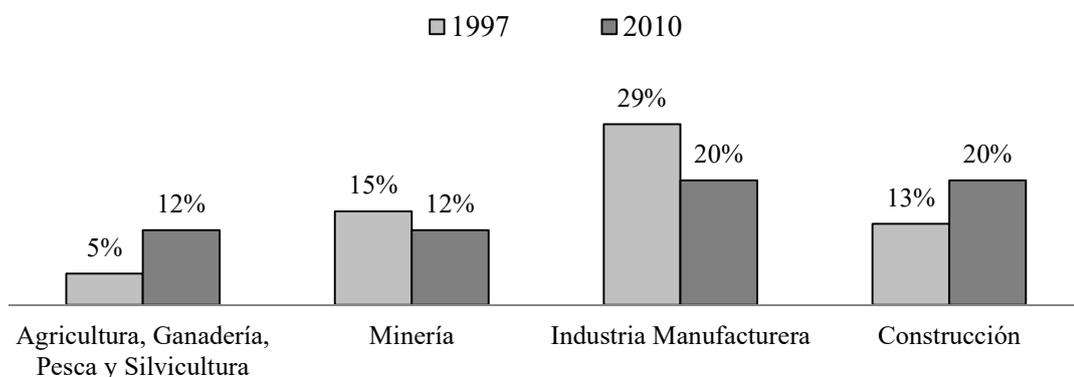


Figura 1. Costos logísticos en Argentina por sector de actividad, como porcentaje del Valor Agregado (Fuente: Canitrot y García, 2012).

Figure 1. Logistic costs in Argentina by sector of activity, as a percent of Added Value.

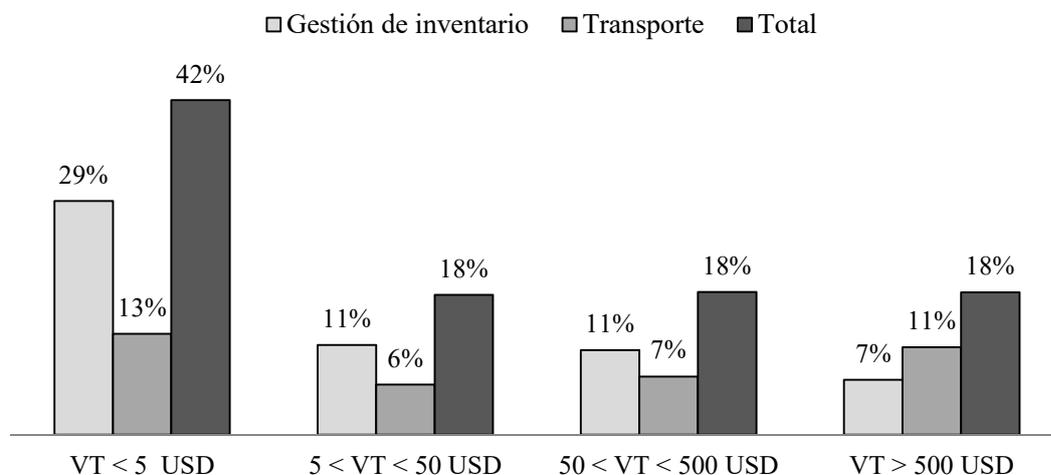


Figura 2. Costos Logísticos promedio en América Latina, por componente como porcentaje de las ventas totales (Fuente: Canitrot y García, 2012).

Figure 2. Average logistics costs in Latin America, by component as a percentage of total sales.

Logística forestal e investigación operativa

Los aspectos relacionados con la infraestructura y la logística así como la disponibilidad de recursos energéticos condicionan en ocasiones la factibilidad de determinadas producciones a costos competitivos. En este aspecto, el sector forestal y sus industrias afines, motores de la economía del noreste argentino, es uno de los más afectados por estos problemas.

Entre las provincias de Misiones y Corrientes se concentra el 80% de la producción forestal del país. El conglomerado productivo cuenta con más de 1.000 unidades fabriles, de las cuales más del 98% corresponden a PyMES. Estas provincias cuentan con el potencial para hacer de la actividad forestal una de los sectores económicos más competitivos y dinámicos de la región. Sin embargo, la paulatina caída de los mercados externos, vía la merma de la demanda de Estados Unidos, España y otros países, junto con el aumento de los costos internos han ido configurando un escenario muy diferente al encontrado en el 2006, considerado como el pico de la actividad exportadora. Además, el aumento de los costos internos provocó que la actividad sea menos competitiva frente a otros mercados, especialmente frente a nuestros países vecinos. Brasil, Chile o Uruguay, nuestros principales competidores, mantienen o han aumentado su participación exportadora (MAC DONAGH *et al.*, 2012). Según la AFOA (2015) el costo de la logística representa el valor FOB en 30% para el caso de Argentina, 17% para Uruguay, 9% para Brasil y 7% para Chile; en otras palabras, el costo de exportar un contenedor de madera desde Misiones, principal zona forestal del país, es 3,3 y 4,2 veces más caro que exportarlo desde Brasil y Chile respectivamente.

Mejorar la competitividad de este sector implica establecer políticas de estado que se enmarquen en líneas de acción sustentadas por herramientas para la toma de decisiones. En este contexto, la aplicación de técnicas de IO juega un rol central por versatilidad y robustez. Por tal motivo, queremos revisar las principales contribuciones en el campo específico de la gestión forestal. ARCE (1997), por ejemplo, desarrolla un sistema de programación de transporte de productos forestales con el objeto de minimizar los costos, mediante programación lineal, y tiempos ociosos de los camiones, mediante programación dinámica. ARCE (2000) presenta un modelo de simulación y optimización del trozado del fuste con base en la demanda de los clientes (aserraderos, laminadoras, planta de celulosa, etc.) y los costos del transporte. En este caso, el DSS está integrado por dos módulos, por un lado un Módulo Generador de Patrones de Corte, con base en un algoritmo heurístico; y, por otro lado, un Módulo Global de Optimización de Surtido, con base en programación dinámica. El primero módulo identifica las potenciales estrategias de trozado y el segundo módulo determina la combinación que maximiza el valor económico del producto. GUNNARSSON *et al.* (2007) presentan un modelo matemático de la cadena de suministro que incluye un gran número de variables continuas y un conjunto de variables binarias para reflejar las decisiones sobre la combinación de productos y selección pedido del cliente. El modelo permite definir el programa de transporte de materias primas procedentes de las zonas de cosecha a las fábricas, el mix de productos, la demanda y la distribución de los productos a los clientes. CHAUHAN *et al.* (2009) plantean, por su parte, un modelo basado en programación mixta-entera que minimiza los costos de cosecha y transporte bajo

restricciones de satisfacción de la demanda. El objetivo de fondo es comparar la performance de dos técnicas de resolución, una heurística y otra numérica. Finalmente concluye que la técnica numérica presenta una mejor performance en escenarios medianos-grandes. Yu *et al.* (2014) exponen un modelo basado en programación mixta-entera para la planificación de una cadena de suministro en tres niveles, siendo los rodales el nivel más alto, seguido por las estaciones de pre-tratamiento y finalmente las plantas generadoras de energía. El objetivo del modelo es la determinación de un programa de cosecha y flujo de biomasa para energía que minimice los costos de cosecha, transporte, procesamiento previo de la biomasa y stock. CAMPANELLA *et al.* (2014) propone un modelo multiobjetivo de programación mixta-entera lineal para el diseño sustentable de la cadena de suministro, teniendo en cuenta variables económicas y ambientales mediante la metodología *Epsilon Constraint*. El modelo de optimización permite resolver el diseño óptimo de una cadena de suministro, permitiendo identificar los posibles lugares de instalación de las plantas, el tipo de producto a elaborar y los flujos entre los nodos. SHABANI *et al.* (2014) abordaron el problema de la SCM para el caso en el que la biomasa de la madera está destinada a la producción de electricidad. Estos proponen un modelo basado en programación no lineal mixta-entera para la SCM definiendo como objetivo minimizar los costos. Esta herramienta permite encontrar el escenario óptimo y evaluar diferentes configuraciones. BROZ (2015) propone un modelo multiplanta, multiproducto, multiobjetivo y multiperíodo para una SCM en la cual se incorporan aspectos de manejo forestal de nivel táctico y estratégico, aspectos de logística y ambientales. TRONCOSO *et al.* (2015) presenta un modelo, con base en programación mixta-entera, para la gestión para empresas integradas verticalmente. El objetivo de la herramienta es determinar qué rodal cosecha, cuándo, dónde enviar la materia prima y los distintos productos terminados. Mediante este trabajo se determinó que la gestión en la que se integra el bosque, la industria y los consumidores presenta una mejor performance que una gestión independiente.

Planificación forestal e investigación operativa

Para MEYER *et al.* (1961), el manejo forestal es el arte y la técnica que permite organizar la producción forestal con una base de rendimiento continuo. La planificación forestal se divide en niveles; en el nivel más alto de la jerarquía se encuentran los procesos de *planificación estratégica*, con un horizonte de planificación superior a 30 años. En ésta, se fijan los objetivos a largo plazo y se definen las condiciones bajo las cuales se debe operar. Se definen como decisiones estratégicas: políticas globales de manejo, definición de capacidad de producción, selección de productos finales, adquisición de recursos, entre otras.

Por otro lado, la *planificación táctica*, definida en un horizonte entre 3 a 10 años, busca programar las operaciones de cosecha, especificando áreas en una escala de tiempo más fina. Son decisiones tácticas: lugar y momento de aplicación de los tratamientos silvícolas, la construcción de caminos forestales y/o mantenimiento de las vías existentes, entre otras. Finalmente, en la *planificación operativa* se definen programas a corto plazo, generalmente menor a 3 años. Se define como decisiones operativas: la planificación de las siembras y plantaciones, el transporte forestal, la selección y localización de maquinaria de cosecha, la organización del capital humano, los arreglos de caminos, entre otras (BROZ, 2015; BETTINGER *et al.*, 2009).

En la actualidad existe una gama de desarrollos que apuntan a abordar distintos problemas de gestión forestal. Dentro de las primeras aplicaciones de IO en la temática podemos mencionar a GILMORE y GOMORY (1961), quienes aplican Programación Lineal (PL) para resolver problemas de trozado de fustes o *cutting stock problem*. CURTIS (1962) propone un modelo de PL para la gestión de propiedades forestales. Johnson y Scheurman (1977) sintetizan y analizan en su trabajo dos modelos de gestión, denominado Modelos Tipo I y II, que sientan la base del ordenamiento sustentable. Barros y WEINTRAUB (1982) desarrollan un modelo de planeamiento para industrias verticales demostrando la necesidad de que las áreas de producción de madera sean divididas en clases o áreas con propiedades uniformes.

Dentro de las aplicaciones más recientes podemos mencionar, por ejemplo, a DÍAZ-BALTEIRO *et al.* (2009), quienes plantean un modelo de planificación de la cosecha, mediante programación por metas, en plantaciones de *Eucalyptus globulus* Labill en Galicia, España. En este caso en particular, los autores utilizan el modelo tipo II propuesto por JOHNSON Y SCHEURMAN (1977), el cual supone igual productividad en todos los rodales ya que admite una sola función de crecimiento para todo el sistema. Por su parte, VERDÍN *et al.* (2009) proponen una metodología para analizar y resolver un problema forestal que involucra el manejo de varios bienes y servicios del bosque en una propiedad pública en México. Para esto, los autores tomaron en cuenta la opinión de productores y técnicos forestales para construir funciones de respuesta para diez objetivos. Mediante programación por compromiso determinaron la mejor combinación de esas variables. ALDEA *et al.* (2014) proponen un procedimiento para la integración de varios servicios ecosistémicos en la gestión forestal multicriterio. Los criterios seleccionados para el modelo son: producción de madera, producción de hongos silvestres comestibles, captura de carbono, valor presente neto de la inversión y, finalmente, la sostenibilidad del manejo forestal definido por un bosque normal. GIMÉNEZ *et al.* (2013) proponen un método secuencial basado en

programación por metas extendida para el manejo de plantaciones con fines industriales de *Eucalyptus globulus* Labill. Se definieron como metas el VAN, volumen de madera cosechada y la captura neta de carbono. En este caso se generan varias alternativas de manejo y posteriormente se establece un ranking de acuerdo a la sostenibilidad de alternativa. MÉNDEZ (2013) formula un modelo de optimización multiobjetivo en el cual incluye la producción maderera y el secuestro de carbono para una plantación de teca (*Tectona grandis* L.). El resultado es un plan de cortas que indica cuáles rodales deben aplicarse y a qué intensidad en cada período. Debido a la complejidad y uso de relaciones no lineales, se deben utilizar meta-heurísticos como Algoritmos Genéticos y Simulated Annealing.

Otra herramienta de mucha utilidad es la simulación estocástica a través del Método Montecarlo (HILLIER Y LIEBERMAN, 2010). Este es un método estadístico-numérico utilizado para evaluar expresiones matemáticas que son complejas y costosas de llevar a cabo mediante métodos analíticos, como por ejemplo el Algoritmo Simplex. ACUÑA Y DRAKE (2003) aplican el MC para analizar el riesgo de una inversión forestal debido a que consideran que las decisiones basadas en escenario determinista son poco realistas. Estos autores consideran como factores de riesgo el precio de los productos, la tasa de descuento y los costos. DEL RÍO *et al.* (2003) utiliza el MC para estudiar los índices de diversidad estructural en las masas forestales. RODRIGUEZ Y DÍAZ-BALTEIRO (2006) utilizan técnicas como la programación dinámica y la simulación Montecarlo para optimizar tanto la duración como el número de rebrotes en plantaciones de *Eucalyptus spp.* en base a distintos contextos.

La foresto-industria e investigación operativa

Si bien se puso en relieve el rol de la IO en la logística y planificación forestal, bajo distintos enfoques, especies y contextos, existe un sinfín de aplicaciones en otros sectores de la cadena de valor que vale la pena mencionar. Por ejemplo, MANESS Y NORTON (2002) describen un sistema de planificación para múltiples productos con valores y demanda fluctuante, por medio del cual establece políticas óptimas de gestión de un aserradero. GAUDREAU *et al.* (2010) presentan una herramienta de gestión para un aserradero, definiendo un programa de producción que minimiza la acumulación de stock y penaliza las demoras en satisfacer pedidos. El programa optimiza el aprovechamiento de las cámaras de secado y minimiza los costos de acabado de productos terminados. BEN ALI *et al.* (2014) proponen una herramienta para la gestión de la cadena de valor de los productos forestales que integra las operaciones y las ventas en función a los precios y las demandas estacionales. BAJGIRAN *et al.* (2014) desarrolla una herramienta, con base en programación mixta-entera, para mejorar

la cadena de valor de la madera, desde la compra de rollos, el envío a las plantas, el proceso de aserrío y la distribución en el mercado por los distintos canales. El objetivo es establecer un plan integral que minimice los pedidos atrasados y los costos totales. VARAS *et al.* (2014) proponen un modelo de optimización robusto, basado en el modelo determinístico de MATURANA *et al.* (2010), para la planificación de la producción de un aserradero en donde hay incertidumbre en los niveles de suministro de troncos y de la demanda de los productos terminados. RAFIEI *et al.* (2015) plantean un modelo numérico para la planificación de una planta de remanufactura de madera, en la que hay incertidumbre sobre la demanda, y en la que los tiempos de preparación dependen de la capacidad y de la secuencia de producción. El propósito es incrementar el nivel de servicio y mantener los niveles de stock en un tamaño razonable. TRONCOSO MATAMOROS (2015) propone una herramienta que permite optimizar la utilización de la materia prima y la capacidad instalada en las plantas de producción. Para esto el autor propone implementar una herramienta que incorpore una lógica de negocio a través de programación matemática, para apoyar la toma de decisiones en el proceso, acompañado de un rediseño que mejore la coordinación entre los distintos actores involucrados e inserte la herramienta en la arquitectura de procesos de la empresa. Finalmente, dentro del campo de la simulación dinámica, WOITSCHACH (2014) utiliza una herramienta, con base en *Visual Interactive Modelling Simulation* (VIMS), para determinar la utilización de las máquinas principales en un aserradero en orden a incrementar la eficiencia de los sistemas de producción.

Gestión de sistemas e investigación operativa

Con las herramientas que integran la IO es posible abordar todo tipo de problema, desde aspectos macro como un ecosistema hasta aspectos micro como procesos biológicos, en donde intervienen microorganismos como bacterias y virus. Con el fin de ilustrar esto podemos mencionar, por ejemplo, el trabajo de SENANTE *et al.* (2013), el cual se plantea un modelo de optimización para la gestión de recursos hídricos en cuencas deficitarias integrando múltiples ofertas, múltiples demandas de agua y las conexiones físicas correspondientes. Integración de aspectos de IO y gestión de cuencas hídricas podemos encontrar en DUAN *et al.* (1994), SRIVASTAVA *et al.* (2002), SRIVASTAVA *et al.* (2003), entre otros.

Debido al carácter multidimensional de los sistemas, ya sea un ecosistema, bioma, comunidad, o cuenca hidrográfica, las técnicas multicriterio suelen ser las más recomendadas debido a la flexibilidad de incorporar varios objetivos. Para MEZA-RODRÍGUEZ *et al.* (2011) y RUIZ Y ABARZÚA (2010) las técnicas multicriterio son una herramienta para la solución de los problemas espaciales complejos ya que facilita la obtención, gestión, manipulación, análisis, modelado,

representación y salida de información, siendo un instrumento versátil y potente para resolver problemas complejos del territorio. En la actualidad existe una gama de paquetes libres y comerciales que sirven de apoyo a las distintas instituciones para establecer políticas o planes de gestión a nivel comunitaria o territorial. El Marco para la Evaluación de Sistemas de Manejo de recursos naturales incorporando Indicadores de Sustentabilidad (conocido como MESMIS³) es una herramienta de este tipo. MESMIS ayuda a evaluar la sustentabilidad de sistemas de manejo de recursos naturales, con énfasis en el contexto de los productores campesinos y en el ámbito local, desde la parcela hasta la comunidad, integrando desde aspectos económicos hasta ambientales.

En RÖNNQVIST *et al.* (2015) se presenta la contribución y aplicación de la IO en el sector forestal a partir de un análisis de 33 problemas típicos del sector, desde manejo forestal, cadena de suministros, modelos multiobjetivo, enfoques determinísticos y estocásticos. Esta lectura permite contemplar aspectos que escapan de este artículo y enriquecen al lector dando una visión holística sobre el potencial de la herramienta y, en consecuencia, la necesidad de un desarrollo a nivel local.

CONCLUSIONES

La IO es hoy en día, y desde hace algunas décadas, una de las herramientas de gran efectividad como soporte a las decisiones. Esta afirmación se encuentra respaldado por la mejora de la eficiencia en numerosos ámbitos en distintos casos alrededor del mundo, desde la logística, finanzas, economía, sector forestal, foresto-industria, entre otras.

El ingeniero forestal tiene como campo de acción la gestión de sistemas complejos como plantaciones forestales con fines industriales, bosques nativos, operaciones de cosecha, industrias forestales, cuencas hidrográficas, entre otros. En los mismos es imposible tomar buenas decisiones sin tener en cuenta los principales aspectos que lo gobiernan. Para lograr esto, se debe abstraer o simplificar el sistema mediante un modelo matemático y de esta manera reducir el sistema real a un número finito de factores. Esto permite al profesional forestal experimentar sobre el sistema abstracto y tomar la mejor decisión posible. Es importante recalcar que la IO no busca reemplazar al profesional, sino apoyar su decisión en un marco científico, minimizando el "arte" en la toma de decisión.

Por lo expuesto en este documento, se considera que la IO es una asignatura con un futuro muy promisorio en la formación del ingeniero forestal y cuenta con respaldo suficiente para formar parte de la

currícula de dicha carrera. La IO brinda las herramientas para la toma de decisiones en diferentes áreas de la ingeniería forestal, como ser: cosecha forestal, ordenamiento forestal, economía forestal, administración forestal, ordenamiento de cuencas hidrográficas, protección forestal, silvicultura, industrias forestales, entre otras. Además, aspectos de la IO como la optimización lineal, no lineal, mixta-entera y algoritmia dan pie a abordajes particulares en áreas como ecología, planificación del paisaje y procesos biológicos, entre otros.

BIBLIOGRAFÍA

ACUÑA E.; Drake F., 2003. Análisis del riesgo en la gestión forestal e inversiones silviculturales: una revisión bibliográfica. *Bosque*, 24(1), 113-124.

AFOA, 2015. Propuesta de políticas públicas quinquenio 2015/2020. Asociación Forestal Argentina. En http://www.afoa.org.ar/novedades_detalle.php?p=103, consultado en el mes de diciembre del año 2015.

ALDEA, J.; Martínez-Peña, F.; Romero, C.; Diaz-Balteiro, L., 2014. Participatory Goal Programming in Forest Management: An Application Integrating Several Ecosystem Services. *Forests*, 5(12): 3352-3371.

ARCE, J.E., 2000. Um sistema de análise, simulação e otimização do sortimento florestal em função da demanda por multiprodutos e dos custos de transporte. Tesis de Doctorado. Universidad Federal de Paraná, Curitiba, Brasil. 125 pp.

ARCE, J.E., 1997. Um sistema de programação do transporte principal de multiprodutos florestais visando a minimização de custos. Tesis de Maestría. Universidad Federal de Paraná, Curitiba, Brasil. 98 pp.

BAJGIRAN, O.; Zanjani, M.; Nourelfath, M., 2014. Integrated tactical planning in lumber supply chains. *Proceedings of the 2014 Industrial and Systems Engineering Research Conference*, Montréal, Canada.

BARROS, O.; Weintraub, A., 1982. Planning for a vertically integrated forest industry. *Operations Research*, 30(6): 1168-1182.

BEN ALI, M.; Gaudreault, J.; D'Amours, S.; Carle, M-E., 2014. A multi-level framework for demand fulfillment in a make-to-stock environment- a case study in canadian softwood lumber industry. 10th International Conference of Modeling and Simulation. Nancy, France.

³<http://mesmis.gira.org.mx>

- BETTINGER, P.; Boston, K.; Siry, J.; Grebner, D., 2009. Forest management and planning. 1era ed. Academic Press, California. 331 pp.
- BROZ, D., 2015. Técnicas de simulación y optimización aplicadas a la planificación forestal. Editorial de la Universidad Nacional del Sur (Ediuns). Bahía Blanca, Argentina. 213 pp.
- CAMPANELLA, S.; Montagna, M.; Corsano, G., 2014. Planeamiento óptimo de una cadena de suministros de la industria maderera en Argentina. Jornadas de Jóvenes investigadores, Universidad Nacional del Litoral. Rosario, Argentina.
- CANITROT, L.; García, N., 2012. La logística como herramienta para la competitividad: El rol estratégico de la infraestructura. 1era Ed. Cámara Argentina de la Construcción. Argentina.
- CAÑETE, G., 2011. Impacto en las economías regionales por el aumento en los costos de transporte. Unión Industrial Argentina. Argentina.
- CHAUHAN, S.S.; Frayret, J.M.; Lebel, L., 2009. Multi-commodity supply network planning in the forest supply chain. *European Journal of Operational Research*, 196(2), 688-696.
- CURTIS, F., 1962. Linear programming the management of a forest property. *Journal of Forestry*, 60(9): 611-616.
- DEL RÍO, M.; Montes, F.; Cañellas, I.; Montero, G., 2003. Revisión: Índices de diversidad estructural en masas forestales. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 12(1), 159-176.
- DÍAZ-BALTEIRO, L.; Bertomeu, M.; Bertomeu, M., 2009. Optimal harvest scheduling in Eucalyptus plantations: A case study in Galicia (Spain). *Forest Policy and Economics*, 11(8): 548-554.
- DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; Gupta, V.K., 1994. Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. *Journal of hydrology*, 158(3), 265-284.
- GAUDREAU, J.; Forget, P.; Frayret, J-M.; Rousseau, A.; Lemieux, S.; D'Amours, S., 2010. Distributed operations planning in the softwood lumber supply chain: models and coordination. *International Journal of Industrial Engineering*, 17(3): 168-189.
- GILMORE, P.C.; Gomory, R.E., 1961. A linear programming approach to the cutting stock problem. *Operations Research*, 9(6): 848-859.
- GIMÉNEZ, J.; Bertomeu, M.; Díaz-Balteiro, L.; Romero, C., 2013. Optimal harvest scheduling in Eucalyptus plantations under a sustainability perspective. *Forest Ecology and Management*, 291(1): 367-376.
- GONZÁLEZ, J.; Guasch, J.; Serebrisky, T., (2008). Improving logistics costs for transportation and trade facilitation. The World Bank, Latin America and Caribbean Region. Policy research working paper series 4558. 46 pp.
- GUNNARSSON, H.; Rönnqvist, M.; Carlsson, D., 2007. Integrated production and distribution planning for Södra Cell AB. *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms*, 6(1), 25-45.
- HILLIER, F.S.; Lieberman, G.J., 2010. Introducción a la investigación de operaciones. 9na Edición, McGraw-Hill, México. 978 pp.
- JOHNSON, K.; Scheurman, H., 1977. Techniques for prescribing optimal timber harvest and investment under different objectives - Discussion and synthesis. *Forest Science. Monograph* 18.
- JUNIOR, M.; Lazaretti, D.; Vieira, A., 2014. A eficiência logística na cadeia do gusa a biorredutor. En XVII Seminário de Atualização sobre Sistemas de Colheita de Madeira e Transporte Florestal. Curitiba, Brasil.
- MAC DONAGH, P.; Berger, S.; Fhaler, J.; Fornaso, G.; Berlinger, C.; Paiva, D.; Bedrij, N., 2012. La experiencia del aglomerado productivo forestal misiones y corrientes: Fase II, los proyectos sectoriales. XXVI Jornadas Forestales de Entre Ríos. Concordia, Argentina.
- MANESS, T.; Norton, S., 2002. Multiple Period Combined Optimization Approach to Forest Production Planning. *Scand. J. For. Res.*, 17(1): 460-471.
- MARTÍNEZ, F.; De Cristófaró, G.; Sánchez, L.; Hantke, B.; Diaz, A., 2014. El sistema de transporte en argentina: Análisis de situación, problemáticas y propuestas para el Sistema de Transporte en Argentina. Informe del CECREDA, 79 pp. En: <http://www.cecreda.org.ar/archivos/nNiKb.pdf>, consultado en el mes de diciembre del año 2015.
- MATURANA, S.; Pizani, E.; Vera, J., 2010. Scheduling production for a sawmill: A comparison of a mathematical model versus a heuristic. *Computers & Industrial Engineering*, 59(4): 667-674.
- MÉNDEZ, M., 2013. Modelado de un sistema de planificación y manejo de plantaciones forestales

industriales. Tesis Doctoral. Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela. 263 pp.

MEYER, H.; Recknagel, A.; Stevenson, D.; Bartoo, R., 1961. *Forest Management*. 2da ed. McGraw-Hill, New York. 282 pp.

MEZA-RODRÍGUEZ, D.; Martínez, L.M.; Jardel-Peláez, E.J.; Benavides-Solorio, J.D., 2011. El análisis multicriterio como herramienta para la planificación territorial en cuencas. Segundo Congreso Nacional de Manejo de Cuencas Hidrográficas. Villahermosa, México. En: http://www.pronacose.gob.mx/pronacose14/contenido/documentos/ANALISIS_MULTICRITERIO_CUENCAS.pdf, consultado en el mes de diciembre del año 2015.

RAFIEI, R.; Nourelfath, M.; Gaudreault, J.; Santa-Eulalia, L.A.; BOUCHARD, M., 2015. Dynamic safety stock in co-production demand-driven wood remanufacturing mills: A case study. *Int. J. Production Economics*, 165(1): 90–99.

RIVERO, D.S., 2008. *Metodología de la Investigación*. Edición Shalom. Argentina. 94 pp.

RODRÍGUEZ, L.C.; Díaz-Balteiro, L., 2006. Régimen óptimo para plantaciones de eucaliptos en Brasil: Un análisis no determinista. *Interciencia: Revista de ciencia y tecnología de América*, 31(10), 739-744.

RÖNNQVIST, M.; D'Amours, S.; Weintraub, A.; Jofre, A.; Gunn, E.; Haight, R.; Martell, D.; Murray, A.; Romero, C., 2015. Operations Research challenges in forestry: 33 open problems. *Annals of Operations Research*, 232(1), 11-40.

RUIZ, C.; Abarzúa, J., 2010. Evaluación multicriterio/multiobjetivo aplicada a los usos y coberturas de suelo en la cuenca de chillán. *Tiempo y Espacio*, 21(25): 1-15.

SCHWAB, K., 2014. *The Global Competitiveness Report 2014–2015*. World Economic Forum. En http://www3.weforum.org/docs/WEF_GlobalCompetitivenessReport_2014-15.pdf, consultado en el mes de diciembre del año 2015.

SENANTE, M.M.; Sancho, F.H.; Arce, M.M.; Garrido, R.S., 2013. Optimización de la gestión de recursos hídricos en cuencas deficitarias. *Anales de ASEPUMA*, (21): 32-19.

SHABANI, N.; Sowlati, T.; Ouhimmou, M.; Ronnqvist, M., 2014. Tactical supply chain planning

for a forest biomass power plant under supply uncertainty. *Energy*, 78(1), 346-355.

SRIVASTAVA, P.; Hamlett, J.M.; Robillard, P.D.; Day, R.L., 2002. Watershed optimization of best management practices using AnnAGNPS and a genetic algorithm. *Water Resources Research*, 38(3), 3-1.

SRIVASTAVA, P.; Hamlett, J.M.; Robillard, P.D., 2003. watershed optimization of agricultural best management practices: continuous simulation versus design storms. *Journal of the American Water Resources Association*, 39(5): 1043–1054.

TAMAYO, M., 2003. *El proceso de la investigación científica*. 4ta Ed. Editorial Limusa. México. 440 pp.

TRONCOSO, J.; D'Amours, S.; Flisberg, P.; Rönnqvist, M.; Weintraub, A., 2015. A mixed integer programming model to evaluate integrating strategies in the forest value chain-A case study in the Chilean forest industry. *Canadian Journal of Forest Research*, 45(7): 937-949.

TRONCOSO MATAMOROS, C.A., 2015. *Optimización de los procesos de planificación de la producción de aserraderos*. Tesis de Maestría. Universidad de Chile. 150 pp.

VARAS, M.; Maturana, S.; Pascual, R.; Vargas, I.; Vera, J., 2014. Scheduling production for a sawmill: A robust optimization approach. *Int. J. Production Economics*, 150(1): 37–51.

VERDÍN, G.; Díaz, J.; Linares, M.; Tecle, A., 2009. Aplicación de técnicas multicriterio en el manejo integral forestal en Durango, México. *Madera y Bosque*, 15(1):27-46.

WOITSCHACH, G., 2014. Selección del flujo óptimo en una planta de aserrio con dos equipos principales de corte por medio de simulación. XXV Escuela de Perfeccionamiento en Investigación Operativa. San Nicolás de los Arroyos, Buenos Aires, Argentina.

YU, Z.; Klein, C.; Jang, W., 2014. Multi period operational planning in woody biomass system. En: *Industrial and systems engineering research conference*. Montreal, Canada.