



7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

**Gestión del monte: servicios
ambientales y bioeconomía**

26 - 30 junio 2017 | Plasencia
Cáceres, Extremadura

7CFE01-080

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales
Plasencia. Cáceres, Extremadura. 26-30 junio 2017
ISBN 978-84-941695-2-6

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Empleo de herramientas de optimización en la gestión de plantaciones forestales. Una evaluación crítica

BELAVENUTTI, P.¹, NOBRE, S.¹, ROMERO, C.¹, DÍAZ BALTEIRO, L.¹

¹ Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Montes, Forestal y del Medio Natural, Universidad Politécnica de Madrid.

Resumen

La aplicación de herramientas basadas en la optimización en la gestión forestal ha constituido una línea de investigación fructífera en las últimas décadas. Sin embargo, las publicaciones asociadas a la aplicación de estas técnicas en la gestión de plantaciones forestales industriales (aquellas con turnos cortos o medios, siempre menores de 50 años) han sido en un número menor a la importancia que presentan estos sistemas forestales a la hora de proporcionar diversos bienes y servicios a la sociedad. En este trabajo se ha realizado una revisión de la literatura donde, a través del análisis de 66 artículos publicados en revistas contenidas en ISI Web of Science, se analizan, entre otros aspectos, las técnicas empleadas, su evolución, el tipo de planificación (estratégica, táctica u operativa), las funciones objetivo y restricciones consideradas o el tipo de software empleado en estos estudios. Los resultados muestran cómo el Modelo I ha sido el más frecuentemente empleado en estos trabajos y cómo la componente espacial presenta una importancia creciente. Por otro lado los métodos clásicos de optimización, como la programación mixta, han sido los más abundantemente empleados, aunque también se debe destacar el empleo de algunas técnicas multicriterio.

Palabras clave

Optimización, plantaciones industriales, gestión forestal, programación de cortas.

1. Introducción

A pesar de la creciente importancia que presentan las plantaciones industriales a la hora de suministrar diferentes outputs a la sociedad (LANDSBERG y WARING, 2014), no abundan en la literatura trabajos que analicen el empleo de las herramientas de optimización más habitualmente empleadas en la gestión de estos sistemas forestales. En efecto, dado que el manejo de estas plantaciones intensivas (ver RODRIGUEZ et al. (2014) para una definición del término plantación industrial) requiere de metodologías que proporcionen al gestor soluciones óptimas con el fin de alcanzar los objetivos que se pretenden, dichas metodologías no han sido convenientemente analizadas para este tipo de sistemas forestales. Así, en libros específicos de gestión de plantaciones forestales no abundan capítulos dedicados a estos temas (EVANS, 2009; BAUHUS et al., 2010), a excepción de BORGES et al., (2014a).

En esta línea, se puede analizar de forma somera la literatura que comprende la gestión forestal y el empleo de las principales técnicas de optimización, diferenciando cuando son plantaciones del resto de trabajos. En efecto, si se realizara una búsqueda en ISI Web of Science que haga referencia a las técnicas de optimización habitualmente más empleadas, añadiendo el término “forest management” y se repite la operación excluyendo las plantaciones (“not plantations”) se obtiene, por diferencia, el número de trabajos que se refieren a plantaciones. Realizando esta operación (Figura 1), nos encontramos que el número de artículos publicados que se corresponden al empleo de estas técnicas en plantaciones son reducidos, comprobándose que en ningún caso se llega al 10% de los trabajos publicados, y el promedio es inferior al 5%.

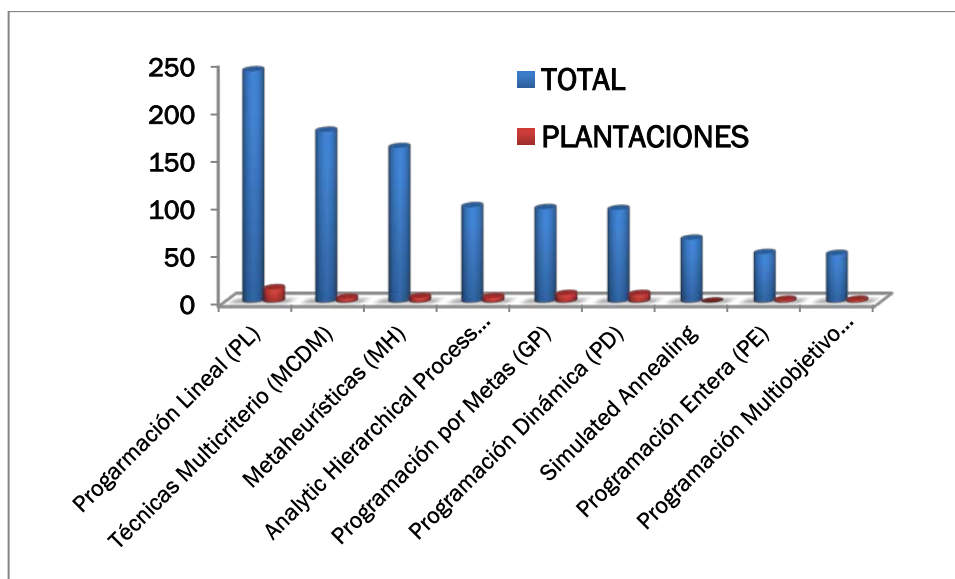


Figura1. Número de artículos presentes en ISI Web of Science que unen la expresión “forest management” con distintas técnicas de optimización, diferenciando entre el total (en color azul) y las plantaciones (en color rojo)

Por último, aunque ya se han publicado otras revisiones bibliográficas dedicadas a la aplicación de estas técnicas en la gestión forestal (e.g., WEINTRAUB y BARE, 1996; DIAZ-BALTEIRO y ROMERO, 2008; UHDE et al., 2015), hasta lo que conocemos, no hay ninguna específicamente orientada a este tipo de sistemas forestales. Lo mismo se puede decir en sentido contrario: las revisiones bibliográficas sobre plantaciones forestales suelen obviar el empleo de técnicas de optimización (BROCKERHOFF et al., 2008; PAQUETTE y MESSIER, 2010; PAWSON et al., 2013).

2. Objetivos

Los resultados de la Figura 1 muestran que en la literatura forestal las aplicaciones de las distintas técnicas de optimización a problemas de gestión forestal se han centrado en otros tipos de masas forestales. En este trabajo se pretende analizar el empleo de estas técnicas en las plantaciones industriales, analizando de forma crítica algunas de las cuestiones que presentan hoy en día más importancia en la literatura. Es decir, no se pretende únicamente realizar una simple contabilidad del empleo de una determinada técnica o función objetivo, sino relacionar los resultados de esta búsqueda bibliográfica con diversos aspectos relacionados con la gestión de plantaciones forestales, así como otros específicos de estos sistemas forestales.

3. Metodología

Se ha realizado una búsqueda centrada únicamente en artículos recogidos en la base de datos ISI Web of Science (WOS), introduciendo los términos de busca “forest\$plantation* AND harvest\$schedule* OR operational\$research* OR linear\$program* OR integer\$program* OR non\$linear* OR multi\$criteria* OR decision\$system* OR goal\$program* OR multi\$objective* OR analytic\$process* OR stochastic\$optimization* OR heuristic*”. Estas búsquedas se han actualizado a 21 de julio de 2016.

Uno de los motivos principales de descarte de algunos trabajos ha sido la consideración del término plantación. Para evitar la inclusión de trabajos que presenten otros propósitos, se han considerado únicamente aquellos artículos donde claramente se manifieste que la plantación presente un carácter industrial, y unos turnos cortos o medios. En concreto, se ha tomado como límite superior en cuanto al turno la edad de 50 años. A esta edad el atractivo para la industria se reduce, y algunos autores ya hablan de “older aged stands” (PAWSON et al., 2013). Por otro lado, no se han

contabilizado los trabajos asociados a plantaciones que presentan un objetivo no relacionado con la provisión de ciertos productos para la industria (plantaciones por motivos de conservación, de restauración, etc.). Finalmente, por limitaciones de espacio se ha decidido no incluir una definición de cada metodología de optimización considerada. Un resumen de la mayoría de las mismas puede encontrarse en: DIAZ-BALTEIRO y ROMERO (2008), KANGAS et al. (2015), YOSHIMOTO et al. (2016) ó EZQUERRO et al. (2016).

4. Resultados

Como resultado de la búsqueda bibliográfica anteriormente descrita se han obtenido 203 artículos, que han sido convenientemente filtrados hasta alcanzar 66 artículos. Los resultados principales de este análisis se recogen en la Tabla 1. Según se puede comprobar en dicha Tabla, el 68,2% se corresponde a casos de estudio, siendo el resto propuestas metodológicas. Casi todos los trabajos utilizan técnicas deterministas y, desde el punto de vista geográfico, Brasil es el país más representado, con cerca del 38% de los artículos, seguido a larga distancia de países como España, Chile, Colombia, Cuba, México, Nueva Zelanda y Venezuela. Por otro lado, las especies más representadas son las pertenecientes al género *Eucalyptus* (en 53% de los artículo), seguida por las correspondientes al género *Pinus* (30%).

Tabla 1. Resultados Generales del estudio

Resultados Generales		
Número de artículos		66
% Casos de estudio		68.2%
% Trabajos teóricos		31.8%
Artículos con modelos deterministas		97.0%
Artículos con modelos no-deterministas		3.0%
Países más representados		
	Brasil	37.9%
	España	10.6%
	Chile	7.6%
Especies más representadas		
	<i>Eucalyptus</i> spp.	53.0%
	<i>Pinus</i> spp.	30.3%

En cuanto a la evolución temporal, llama la atención el notable incremento que se ha producido a partir del año 2000, como se puede apreciar en la Figura 2. En esta figura se ha procedido a agrupar las principales técnicas de optimización utilizadas en los artículos que se han revisado siguiendo un esquema parecido al incorporado en EZQUERRO et al. (2016). Así, se han definido tres grandes grupos de técnicas. El primero se denomina Métodos Clásicos de Optimización e incluye a la Programación Lineal (PL), a la Programación Entera (PE), Programación Mixta (PM) y a la Programación Dinámica (PD). Otro grupo comprende a las Técnicas Metaheurísticas: “Simulated Annealing” (SA), Algoritmos Genéticos (AG) y Búsqueda Tabú (BT). Finalmente, el último grupo contiene a las Técnicas de Decisión Multicriterio (“Multi-Criteria Decision Making, MCDM), donde las más utilizadas han sido la Programación por Metas (“Goal Programming”, GP) y el Método de las Jerarquías Analíticas (Analytic Hierarchical Process, AHP). En la Figura 2 se muestra la evolución temporal del empleo de las técnicas OR en este tipo de sistemas forestales. Se puede apreciar cómo su empleo ha experimentado un notable auge a partir del año 2000, en especial en lo referido a las Técnicas Metaheurísticas (MH) y MCDM. En efecto, hasta ese año apenas había representación de

estos dos grandes grupos de técnicas. Sin embargo, en los últimos años su uso se ha incrementado, en especial las técnicas multicriterio, sobrepasando desde el año 2000 en número a los trabajos que emplean métodos clásicos de optimización.

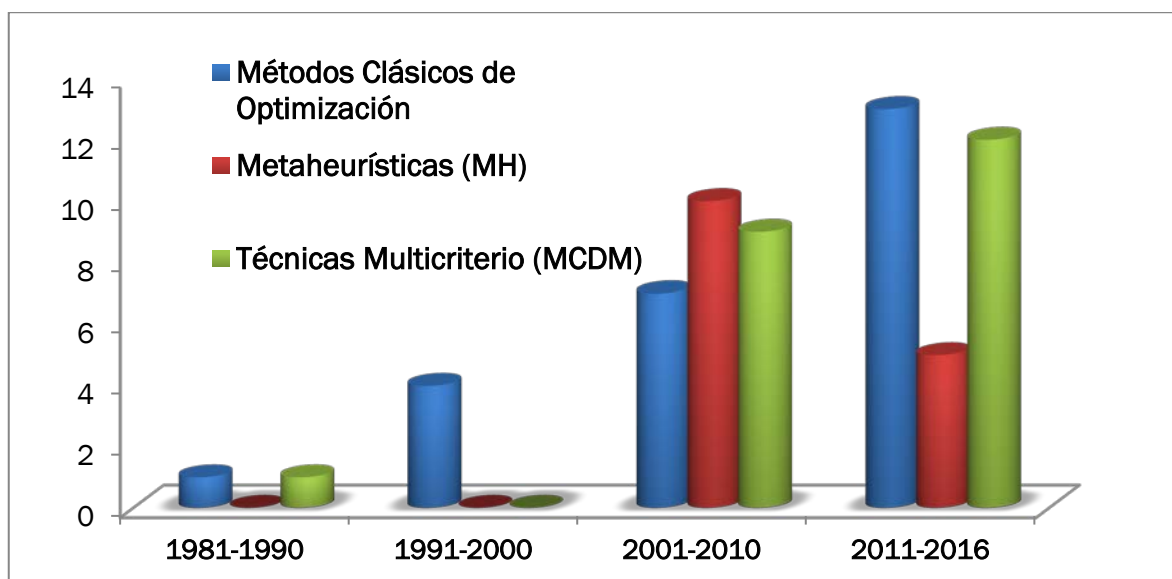


Figura 2. Evolución temporal de los artículos sobre la aplicación de estas técnicas en plantaciones industriales

Los resultados recogidos tanto en la Figura 2 como en la Tabla 2, muestran cómo de los 3 grandes grupos, el de Métodos Clásicos de Optimización es el más representado, seguido por el de MCDM y el de MH. En cuanto a las técnicas propiamente dichas, y tomando aquellas que se han utilizado al menos en 3 trabajos, las dos que más se repiten son PM and GP. Sin embargo, llama la atención cómo estas técnicas se han empleado de forma muy diversa si el trabajo era un caso de estudio o un modelo teórico. Como se puede apreciar en el caso de las MH la mayoría de los trabajos eran modelos teóricos, mientras que en el caso del empleo de las técnicas MCDM, más del 91% se ha realizado en casos de estudio.

Tabla 2. Técnicas de optimización más utilizadas

Grupo	Técnica	nº artículos	% casos de estudio
Métodos clásicos de Optimización		35	77.1%
	Programación Lineal	11	
	Programación Entera	5	
	Programación Mixta	15	
	Programación Dinámica	4	
Metaheurísticas		20	25.0%
	Simulated Annealing	4	
	Algoritmos Genéticos	6	
	Búsqueda Tabú	3	
	Otras	7	
Técnicas de Decisión Multicriterio		23	91.3%
	Programación por metas	14	
	AHP (Analytic Hierarchical Programming)	5	
	Otras	4	

Partiendo de que en la literatura se han utilizado frecuentemente distintas técnicas de optimización a la hora de resolver problemas de gestión forestal (WEINTRAUB y BARE, 1996, KAYA et al., 2016; YOSHIMOTO et al., 2016), se ha analizado a qué nivel temporal se ha aplicado estas técnicas en estas plantaciones industriales. A la hora de considerar los diferentes niveles temporales de planificación, se han considerado las definiciones clásicas de planificación estratégica, táctica y operativa (MCDILL, 2014; BORGES et al., 2014b), teniendo en cuenta que habitualmente están organizadas de modo jerárquico (BANHARA et al., 2010). En la Tabla 3 se aprecia cómo los trabajos revisados tenían prioritariamente una orientación estratégica, y el número de aplicaciones de carácter táctico u operativo es aproximadamente el mismo. Por otro lado, llama la atención que en varias ocasiones se unen en el análisis varios niveles de planificación. Una vez que se ha comprobado que la planificación forestal estratégica es donde más se emplean estas herramientas de optimización, cabría preguntarse qué modelo de planificación estratégica es el más utilizado, siguiendo la nomenclatura de JOHNSON and SCHEURMAN (1977). Los resultados de esta revisión muestran (Tabla 3) que se aplica mayoritariamente el Modelo I frente al Modelo II, aunque en numerosos casos los autores no han especificado el modelo que se ha empleado. En efecto, sólo en 17 artículos aparece reflejado si se trata de Modelo I ó Modelo II. Es necesario precisar que aunque existen indicios en otros trabajos que se habría empleado algún modelo (generalmente el Modelo I), se ha adoptado el criterio de contabilizar sólo aquellos que están explícitamente definidos por sus autores.

Tabla 3. Escala temporal y modelo de planificación estratégica más utilizados

Escala Temporal utilizada en la planificación	nº artículos
Estratégica	42
Táctica	15
Operativa	19
Trabajos con más de una escala temporal	
Estratégica y Táctica	6
Estratégica y Operativa	3
Táctica y Operativa	8
Modelos de Planificación Estratégica	
Modelo I	13
Modelo II	4

Si se analiza ahora las funciones objetivo que más frecuentemente se han utilizado, se aprecia cómo la más frecuentemente utilizada es la maximización del Valor Actual Neto (VAN) (Tabla 4). Sin embargo, se han contabilizado un número significativo de trabajos con objetivos no relacionados directamente con los aspectos financieros, como es el caso de la conservación de la biodiversidad. Uno de los más importantes, fundamentalmente por ciertas controversias asociadas a este tipo de sistemas forestales (CALVIÑO-CANCELA, 2013) es la biodiversidad. Además de los once trabajos donde aparece como objetivo, es preciso tener en cuenta que en otras ocasiones se ha decidido introducirla a través de restricciones o, de forma indirecta, a través de lo que se conoce como restricciones espaciales. Estas últimas restricciones se han utilizado frecuentemente, tal y como se puede apreciar en la Tabla 4. En dicha Tabla se han recopilado las restricciones habitualmente empleadas en los problemas de gestión forestal y se ha contabilizado la frecuencia con que se han utilizado en los artículos analizados. Se puede apreciar que la restricción más frecuente es la inclusión de una asociada a la obtención de un determinado volumen por período, seguido de las restricciones espaciales, de las relativas a un volumen homogéneo a lo largo del tiempo, y las asociadas a determinados problemas logísticos.

Tabla 4. Funciones objetivo y restricciones más utilizadas

Funciones Objetivo		nº artículos
	Maximizar VAN	44
	Maximizar Volumen	12
	Minimizar Costes	13
	Biodiversidad	11
Restricciones		
	Espaciales	21
	Carbono	9
	Biodiversidad, ambientales	11
	Volumen por período	45
	Regulación	11
	Igualdad cortas en cada período	19
	Inventario Final	2
	Vías de saca	12
	Otras restricciones logísticas	18

Aunque no se puede afirmar que en todas las ocasiones estas restricciones están unívocamente relacionadas con objetivos relacionados con la conservación de la biodiversidad, sí que por lo menos su inclusión en el manejo forestal favorece objetivos como la conservación de la biodiversidad. Con todo ello se puede afirmar que este objetivo está cada vez más presente en la gestión de estas plantaciones. La Figura 3 muestra este hecho, y llama la atención que hasta el año 2007 no haya aparecido el primer trabajo que considera la biodiversidad como un objetivo en la gestión.

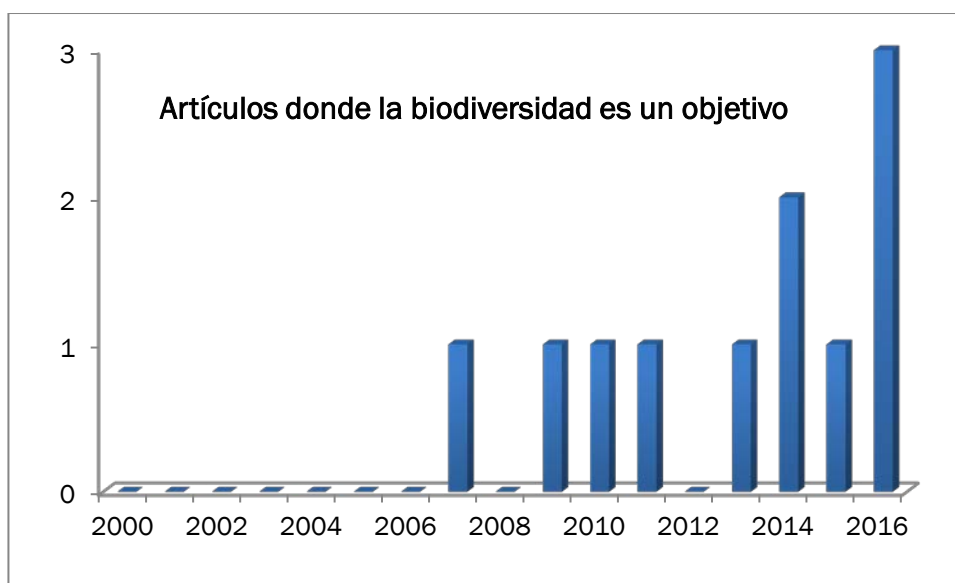


Figura 3. Evolución temporal de artículos donde la función objetivo está relacionada con la conservación de la biodiversidad

5. Discusión

La revisión que se ha realizado sobre los métodos de optimización utilizados para el manejo de plantaciones industriales ha mostrado que es un tema de actualidad, con un nivel de publicación muy notable en los últimos años. Este tipo de sistemas forestales presenta una importancia económica

creciente en algunos países (RODRIGUEZ et al., 2014). Sin embargo, llama la atención que, siguiendo a PAYN et al., 2015, no existe una relación directa entre aquellos países que producen más madera con destino distintas a industrias forestales y el número de artículos recogidos en este trabajo. En efecto, escasean trabajos de países como USA, China o India, aunque la excepción a este hecho es el caso de Brasil, país que ha sido considerado el más adecuado para realizar este tipo de inversiones en el período 2005-2011 (CUBBAGE et al., 2014).

Partiendo de que con esta revisión no se pretende responder a la pregunta de cuál sería la técnica más adecuada que se debería emplear en el manejo de estas plantaciones, los resultados obtenidos difieren de los obtenidos en EZQUERRO et al. (2016), donde se han analizado 179 artículos en un estudio sobre el empleo de estas técnicas en problemas relacionados con la conservación de la biodiversidad. Así, el grupo de métodos clásicos de optimización es el menos utilizado y, en cuanto a la técnica preferida, es SA, seguido de PM los más utilizados. En YOSHIMOTO et al. (2016) se analizan métodos de optimización en la gestión forestal diferenciando tres niveles a nivel espacial: el nivel rodal, nivel monte y nivel paisaje, a partir de una base de datos de 85 artículos. En los resultados a nivel rodal predominan las Técnicas MH, mientras que a nivel monte PE y PL son los más utilizados. Estas dos técnicas, en orden inverso, también son las más utilizadas a nivel paisaje.

Los resultados en relación con el empleo de estas técnicas en los diferentes niveles que habitualmente se consideran en la gestión forestal muestran un predominio de la planificación estratégica, aunque con numerosos ejemplos de planificación táctica y operativa. Aunque resulta lógico, en función del problema que se está abordando, que existan numerosos trabajos dedicados a la planificación operativa, esto no es lo común cuando se integran objetivos que no tienen una orientación productiva como es la biodiversidad (EZQUERRO et al., 2016). Por otro lado, y aunque la integración entre los diversos niveles no es siempre fácil (RÖNNQVIST et al., 2015) ni unívoca (KANGAS et al., 2014, McDILL, 2014), se han recogido un porcentaje elevado de trabajos que combinan más de un nivel de gestión. En concreto, se destacan los que combinan una planificación estratégica con aspectos operativa, lo que parece proporcionar beneficios económicos y ambientales en algunos casos (AUGUSTYNICZIK et al., 2016).

En relación a los modelos de planificación estratégica, no están claras las causas que justifican la elección de un método frente a otro, aunque recientemente este dilema ha suscitado bastante interés en la literatura. Así, McDILL et al. (2016) sostienen que el Modelo II supera al Modelo I cuando el número de períodos definidos en el horizonte de actuación es grande, así como que sea mayor el número de operaciones selvícolas se empleen. Sin embargo, MARTIN et al. (2016) sugieren que Modelo I supera al Modelo II cuando se consideran modelos espaciales. Ambas conclusiones podrían justificar la elección mayoritaria del Modelo I en plantaciones industriales. De hecho, a partir del año 2010 no se han detectado trabajos que empleen el Modelo II.

También se ha apreciado en los últimos años un aumento porcentual de los trabajos que emplean Técnicas MCDM. Esta tendencia se ha visto en otros trabajos de revisión sobre el empleo de estas metodologías en ámbitos forestales o ambientales (DIAZ-BALTEIRO y ROMERO, 2008; DIAZ-BALTEIRO et al., 2017). Sin embargo, a diferencia de DIAZ-BALTEIRO y ROMERO (2008), el número de trabajos que se pueden encuadrar en el epígrafe dedicado a la programación de cortas, incluyendo o no otros objetivos ambientales, es claramente creciente.

Además de las técnicas anteriormente descritas, resulta habitual que en numerosas ocasiones se apliquen metodologías que combinen más de una técnica de las anteriormente citadas. En ese caso, algunos autores denominan a las técnicas resultantes métodos híbridos (UHDE et al., 2015). Resulta indudable que el uso de metodologías híbridas facilita la resolución de problemas complejos que no serían fácilmente abordables con una única técnica. No obstante, los resultados de este trabajo no alcanzan el de otras revisiones relacionadas con la gestión forestal. Así, en EZQUERRO et al. (2016) el número de artículos que combina más de una técnica de optimización alcanza el 35%. Por

otro lado, en numerosas ecuaciones esta combinación de técnicas alcanza a las Técnicas de Decisión en Grupo (“Group Decision Making”, GDM). Varios autores sugieren agregar convenientemente las preferencias de los distintos stakeholders en los modelos para gestionar este tipo de plantaciones, ya que los resultados son susceptibles de modificarse (DÍAZ-BALTEIRO et al., 2016). Por último, muy pocos trabajos de los que se han analizado abordan estos problemas introduciendo el riesgo o la incertidumbre, razón por lo que no se han incluido en las tablas y figuras anteriores. Esta tendencia también se apunta en YOSHIMOTO et al. (2016).

La consideración de la biodiversidad como un objetivo de la gestión puede suponer unas implicaciones evidentes en cuanto a aspectos como las superficies de corta, los turnos empleados, la selvicultura, etc., pero es preciso señalar que también de forma indirecta estas plantaciones pueden suponer un beneficio indirecto a la biodiversidad si ello supone no alterar los bosques establecidos de forma natural (BROCKERHOFF et al., 2008). Sin embargo, desde un punto de vista operativo, la inclusión de este objetivo implica habitualmente que la planificación táctica y operativa ganen importancia y que tengan que utilizarse otras herramientas distintas de la programación lineal (EZQUERRO et al., 2016), incluyendo los métodos híbridos. No es casual la aparición de la biodiversidad como objetivo y, tal como se ha apreciado en la Figura 2, de forma paralela a la expansión en el empleo de las Técnicas Metaheurísticas y Multicriterio. Como afirman YOSHIMOTO et al. (2016), el uso de las Metaheurísticas se acentúa cuando aparecen aspectos espaciales. Es preciso insistir que, como se ha mostrado anteriormente, el empleo las restricciones espaciales es bastante frecuente.

Uno de los aspectos diferenciadores en relación a la gestión forestal que habitualmente se realiza en otros sistemas forestales es la relativamente poca presencia de las restricciones generalmente asociadas a la idea de monte normal. En efecto, si asumimos que esta idea se puede replicar obligando al cumplimiento simultáneo de las condiciones de regulación, igualdad de cortas en cada período y restricciones asociadas al inventario final, se ha comprobado que en ningún caso se han introducido simultáneamente estas restricciones. En concreto, se puede apreciar cómo la menos representada es la relativa al inventario final, lo que parece lógico ya que en estas masas la condición de persistencia se asume que está asegurada. Se ha demostrado como en trabajos donde se emplean técnicas MCDM la consecución de uno de estos objetivos (igualdad de cortas en cada período) en ciertas plantaciones entra en conflicto con la consecución de una determinada estructura de la masa (BERTOMEU et al., 2009). También en PIAZZA and PAGNONCELLI (2014) se ha encontrado soluciones óptimas que no convergen a un estadio de bosque normal, mientras que ZHAI et al. (2014) lo califican como poco realista para este tipo de sistemas forestales.

Desde hace algunos años, se han detectado problemas asociados con la gestión de este tipo de sistemas forestales (DÍAZ-BALTEIRO, 2007; FERNANDES, 2008; GERBER, 2011; CALVIÑO-CANCELA et al., 2012; ANDERSSON et al., 2016) por lo que diversos autores han propuesto introducir en la gestión una componente de sostenibilidad con el fin de equilibrar aspectos productivos y relativos a la conservación de la biodiversidad (CALVIÑO-CANCELA, 2013). Dado que existe una gran consenso acerca de la idea de abordar el problema de la sostenibilidad a través de un conjunto de criterios e indicadores (WOLFSLEHNER and VACIK, 2008), en principio nos encontraríamos ante problemas de tipo discreto (e.g., elegir la alternativa de manejo más sostenible o la plantación más sostenible), lo que tiene su influencia a la hora de elegir la técnica de optimización más adecuada. En efecto, si atendemos a estas características, parece que las Técnicas MCDM son las más adecuadas porque permiten integrar criterios e indicadores de distinta naturaleza sin ningún problema (DÍAZ-BALTEIRO et al., 2017). Como se ha apreciado en la Tabla 2, GP es la Técnica MCDM más empleada, y también se ha aplicado para el problema de agregar convenientemente criterios e indicadores con el objetivo de elegir la plantación más sostenible (DÍAZ-BALTEIRO et al., 2016a,b), o la alternativa de manejo más sostenible para una plantación (GIMÉNEZ et al., 2013). Sin embargo, en otras ocasiones se emplean otras técnicas MCDM con resultados interesantes (HERNÁNDEZ et al., 2014). Por último, y aunque frecuentemente se toman como términos equivalentes, es necesario indicar que no siempre se produce una relación directa entre sostenibilidad y certificación forestal. En efecto, en trabajos

recientes se ha comprobado que en un conjunto amplio de plantaciones, el ranking de sostenibilidad obtenido en las mismas no se explica de forma estadística por el hecho que dichas plantaciones estén certificadas (DIAZ-BALTEIRO et al., 2016a).

6. Conclusiones

Con este trabajo de revisión se ha mostrado cómo la aplicación de herramientas basadas en la optimización en problemas de gestión forestal alcanza uno de sus máximos exponentes cuando los casos de estudio se centran en plantaciones forestales de carácter industrial. Sin embargo, como se ha demostrado en este trabajo, el número de publicaciones hasta la fecha no se corresponde a la importancia que poseen estos sistemas forestales en algunos países. Además, conviene señalar que el 83% de los trabajos se refieren únicamente a dos géneros forestales (*Pinus* y *Eucalyptus*). Los resultados muestran cómo el Modelo I ha sido el empleado más frecuentemente en estos trabajos y cómo la componente espacial presenta una importancia creciente. Además, la función objetivo más empleada ha sido la maximización del valor actual neto. Por otro lado, aunque siguen predominando los casos donde se abordan problemas relacionados con la planificación forestal estratégica, ya son significativos los trabajos donde se analizan simultáneamente varios horizontes temporales distintos. Por otro lado, los métodos clásicos de optimización, como la programación mixta, han sido los más abundantemente empleados, aunque también se debe destacar el creciente empleo de técnicas multicriterio, como la programación por metas.

7. Agradecimientos

El trabajo de Carlos Romero y Luis Díaz Balteiro está financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad (Proyecto AGL2015-68657-R). Pedro Belavenutti y Silvana Nobre agradecen la financiación del Conselho Nacional de Pesquisa de Brasil (CNPq) para realizar sus Tesis Doctorales.

8. Bibliografía

- ANDERSSON, K.; LAWRENCE, D.; ZAVALETA, J.; GUARIGUATA, M.R.; 2016. More trees, more poverty? The socioeconomic effects of tree plantations in Chile, 2001–2011. *Environ. Manage.* 57 123–136.
- AUGUSTYNICZIK; A.L.D.; ARCE, J.E.; SILVA, A.C.; 2016. Aggregating forest harvesting activities in forest plantations through integer linear programming and goal programming. *J. Forest Econ.* 24 72–81.
- BANHARA, J.R.; RODRIGUEZ, L.C.E.; SEIXAS, F.; MOREIRA, J.M.M.A.P.; DA SILVA, L.M.S.; NOBRE, S.; COGSWELL, A.; 2010. Optimized harvest scheduling in eucalyptus plantations under operational, spatial and climatic constraints. *Scientia Forestalis* 38 85-95.
- BAUHUS, J.; VAN DER MEER, P.J.; AND KANNINEN, M.; 2010 Ecosystem Goods and Services from Plantation Forests. Earthscan. 254. London
- BERTOMEU, M.; DIAZ-BALTEIRO, L.; GIMÉNEZ, J.C.; 2009. Forest management optimization in Eucalyptus plantations: a goal programming approach. *Can. J. For. Res.* 39 356–366.
- BORGES, J.G.; DIAZ-BALTEIRO, L.; McDILL, M.; RODRIGUEZ, L.C.E.; 2014a. The Management of Industrial Forest Plantations. Springer. 543. Dordrecht.
- BORGES, J.G.; GARCIA-GONZALO, J.; MARQUES, S.; VALDEBENITO, V.A.; McDILL, M.E.; FALCÃO, A.O.; 2014b. Strategic management scheduling. En: BORGES, J.G.; DIAZ-BALTEIRO, L.; McDILL, M.; RODRIGUEZ, L.C.E.; (eds.). The Management of Industrial Forest Plantations. 171-238. Springer: Dordrecht.
- BORGES, J.G.; NORDSTRÖM, E.-M.; GARCIA-GONZALO, J.; HUJALA, T.; TRASOBARES, A.; 2014c. Computer-based tools for supporting forest management. The experience and the expertise world-wide.

Dept of Forest Resource Management, Swedish University of Agricultural Sciences. 503. Umeå (Sweden).

BROCKERHOFF, E.G.; JACTEL, H.; PARROTA, J.A.; QUINE, C.P.; SAYER, J.; 2008. Plantation forests and biodiversity: oxymoron or opportunity? *Biodivers. Conserv.* 17 925-951.

CALVIÑO-CANCELA, M.; RUBIDO-BARÁ, M.; VAN ETTEN, E.J.B.; 2012. Do eucalypt plantations provide habitat for native forest biodiversity? *For. Ecol. Manage.* 270 153-162.

CALVIÑO-CANCELA, M.; 2013. Effectiveness of eucalypt plantations as a surrogate habitat for birds. *For. Ecol. Manage.* 310 692-699.

CUBBAGE, F.; MAC DONAGH, P.; BALMELLI, G.; OLMOS, V.M.; BUSSONI, A.; RUBILAR, R.; DE LA TORRE, R.; LORD, R.; HUANG, J.; HOEFLICH, V.A.; MURARA, M.; KANIESKI, B.; HALL, P.; YAO, R.; ADAMS, P.; KOTZE, H.; MONGES, E.; PÉREZ, C.H.; WIKLE, J.; ABT, R.; GONZALEZ, R.; CARRERO, O.; 2014. Global timber investments and trends, 2005-2011. *New Zeal. J. For. Sci.* 44(Suppl 1) S7

DIAZ-BALTEIRO, L.; 2007. Letter to the Editor. *J. Forest Econ.* 13 291-292.

DIAZ-BALTEIRO, L.; ROMERO, C.; 2008. Making forestry decisions with multiple criteria: a review and an assessment. *For. Ecol. Manage.* 255 3222-3241.

DIAZ-BALTEIRO, L.; ALFRANCA, O.; BERTOMEU, M.; EZQUERRO, M.; GIMÉNEZ, J.C.; GONZÁLEZ-PACHÓN, J.; ROMERO, C.; 2016a. Using quantitative techniques to evaluate and explain the sustainability of forest plantations. *Can. J. For. Res.* 46 1157-1166.

DIAZ-BALTEIRO, L.; ALFRANCA, O.; GONZÁLEZ-PACHÓN, J.; ROMERO, C.; 2016b. Ranking of industrial forest plantations in terms of sustainability: A multicriteria approach. *J. Environ. Manage.* 180 123-132.

DIAZ-BALTEIRO, L.; GONZÁLEZ-PACHÓN, J.; ROMERO, C.; 2017. Measuring system sustainability with multi-criteria methods: a critical review. *Eur. J. Oper. Res.* (in press). doi: 10.1016/j.ejor.2016.08.075

EVANS, J.; 2009 *Planted Forests: Uses, Impacts, and Sustainability*. CABI-FAO. 213. Wallingford (UK).

EZQUERRO, M.; PARDOS, M.; DIAZ-BALTEIRO, L.; 2016. Operational research techniques used for addressing biodiversity objectives into forest management. An overview. *Forests* 7 229.

FERNANDES, P.; 2008. Forest fires in Galicia (Spain): The outcome of unbalanced fire management. *J. Forest Econ.* 14 155-157.

GERBER, G.F.; 2011. Conflicts over industrial tree plantations in the South: Who, how and why? *Glob. Environm. Change* 21 165-176.

GIMÉNEZ, J.C.; BERTOMEU, M.; DIAZ-BALTEIRO, L.; ROMERO, C.; 2013. Optimal harvest scheduling in Eucalyptus plantations under a sustainability perspective. *For. Ecol. Manage.* 291 367-376.

HERNÁNDEZ, M.; GOMEZ, T.; MOLINA, J.; LEON, M.A.; CABALLERO, R.; 2014. Efficiency in forest management: A multiobjective harvest scheduling model. *J. Forest Econ.* 20 236-251.

JOHNSON, K.N.; SCHEURMAN, H.L.; 1997. Techniques for prescribing optimal timber harvest and investment under different objectives: discussion and synthesis. *Forest Sci. Monography* 18 1-31.

KANGAS, A.; KURTTILA, M.; HUJALA, T.; EYVINDSON, K.; KANGAS, J.; 2015. *Decision Support for Forest Management*; 2^a ed.; Springer. 307. Berlin.

KANGAS, A.; NURMI, M.; RASINMÄKI, R.; 2014. From a strategic to a tactical forest management plan using a hierarchic optimization approach. *Scand. J. Forest Res.* 29 (S1) 154-165.

KAYA, A., BETTINGER, P., BOSTON, K., AKBULUT, R., UCAR, Z., SIRY, J., MERRY, K., CIESZEWSKI, C., 2016. Optimisation in forest management. *Curr. Forestry Rep.* 2 1-17.

LANDSBERG, J.; WARING, R.; 2014 *Forests in Our Changing World: New Principles for Conservation and Management*. Island Press. 209. Washington.

- MARTIN, A.B.; GUNN, E.A.; RICHARDS, E.W.; 2016. Comparing the efficacy of LP Models I and II for spatial strategic forest management. *Can. J. For. Res.* (in press). doi: 10.1139/cjfr-2016-0139
- MCDILL, M.; 2014. An overview of forest management planning and information management. In: BORGES, J.G.; DIAZ-BALTEIRO, L.; MCDILL, M.; RODRIGUEZ, L.C.E.; (eds.). *The Management of Industrial Forest Plantations*. 27-59. Springer. Dordrecht.
- MCDILL, M.E.; TÓTH, S.; ST. JOHN, R.; BRAZE, J.; REBAIN, S.A.; 2016. Comparing Model I and Model II formulations of spatially explicit harvest scheduling models with maximum area restrictions. *Forest Sci.* 62 28-37.
- PAQUETTE, A.; MESSIER, C.; 2010. The role of plantations in managing the world's forests in the Anthropocene. *Front. Ecol. Environ.* 8 27-34.
- PAWSON, S.M.; BRIN, A.; BROCKERHOFF, E.G.; LAMB, D.; PAYN, T.W.; PAQUETTE, A.; PARROTTA, J.A.; 2013. Plantation forests, climate change and biodiversity. *Biodivers. Conserv.* 22 1203-1227.
- PAYN, T.; CARNUS, J.M.; FREER-SMITH, P.; KIMBERLEY, M.; KOLLERT, W.; LIU, S.; ORAZIO, C.; RODRIGUEZ, L.; SILVA, L.N.; WINGFIELD, M.J.; 2015. Changes in planted forests and future global implications. *For. Ecol. Manage.* 352 57-67.
- PIAZZA, A.; PAGNONCELLI, B.K.; 2014. The optimal harvesting problem under price uncertainty. *Ann. Oper. Res.* 217 425-445.
- RODRIGUEZ, L.C.E.; PASALODOS-TATO, M.; DIAZ-BALTEIRO, L.; MCTAGUE, J.P.; 2014. The importance of industrial forest plantations. En: BORGES, J.G.; DIAZ-BALTEIRO, L.; MCDILL, M.; RODRIGUEZ, L.C.E.; eds. *The Management of Industrial Forest Plantations*. 3-26. Springer: Dordrecht.
- RÖNNQVIST, M.; D'AMOURS, S.; WEINTRAUB, A.; JOFRE, A.; GUNN, E.; HAIGHT, R.G.; MARTELL, D.; MURRAY, A.T.; ROMERO, C.; 2015. Operations Research challenges in forestry: 33 open problems. *Ann. Oper. Res.* 232 11-40.
- UHDE, B.; HAHN, W.A.; GRIESS, V.; KNOKE, T.; 2015. Hybrid MCDA methods to integrate multiple ecosystem services in forest management planning: A critical review. *Environ. Manag.* 56 373-388.
- WEINTRAUB, A.; BARE, B.; 1996. New issues in forest land management from an operations research perspective. *Interfaces* 26(5) 9-25.
- YOSHIMOTO, A.; ASANTE, P.; KONOSHIMA, M.; 2016. Stand-Level Forest Management Planning Approaches. *Curr. Forestry Rep.* 2 163-176.
- ZHAI, W.; ZHAO, Y.; LIAN, X.; YANG, M.; LU, F.; 2014. Management planning of fast-growing plantations based on a bi-level programming model. *Forest Pol. Econ.* 38 173-177.