



7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

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

26 - 30 junio 2017 | Plasencia
Cáceres, Extremadura

7CFE01-079

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

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Integración de la conservación de la biodiversidad en una gestión forestal multifuncional utilizando técnicas multicriterio.

EZQUERRO, M¹, PARDOS, M² Y DIAZ-BALTEIRO, L¹

¹ Universidad Politécnica de Madrid. ETS Ingenieros de Montes. Ciudad Universitaria s/n. 28040 Madrid.

² Departamento de Selvicultura y Gestión de Sistemas Forestales. INIA-CIFOR. Crtra Coruña Km 7.5, 28040-Madrid.

Resumen

Hasta hace poco tiempo, los distintos métodos de gestión forestal han estado orientados casi en exclusiva hacia distintas producciones tangibles, dejando a un lado servicios que no disponen de un precio de mercado, como es el caso de la conservación de la biodiversidad. Esto ha conducido a que outputs como la producción de madera hayan ido perdiendo peso frente la consideración de otros servicios ecosistémicos. Por todo ello, en este trabajo se propone un modelo basado en la programación por metas que permita proporcionar alternativas de gestión considerando objetivos como la conservación de la biodiversidad, la producción de madera y la captura de carbono. El caso de estudio elegido es el Monte “Pinar de Valsaín”, situado en la provincia de Segovia, con una larga tradición en la producción de madera y una creciente preocupación por la conservación de la biodiversidad, que ha aumentado con la inclusión de parte del monte dentro del Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama. Los resultados iniciales permiten cuantificar el coste de oportunidad derivado de la introducción de medidas de conservación orientadas a la protección de especies emblemáticas como son el buitre negro o el águila imperial, presentes en la zona de estudio.

Palabras clave

Biodiversidad, gestión forestal, programación por metas, coste de oportunidad.

1. Introducción

Los distintos métodos de gestión forestal, que se han aplicado en masas forestales con indudables valores ecológicos hasta la fecha, han estado orientados casi en exclusiva hacia una visión económica de las mismas, no considerando al mismo nivel productos como la madera, frente a aquellos bienes que no disponen de un precio de mercado (biodiversidad, carbono...).

En el caso de España se puede decir que, en general, existen numerosos casos de montes en los que existe una dualidad entre producción y conservación, donde la antaño primordial importancia de la producción maderera ha ido perdiendo peso ante atributos asociados a la preservación de valores ecológicos (GIL-TENA et al., 2008). Sin embargo, la creciente importancia hacia objetivos relacionados con la conservación de la biodiversidad no ha venido acompañada, desde el punto de vista de la gestión forestal, por un conjunto de herramientas claras que fomenten la conservación de la biodiversidad. Así, en la práctica, se prohíben en distinto grado las cortas comerciales, y las intervenciones en estas zonas con objetivos de conservación, suelen centrarse en actuaciones de saneamiento o cortas de policía, (MONTERO et al., 2001). A pesar de ello, este tipo de tratamientos no constituyen el único y mejor camino para asegurar tanto la preservación de ciertos valores ambientales como el desarrollo de otros objetivos, a veces incompatibles. Esta realidad justifica la importancia de construir modelos orientados a la conservación de las masas forestales, calculando el coste de oportunidad de adoptar ciertas medidas, como puede ser renunciar a ciertos beneficios monetarios derivados de las cortas finales.

La primera pregunta que puede plantearse es si los métodos de gestión forestal actualmente empleados tanto a nivel nacional como autonómico son válidos para acometer el desafío de integrar los objetivos de conservación dentro de un monte con una orientación productiva. La respuesta es que, aunque algunos métodos puedan plantear acciones concretas que favorezcan la conservación (ROJO y MONTERO, 2005), se puede concluir que en España no existe ningún método de ordenación de montes, incluido en las distintas Instrucciones publicadas a nivel nacional o autonómico, claramente orientado a la conservación de la biodiversidad.

Esta indeterminación supone una oportunidad adicional para el uso de modelos de planificación forestal estratégica basados en la programación matemática, es decir, métodos que se basan en buscar unas soluciones óptimas frente a los métodos tradicionalmente empleados, orientados principalmente a la maximización de bienes como la producción de madera. Dentro de este conjunto de métodos matemáticos destacan aquellos que permiten considerar de forma simultánea múltiples objetivos, los cuales, en su dimensión más básica, tratan de elegir «lo mejor» de entre «lo posible» (ROMERO, 1996). Una ventaja derivada de estos modelos es que permiten simular distintos escenarios futuros en función de posibles cambios en las variables inicialmente consideradas, lo que proporciona al gestor un análisis más amplio y favorece el proceso de la toma de decisiones. Aunque la aplicación práctica de estos modelos es reducida en nuestro país, las vigentes Instrucciones Generales de Ordenación de Montes Arbolados indican en su artículo 82 la posibilidad de aplicar cualquier método de ordenación, siempre que se justifique adecuadamente la adopción de las nuevas variantes o sistemas. (BOE-A-1971-186)

En resumen, ante la realidad que muestra cómo los métodos tradicionales habitualmente empleados en la gestión forestal no aseguran unas estrategias adecuadas para compatibilizar objetivos en conflicto, se plantea el empleo de modelos basados en la programación matemática, en concreto, aquellos integrados bajo el paraguas de la Teoría de la Decisión Multicriterio. Este cambio reciente en las prioridades a considerar en la planificación forestal, así como la integración de las preferencias de los diferentes stakeholders implicados, han generado un nuevo enfoque en la gestión de las masas forestales. En esta línea, en EZQUERRO et al. (2016) se recoge una revisión de las técnicas de investigación operativa empleadas en la planificación forestal cuando se integran valores asociados a la conservación de la biodiversidad.

2. Objetivos

En este trabajo se pretende desarrollar un modelo multicriterio que permita integrar la conservación de la biodiversidad en un modelo de planificación forestal estratégica, de acuerdo con la información disponible en el caso de estudio (monte “Pinar de Valsaín”). El diseño de este modelo pretende generar técnicas que permitan compatibilizar la conservación de la biodiversidad con su aprovechamiento maderero. A continuación, se detallan los objetivos específicos planteados en este estudio, los cuales permitirán el desarrollo de un modelo de planificación forestal estratégica en el que se incluyen medidas de conservación de la biodiversidad.

Como primer paso, se plantea un modelo de planificación forestal estratégica que integre objetivos de producción y conservación, en un horizonte temporal de 100 años, de acuerdo con la información disponible en el monte Pinar de Valsaín. De esta forma, se generan unas prescripciones o variables de decisión asociadas a una serie de objetivos a considerar en el diseño del aprovechamiento forestal. Además, teniendo en cuenta la declaración del Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama y la presencia de nidos de buitre negro en la zona, se plantean tres escenarios para analizar las consecuencias derivadas de la introducción de medidas de conservación.

Por otro lado, y para evaluar el grado de conflicto existente entre los criterios considerados en los distintos escenarios, se procede a construir una matriz de pagos que permita cuantificar el coste

de oportunidad derivado de la conservación de la biodiversidad. Partiendo de esta matriz se desarrolla un modelo inicial de programación por metas, que permita satisfacer la gestión conjunta de los criterios considerados mediante la definición de unos niveles de aspiración fijados de antemano. De esta forma, se espera solventar el conflicto existente entre los valores de conservación y de producción introducidos en el modelo. Por último, a la vista de los resultados obtenidos, se analizarán las consecuencias derivadas del empleo de modelos multicriterio, así como la introducción de medidas de conservación, caracterizadas mediante diferentes escenarios planteados en el caso de estudio.

3. Metodología

En este apartado se procede, en primer lugar, a presentar el caso de estudio sobre el que se ha construido el modelo de planificación forestal. A continuación, se presenta el modelo de planificación estratégica, que se ha definido en base a la información disponible en la 7ª Revisión del Proyecto de Ordenación del Pinar de Valsaín (CABRERA, 2010). Una vez construido el modelo, se ha diseñado un modelo de programación por metas ponderadas (*Weighted Goal Programming*, WGP), para solventar el problema planteado en el caso de estudio.

3.1. Caso de estudio

El “Pinar de Valsaín”, monte número 2 del Catálogo de Utilidad Pública, situado en la provincia de Segovia, está contemplado en numerosas propuestas y figuras de protección, como la declaración de LIC y de ZEPA (TORNERO GÓMEZ, 2005) y el Plan de Recuperación del Águila Imperial Ibérica (D114/2003, de 2 de octubre). Dada la importancia y singularidad de su riqueza avícola con más de 100 especies nidificantes, está incluido en la Red Natura 2000 de los espacios protegidos de la Unión Europea en 1995. Asimismo, en este monte se establecen zonas Uso Limitado de Interés Especial, asociadas a áreas que ostentan hábitats de interés comunitario en excelente estado de conservación y zonas de elevada importancia para la conservación de especies de fauna protegidas como el águila imperial ibérica, la cigüeña negra o el buitre negro (JIMÉNEZ et al., 2006). De esta forma, se han incorporado una serie de medidas para preservar y favorecer el desarrollo de sus poblaciones, tratando de minimizar las perturbaciones derivadas del aprovechamiento forestal realizado en la zona. Por último, con la Ley 7/2013, de 25 de junio, de declaración del Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama, en su artículo 4 apartado 3 se establece la inclusión de cierta superficie del Pinar de Valsaín dentro del Parque Nacional, con una serie de medidas asociadas. (BOE-A-2013-6900).

3.2. Modelo de Planificación forestal estratégica

La planificación estratégica se puede definir como un tipo de planificación a largo plazo donde se caracterizan una serie de criterios, y donde se desarrollan las estrategias generales para alcanzarlos. Las decisiones tomadas en este nivel persiguen una serie de objetivos en un horizonte temporal dilatado, como patrones de estructura del monte futuro deseado mediante, por ejemplo, la distribución de clase de la edad, o asegurar su continuidad en el tiempo. Este tipo de decisiones conlleva horizontes temporales que abarcan al menos una rotación (BORGES et al., 2014).

Como se ha comentado anteriormente, para desarrollar un modelo de planificación estratégica, se ha generado una base de datos a partir de la información existente en la 7ª Revisión del Proyecto de Ordenación del Pinar de Valsaín. A nivel dasocrático, se han considerado como unidades de gestión los 288 cantones que se han definido en dicha Revisión. En estos cantones se calculan las variables que han sido consideradas en este estudio, en base a las cuales se formulan las distintas prescripciones o variables de decisión, partiendo de la edad inicial de la masa. El turno considerado se establece como un abanico temporal que oscila entre los 100-180 años, integrando la edad de

madurez de 120 años, frecuente en el monte y definida en PARDOS et al. (2016). La finalidad de emplear este rango se justifica por proporcionar una mayor variabilidad en el número de alternativas de gestión (considerando que el enfoque del presente estudio está orientado a la conservación de la biodiversidad) y ya que considerar una única edad de corta generaría un modelo muy rígido (DÍAZ BALTEIRO y ROMERO, 2004). Por otro lado, atendiendo a los valores propuestos, desde el punto de vista tecnológico, algunos estudios muestran que conforme se alarga el turno se producen mejoras en la calidad tecnológica de la madera (aumento en la proporción de volumen destinado a chapa), lo que conlleva aumentos en el precio (DÍAZ BALTEIRO y PRIETO, 1999). Sin embargo, se ha establecido como límite superior 180 años, para dotar de mayor flexibilidad al modelo, a pesar de que la masa empiece a presentar síntomas de decrepitud y riesgo de plagas antes de llegar a esta edad.

De esta forma, considerando el turno definido y la edad de la masa existente en cada uno de los 288 cantones, se han generado 2663 prescripciones o variables de decisión, para un horizonte de planificación de 100 años dividido en 10 períodos de 10 años. Una vez caracterizadas las variables, se ha diseñado un modelo de planificación estratégica basado en el Modelo I, según la terminología de JOHNSON & SCHEURMAN (1977).

Los objetivos perseguidos con la elaboración de este modelo incorporan criterios productivos (volumen de madera y Valor Actual Neto, VAN), ecológicos (balance de carbono), así como otros asociados al mantenimiento de la estructura definida como bosque normal. Esta idea de bosque normal se asocia a un modelo conceptual desarrollado por los forestales centroeuropeos, y se define como aquél donde se alcanzan volúmenes de corta iguales en cada periodo, se asegura la persistencia del bosque al final de horizonte de planificación y la distribución por clases de edad ocupa la misma superficie (LEUSCHNER, 1984)

En relación a los objetivos definidos en este estudio, atendiendo en primer lugar al volumen de madera, cabe señalar que no se han considerado los volúmenes que provienen de la realización de claras u a otras cortas de mejora, sino que sólo se han tenido en cuenta los volúmenes asociados a las cortas finales. Por otro lado, en el cálculo del VAN, se ha elegido una tasa de descuento del 2%, siguiendo a DÍAZ BALTEIRO y PRIETO RODRÍGUEZ (1999). En relación a los costes considerados, se han establecido unos costes de mantenimiento anuales de 65,79 €/ha, considerando que el precio de la madera incluye los costes de explotación asociados. Finalmente, en cuanto al precio de la madera procedente de cortas finales se ha fijado en 28 €/m³, en relación a los precios de subasta indicados en la 7ª Revisión del Proyecto de Ordenación del Monte Pinar de Valsaín (CABRERA, 2010).

En relación al balance de carbono, se ha definido mediante el balance anual existente (en toneladas de carbono) entre el carbono capturado por crecimiento de la masa y el carbono que se emite debido a las cortas finales, siguiendo la hipótesis de oxidación instantánea recogida en el Protocolo de Kyoto (ONU, 1998). De esta forma, este criterio se ha calculado en unidades físicas, sin tener en cuenta una componente monetaria vinculada al precio de este output. Por último, como es preceptivo, las restricciones endógenas establecen que la superficie disponible para el aprovechamiento forestal no puede superar la superficie existente para cada uno de los cantones en que se divide el Pinar.

Una vez presentados los objetivos de este estudio, y como herramienta que permita analizar diferentes situaciones, se definen tres escenarios para la resolución del modelo, considerando la inclusión de ciertas restricciones ambientales, además de las comentadas anteriormente. El primer escenario hace referencia al objetivo tradicional asociado al aprovechamiento de madera, en el cual, no se han considerado restricciones ambientales, es decir, sólo se han considerado las restricciones de monte normal y las de carácter endógeno, siendo éstas últimas necesarias para el funcionamiento del modelo.

En el segundo escenario, se considera la inclusión de cierto número de cantones (122) en el Parque Nacional, de forma que en ellos se prohíben las cortas comerciales, descontando esta superficie en el modelo de planificación estratégica considerado. De la comparación entre ambos escenarios puede cuantificarse las consecuencias económicas de adoptar ciertas medidas como puede ser renunciar a cierto volumen considerado en el aprovechamiento forestal.

En el tercer escenario propuesto, se considera la pertenencia de los citados cantones al Parque Nacional así como unas limitaciones añadidas en el aprovechamiento forestal originadas por la presencia en la zona de nidos de buitre negro. En total, se dispone de 131 nidos distribuidos en 70 cantones, y se establece para ellos una superficie de gestión restringida definida por un radio de 100m con centro en la base del nido, en base a lo dispuesto por la Junta de Castilla y León (JIMÉNEZ et al., 2006). De esta forma, este radio de protección se traduce en la no intervención en 3,14 ha por cada nido existente, superficie que se procede a descontar de la superficie disponible para el aprovechamiento maderero en cada cantón.

De esta forma, como resumen de lo anterior, se muestran las restricciones exógenas incluidas en cada escenario (Tabla 1), teniendo en cuenta que los criterios definidos anteriormente son comunes a todos ellos, volumen de madera (V), VAN, balance de carbono (C), y las restricciones de monte normal definidas como la igualdad de flujos de volumen (H), inventario final (F) y regulación (A). Así, las restricciones ambientales limitan la superficie disponible para el aprovechamiento forestal en relación al escenario considerado.

Tabla 1. Diseño de los tres escenarios considerados en los que se analizan los seis criterios definidos anteriormente.

Escenarios	Restricciones Ambientales	Superficie aprovechamiento
<i>Aprovechamiento forestal (1)</i>	<i>Sin restricciones ambientales</i>	<i>7.207 ha</i>
<i>Parque Nacional (2)</i>	<i>Superficie incluida en el Parque Nacional</i>	<i>4.546 ha</i>
<i>Parque Nacional y Nidos (3)</i>	<i>Superficie incluida en el Parque Nacional y superficie restringida debido a la presencia de nidos</i>	<i>4.135 ha</i>

Una vez definidos los tres escenarios, se genera una matriz de pagos a partir de la maximización por separado de cada uno de los seis criterios definidos anteriormente, incluyendo las tres restricciones forestales introducidas en el modelo. El resultado de esta matriz permite evaluar con facilidad el grado de conflicto existente entre objetivos. A continuación, se procede a desarrollar un modelo de programación por metas ponderadas. De acuerdo con la metodología de este método, los distintos criterios se plantean como metas a alcanzar, mediante unos niveles de aspiración fijados de antemano (ROMERO, 2002). De forma general, la estructura definida para cada una de las seis metas se muestra a continuación (Ecuación 1).

$$f_i(x) + n_i - p_i = t_i \quad [1]$$

Donde $f_i(x)$ representa la expresión matemática del criterio i ; t_i el nivel de aspiración asociado a dicho atributo, n_i y p_i las variables de desviación negativa y positiva, respectivamente. La variable de desviación negativa cuantifica la falta de logro de una meta con respecto a su nivel de aspiración, mientras que la variable de desviación positiva juega el papel opuesto; es decir, la medición del exceso de logro de una meta con respecto a su nivel de aspiración. En definitiva, la idea básica que subyace en los modelos de programación por metas consiste en la minimización de desviaciones no deseadas de las metas previamente definidas (JONES & TAMIZ, 2010).

En la resolución del modelo multicriterio, conviene señalar que los niveles de aspiración se han establecido en un 70% respecto al valor ideal obtenido en la matriz de pagos mediante la optimización del criterio considerado en cada caso para el Escenario 1. El hecho de emplear como valores de referencia los obtenidos en este escenario, queda justificado para evaluar posteriormente las consecuencias derivadas de la introducción de medidas de conservación en el aprovechamiento forestal. Asimismo, se ha considerado la igualdad de pesos preferenciales para los distintos criterios en la resolución del modelo. Considerando lo anterior, se resuelve el modelo de programación por metas mediante la minimización de las desviaciones no deseadas de las metas establecidas para cada uno de los seis criterios.

En relación al modelo planteado, cabe señalar que los tres primeros criterios (V, VAN, C) constituyen objetivos del tipo más mejor, mientras que para el caso de las restricciones forestales (H, F, A), se persigue que sus valores sean menores o iguales al valor propuesto, teniendo en cuenta que el nivel de aspiración hace referencia a la desviación de la meta de igualdad propuesta. La función de logro consiste entonces en la minimización de la suma de las desviaciones no deseadas para cada una de las metas planteadas y considerando la igualdad de pesos preferenciales, tal y como se muestra a continuación (Ecuación 2).

$$MIN \sum_{i=1}^n \frac{w_i * d_i}{k_i} \quad [2]$$

Donde n son los criterios considerados, los coeficientes w_i son los pesos preferenciales, d_i las desviaciones de las metas no deseadas (n_i y/o p_i), según el criterio considerado) y los coeficientes k_i los pesos normalizadores, para cada una de las seis metas definidas en el modelo. De esta forma, con la resolución de la ecuación anterior, se obtendrán los valores asociados a cada uno de los criterios mediante la minimización de la función de logro. Para la resolución de este modelo, se ha empleado el programa informático LINGO, en su versión 13.0 (LINDO SYSTEMS, 2006).

4. Resultados

A continuación se presentan los resultados obtenidos para el modelo de planificación forestal estratégica, atendiendo en primer lugar a las soluciones obtenidas en la matriz de pagos generada para los tres escenarios definidos (Tabla 2), con los valores correspondientes a los seis criterios definidos. En el caso de los criterios asociados a la idea de monte normal, se considera si se produce o no el cumplimiento de la meta, indicando con una "x" donde existe cumplimiento de las restricciones forestales, y con "-", en caso contrario.

Tabla 2. Resultados obtenidos en la Matriz de pagos en los Escenarios 1, 2 y 3 para los seis criterios considerados.

CRITERIOS	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
V	4.661.065	3.019.806	2.875.250
VAN	54.593.750	31.551.490	30.148.890
C	4.976.837	5.428.202	5.473.396
H	x	x	x
F	-	-	-
A	-	-	-
Turno	138	157	157

V: Volumen (m³), VAN: Valor Actual Neto (€), C: Balance de Carbono (tC), H: Flujo de volumen (m³), F: Inventario Final (m³), A: Regulación (ha), Turno medio (años).

De la tabla anterior se aprecia la notable variabilidad de los criterios en relación a la función optimizada en cada escenario, con valores de volumen de madera y de VAN que se reducen en un 40 y un 45% respectivamente del Escenario 1 al Escenario 3, mientras que el balance de carbono se incrementa en torno a un 10%. En cuanto a los otros criterios, se observa que se cumple únicamente en la igualdad de flujos de volumen. Además, a efectos de considerar una herramienta de gestión, se ha considerado el turno promedio asociado a la solución obtenida, de forma que se obtiene un alargamiento del mismo a medida que se considera un escenario más orientado a la conservación de la biodiversidad.

A nivel de cada escenario, se aprecia como en el Escenario 1, al no contemplarse la posibilidad de respetar superficies sin cortar, las masas con una edad superior a 120 años no se encuentran representadas, teniendo en cuenta el turno y el horizonte de planificación definidos. En el caso de los Escenarios 2 y 3, esta clase se encuentra representada debido a la prohibición de cortar definida en aquellos cantones que se han incluido en el parque nacional (122 cantones). Además, en el escenario conjunto de Parque Nacional y nidos, las variables asociadas a esos cantones (70) ven reducidos sus valores de volumen de madera, lo que se traduce en una disminución de las emisiones de carbono y por consiguiente aumentos en el balance de carbono.

Los valores de VAN asociados a los tres escenarios van reduciendo su valor conforme se van introduciendo medidas de protección, si bien es cierto que su efecto es más acusado en el segundo escenario, debido a la reducción de la superficie disponible para el aprovechamiento forestal, definida en las hipótesis de partida para cada escenario. También hay que tener en cuenta que algunos de los cantones con nido han sido incluidos en el Parque Nacional, en cuyo caso se ha respetado la opción más restrictiva, esto es, la prohibición de las cortas comerciales en la totalidad del cantón, en lugar de considerar tan sólo la superficie restringida establecida en función del número de nidos.

A la vista del grado de conflicto recogido en la Tabla 2, surge la necesidad de recurrir a modelos multicriterio capaces de lidiar simultáneamente con todos los criterios considerados. En concreto, y como se ha explicitado anteriormente, se genera un modelo de programación por metas ponderadas para cada escenario. Los resultados obtenidos (Tabla 3) muestran claras diferencias respecto al modelo anterior, tanto en los valores alcanzados por los criterios así como por el cumplimiento de todas las metas de igualdad planteadas en este modelo.

Tabla 3. Resultados obtenidos del modelo de programación por metas ponderadas en los Escenarios 1, 2 y 3, para los seis criterios considerados.

Criterios	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
V	3.813.534	2.746.032	2.601.915
VAN	38.215.620	21.436.930	19.858.380
C	4.627.215	5.102.037	5.172.779
H	x	x	x
F	x	x	x
A	x	x	x
Turno	137	158	158

V: Volumen (m³), VAN: Valor Actual Neto (€), C: Balance de Carbono (tC), H: Flujo de volumen (m³), F: Inventario Final (m³), A: Regulación (ha), Turno medio (años).

En la tabla anterior se muestran los resultados obtenidos en el modelo de programación por metas para los tres escenarios considerados, donde los valores de “x” asociados a las restricciones forestales, indican que se cumplen las metas de igualdad establecidas en todos los casos, cuya solución resultaba no factible en la obtención de la matriz de pagos. Por último, también se observa un alargamiento del turno respecto al escenario sin restricciones ambientales.

5. Discusión

A partir de la resolución del modelo planteado, es posible analizar el grado de conflicto existente entre los objetivos considerados. En este caso concreto, derivado del análisis de la matriz de pagos generada, se observa un notable conflicto entre los criterios, según el escenario y la función objetivo considerada en cada caso. De esta forma, los valores obtenidos en la Tabla 2 muestran un 30% de variabilidad para cada criterio en cada escenario. Por ello, se puede afirmar que los modelos monocriterio no resuelven de forma equilibrada el conflicto existente entre objetivos. De forma general, entre modelos, el volumen de madera se reduce en torno a un 10-20%, el VAN sufre reducciones del 30% y el balance de carbono se reduce un 5-7%.

Por otro lado, el modelo de programación por metas proporciona soluciones más equilibradas, asegurando niveles intermedios de cumplimiento entre objetivos. En base a la Tabla 3, de forma general, se observa que reducciones del volumen del 20% conllevan soluciones intermedias con respecto al resto de los criterios y, además, se asegura el cumplimiento de las metas de igualdad asociadas a la idea de monte normal. En resumen, esta solución resultaba no factible utilizando modelos monocriterio y, sin embargo, se convierte en satisfactoria mediante el empleo de la técnica de programación por metas. Por otro lado, en las ordenaciones tradicionales normalmente no se persigue que los flujos de volumen en cada período sean exactamente iguales, sino que sean lo más cercanos a la posibilidad fijada de antemano, tal y como se establece en DÍAZ BALTEIRO y PRIETO RODRÍGUEZ (1999), definida de forma análoga en este trabajo. Por último, el turno medio se mantiene constante en ambos casos, presentando la misma variación entre escenarios.

En relación al turno definido en este trabajo, y atendiendo al límite superior fijado en 180 años, cabe señalar que algunos autores consideran este alargamiento del turno como medida para favorecer la conservación de la biodiversidad. De esta forma, diversos gestores han recurrido a esta herramienta cuando se incluyen en la planificación forestal objetivos de conservación. Un ejemplo de ello puede verse en ZOBEL et al. (2015), si bien es cierto que dicho aumento depende en gran medida de los datos disponibles y de la especie principal de la masa existente en cada caso concreto.

A la vista del estudio realizado, se observa en primer lugar, cómo la consideración de los distintos escenarios permite evaluar las consecuencias derivadas de la incorporación de distintas medidas de conservación de acuerdo con la situación planteada. Así, puede cuantificarse la repercusión en unidades monetarias derivada de la declaración de Parque Nacional (reducciones de en torno al 40% del VAN respecto al Escenario 1), así como los sacrificios de cortabilidad (reducciones del 32% del volumen respecto al Escenario 1) producidos debido a la presencia de nidos de buitre negro. De esta forma, incluso podría plantearse a largo plazo cómo influirá la evolución de las poblaciones de buitre negro en el aprovechamiento forestal.

Por otra parte, las soluciones obtenidas permiten establecer comparaciones entre metodologías mono y multicriterio, contribuyendo al proceso de la toma de decisiones. De esta forma, en modelos como el propuesto en DÍAZ BALTEIRO y PRIETO RODRÍGUEZ (1999), se presenta una aplicación práctica basada en la optimización clásica, donde se aprecia el grado de conflicto existente entre objetivos, de forma que puede justificarse el empleo de modelos multicriterio, tal y como se demuestra en este trabajo. Por último, de la comparación de resultados entre la matriz de pagos generada y el modelo de programación por metas, pueden observarse claramente las ventajas de la aplicación de modelos de optimización multicriterio frente al empleo de las técnicas monocriterio. En esta línea, puede afirmarse que cada vez es más frecuente el empleo de este tipo de modelos para solventar el conflicto existente entre objetivos, premisa contrastada en trabajos relacionados con la aplicación de técnicas de investigación operativa. Un ejemplo de ello puede verse en RÖNNQVIST et al. (2015).

Como futuras líneas de investigación, se espera caracterizar el diseño de las cortas a realizar en el Pinar de Valsaín, teniendo en cuenta la relación entre la estructura de la masa y el tratamiento selvícola a emplear (MONTES et al., 2005) de acuerdo a los objetivos perseguidos en la gestión. De esta forma, tomando como referencia el informe de adaptación selvícola propuesto por CABRERA (2014) y las alternativas selvícolas propuestas en PARDOS et al. (2016), se espera proponer diferentes tratamientos selvícolas que se introducirán en los modelos de optimización. Dichas alternativas pretenden considerar tanto el sistema de aprovechamiento actual, como la incorporación de cortas de entresaca por bosquetes para la generación de masas irregulares, y la simulación de herramientas con fines de conservación, como es el caso de una selvicultura conocida como *Green-Tree Retention* (BAUHUS et al., 2009; GUSTAFSSON et al., 2012), consistente en la retención de un cierto porcentaje de la masa tras las cortas finales. La idoneidad de esta propuesta reside en actualizar el esquema selvícola a la declaración del Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama y la existencia de nidos de buitre negro existentes en la zona. Como resultado de lo anterior, se espera poder incluir las consecuencias derivadas de las diferentes intervenciones, así como analizar el coste de oportunidad derivado de la aplicación de una selvicultura menos intensiva, alargamientos del turno e incluso la retención de un cierto porcentaje de la masa tras las cortas finales.

6. Conclusiones

En primer lugar, la generación de modelos de planificación forestal estratégica permite simular la evolución de la masa forestal de acuerdo con las decisiones tomadas en la planificación del aprovechamiento a largo plazo. De esta forma, se pueden considerar simultáneamente tanto

objetivos económicos como ecológicos, así como cumplir con las restricciones tradicionalmente empleadas en la gestión forestal, de acuerdo con la premisa establecida de monte normal.

Por otro lado, la consideración de los diferentes escenarios definidos en este trabajo permite evaluar las consecuencias derivadas de la introducción de medidas de conservación, mediante las variaciones obtenidas en los valores de volumen de madera, VAN y balance de carbono, así como el cumplimiento de las distintas restricciones exógenas introducidas en el modelo.

Respecto a los resultados obtenidos en la matriz de pagos, se observa que los modelos monocriterio presentan una mayor facilidad en su aplicación; sin embargo, los resultados muestran soluciones absolutas respecto al objetivo considerado en cada caso. Por otro lado, la matriz de pagos generada permite evaluar el conflicto existente entre los criterios considerados, mostrando una notable variación de los criterios en relación a la función optimizada en cada uno de los escenarios propuestos.

Por último, a la vista de los resultados obtenidos, y teniendo en cuenta la variabilidad de los criterios proporcionada en la matriz de pagos, se justifica la necesidad de recurrir al empleo de modelos multicriterio capaces de lidiar con el conflicto existente entre los objetivos definidos. Como se ha comprobado en este trabajo, el empleo de estas técnicas permite obtener soluciones más equilibradas, de forma que permiten al gestor la consideración simultánea de múltiples objetivos. Por tanto, se propone el empleo de técnicas multicriterio para el desarrollo de modelos de planificación forestal estratégica en aquellos montes en los que existe esta dualidad entre producción y conservación.

7. Agradecimientos

Este trabajo ha recibido financiación por el Ministerio de Educación, Cultura y Deporte, mediante la concesión de una beca FPU a la primera autora. El trabajo de Luis Díaz Balteiro se ha visto beneficiado del proyecto de investigación financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad AGL2015-68657-R. Además, los autores agradecen las informaciones y comentarios realizados por D. Javier Donés Pastor, Director del Centro de Montes y Aserradero de Valsaín, así como por el Doctor Ingeniero de Montes D. Miguel Cabrera.

8. Bibliografía

BAUHUS, J.; PUETTMANN, K.; MESSIER, C.; 2009. Silviculture for old-growth attributes. *Forest Ecol. Manag.* 258(4), 525–537.

BORGES, J.G.; DÍAZ-BALTEIRO, L.; MCDILL, M.E.; RODRIGUEZ, L.C.E.; 2014. The Management of Industrial Forest Plantations. Theoretical Foundations and Applications. Springer. XIII, 543. Netherlands.

CABRERA, M.; 2010. Proyecto de 7ª Revisión de la Ordenación del monte número 2 del Catálogo de los de Utilidad Pública de la Provincia de Segovia “Pinar” de Valsaín. Organismo Autónomo Parques nacionales, Ministerio de Medio Ambiente.

CABRERA, M.; 2014. Informe sobre Adaptación de la gestión selvícola a los objetivos del Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama. Organismo Autónomo Parques nacionales, Ministerio de Medio Ambiente.

DÍAZ BALTEIRO, L.; PRIETO RODRÍGUEZ, A.; 1999. Modelos de planificación forestal basados en la programación lineal. Aplicación al monte "Pinar de Navafría" (Segovia). *Agr. Sist. Recur. For.* 8(1).

DÍAZ BALTEIRO, L.; ROMERO, C.; 2004. Vínculos entre sostenibilidad, ecología y economía de los sistemas forestales: algunas reflexiones. *Invest. Agrar. Sist. Recur. For.* Fuera de serie, 213-222.

ESPAÑA. JUNTA DE CASTILLA Y LEÓN. DECRETO 114/2003, de 2 de octubre, por el que se aprueba el Plan de Recuperación del Águila Imperial Ibérica y se dictan medidas para su protección en la Comunidad de Castilla y León. Boletín Oficial de Castilla y León, núm. 195.

ESPAÑA. MINISTERIO DE AGRICULTURA. Ley 7/2013, de 25 de junio, de declaración del Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama. Boletín Oficial del Estado, 26 de junio de 2013, núm. 152, pp. 47795-47852.

ESPAÑA. MINISTERIO DE AGRICULTURA. Orden de 29 de diciembre de 1970, por la que se aprueban las Instrucciones Generales para la Ordenación de Montes Arbolados 118pp. Boletín Oficial del Estado, de 11 de febrero de 1971, núm. 36, art. 82.

EZQUERRO, M.; PARDOS, M.; DIAZ-BALTEIRO, L.; 2016. Operational Research Techniques Used for Addressing Biodiversity Objectives into Forest Management: An Overview. *Forests* 7(10), 229. DOI: 10.3390/f7100229.

GIL-TENA, A.; BROTONS, L.; SAURA, S.; 2008. Mediterranean forest dynamics and forest bird distribution changes in the late 20th century. *Glob. Change Biol.* 15(2), 281-531. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2008.01730.x.

GUSTAFSSON, L.; BAKER, S.; BAUHUS, J.; BEESE, W.J.; BRODIE, A.; KOUKI, J.; LINDENMAYER, D.B.; LÖHMUS, A.; MARTÍNEZ PASTUR, G.; MESSIER, C.; NEYLAND, M.; PALIK, B.; SVERDRUP-THYGESON, A.; VOLNEY, W.J.A.; WAYNE, A.; FRANKLIN, J.F.; 2012. Retention Forestry to Maintain Multifunctional Forests: A World Perspective. *BioScience* 62 (7), 633-645.

JIMÉNEZ FERNÁNDEZ, F.J.; GORDO ALONSO, F.J.; GONZÁLEZ ROMERO, A.; 2006. Manual sobre criterios de gestión forestal compatibles con la conservación de las especies de aves y quirópteros asociados a hábitats forestales. Junta de Castilla y León. Consejería de Medio Ambiente.

JOHNSON, K.N.; SCHEURMAN, H.L.; 1977. Techniques for prescribing optimal timber harvest and investment under different objectives- Discussion and synthesis. *Forest Sci.* (Monog.), 18.

JONES, D.; TAMIZ, M.; 2010. Practical Goal Programming, International Series in Operations Research & Management Science 141. Springer Science+Business Media, LLC.

LEUSCHNER, W.A.; 1984. Introduction to forest resource management. John Wilwy & Sons, 298 pp. New York.

LINGO User´s Guide; 2006. LINDO Systems Inc., 1415 North Dayton Chicago Street, Chicago Illinois.

MONTERO, G.; ROJO, A.; ÁLVAREZ, M.F.; DEL RÍO, M.; 2001. Aspectos selvícolas y económicos de los pinares de *Pinus sylvestris* L., *REEAP*, 193, 27-56.

MONTES, F.; SÁNCHEZ, M.; DEL RÍO, M.; CAÑELLAS, I.; 2005. Using historic management records to characterize the effects of management on the structural diversity of forests. *Forest Ecol. Manag.* 207, 279–293.

NACIONES UNIDAS, 1998. Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. FCCC/INFORMAL/83* GE.05-61702 (S) 130605.

PARDOS, M.; PÉREZ, S.; CALAMA, R.; ALONSO, R.; LEXER, J.M; 2016. Ecosystem service provision, management systems and climate change in Valsaín forest, central Spain. *Reg. Environ. Change*, 1-16. DOI: 10.1007/s10113-016-0985-4.

ROJO, A.; MONTERO, G., 2005. Aproximación al método selvícola: una alternativa para la ordenación de montes en zonas protectoras o protegidas. En S.E.C.F.-Gobierno de Aragón (eds.), Libro de resúmenes, conferencias y ponencias. IV Congreso Forestal Español, Zaragoza.

ROMERO, C.; 1996. Análisis de las Decisiones Multicriterio, Serie de Monografías de Ingeniería de Sistemas, ISDEFE, 114pp, Madrid.

ROMERO, C.; 2002. Programación por metas (goal programming): Pasado, presente y futuro. Toma de Decisiones con Criterios Múltiples. Revista Electrónica de Comunicaciones y Trabajos de ASEPUMA, 75-89. Tirant Lo Blanch, Valencia.

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.

TORNERO GÓMEZ, J.; 2005. Los Montes de Valsaín. Organismo Autónomo de Parques Nacionales.

ZOBEL, J.M.; EK, A.R.; O´HARA, T.J.; 2015. Quantifying the opportunity cost of extended rotation forestry with cohort yield metrics in Minnesota. *Forest Sci.*, 61(6), 1050-1057.