



7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

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

26 - 30 junio 2017 | Plasencia
Cáceres, Extremadura

7CFE01-114

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

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Uso de la teledetección para generar rodales dinámicos de aplicación en la gestión forestal: experiencias en España

PASCUAL ARRANZ, A.¹, DE MIGUEL, S.²

¹ University of Eastern Finland, School of Forest Sciences, PO Box 111, 80101 Joensuu, Finland.

² Dpt. Producció Vegetal i Ciència Forestal, Universitat de Lleida-Agrotecnio Center (UdL-Agrotecnio), Av. Rovira Roure, 191, E-25198 Lleida, Spain

Resumen

Hasta hace dos décadas, las metodologías empleadas en planificación forestal no contemplaban objetivos espaciales. Gracias al uso extendido de los sistemas de información geográfica en el ámbito forestal, el componente espacial ha sido objeto de estudio y análisis en investigación forestal. En aquél tiempo, el concepto de rodales dinámicos surgió como un enfoque flexible de gestión forestal que tiene en cuenta la localización y la distribución en el tiempo de los tratamientos selvícolas a la hora de generar las unidades de gestión forestal atendiendo a múltiples objetivos a considerar en la planificación. Los métodos de optimización espacial, como las técnicas meta-heurísticas, son técnicas que permiten utilizar múltiples objetivos que se pueden incluir simultáneamente en la planificación forestal como maximizar la producción en madera del bosque, regular las cortas y minimizar la distancia entre las zonas de corta. Recientemente, varios estudios han abordado el uso de datos de teledetección a fin de incrementar la precisión de la planificación forestal a través del enfoque de los rodales dinámicos: un estudio se centró en las masas de pino radiata en Galicia y otro en los bosque de pino silvestre y pino resinero en el linde de las provincias de Soria y Burgos. Esta contribución pretende, en base a dichos estudios, describir en detalle el concepto de rodales dinámicos usando la teledetección como base para estimar las variables forestales y para definir las unidades de inventario, y mostrar la utilidad de integrar objetivos espaciales en los problemas de planificación forestal.

Palabras clave

Rodales dinámicos, gestión forestal, teledetección, optimización especial, métodos heurísticos

1. Introducción

Los rodales, o sub-rodales, constituyen la unidad básica de gestión y planificación forestal. En el enfoque tradicional, su delimitación es fija tanto en el espacio como en el tiempo (el perímetro no se adapta a los cambios de la estructura forestal). En este sentido, es probable que la dinámica de los ecosistemas forestales sea diferente hoy en día comparada con la fecha en la que se definieron las unidades de gestión. Además de la dinámica natural del ecosistema, factores como las cortas, las perturbaciones naturales (incendios, derribos por viento, etc.) o la calidad de estación pueden inducir aun mayor variabilidad dentro de la dinámica forestal. El hecho de que el perímetro de los rodales no se ajuste a la distribución horizontal y vertical de la vegetación a lo largo del plan de gestión es una limitación importante. En términos de gestión, una alta variabilidad dentro de un mismo rodal provoca una asignación inadecuada del tratamiento a aplicar (PASCUAL et al., 2017) con su consiguiente pérdida de rentabilidad (ISLAM et al., 2012). Los métodos de gestión y planificación forestal necesitan incluir metodologías que permitan definir las unidades de gestión al mismo tiempo que se producen cambios en la estructura de la vegetación derivados de tratamientos previos, de la evolución natural del propio ecosistema y de los objetivos de gestión (DE-MIGUEL et al., 2013).

En inventario forestal, los últimos enfoques se basan en la división de la zona de estudio en unidades homogéneas definidas mediante teledetección usando datos con alta resolución espacial. La información proporcionada por estos sensores se utiliza como un conjunto de variables

independientes para predecir las variables forestales de interés como por ejemplo el número de pies (DRALLE y RUDEMO, 1996). Entre las muchas ramas de la teledetección, los sensores aerotransportados (en el inglés, “*airborne laser scanning*”, ALS) están siendo ampliamente usados para predecir la estructura forestal, tanto a nivel de masa como a nivel de árbol individual cuando tanto la densidad de puntos y las características del ecosistema lo permiten (MALTAMO et al., 2014). Estas metodologías se han plenamente establecido como método de referencia en inventario forestal en países como Finlandia, Noruega o España entre otros muchos. La integración de estas metodologías en planificación forestal es muy valiosa dado que puede reducirse la incertidumbre en la toma de decisiones (EID, 2000) dada la calidad de los datos iniciales de inventario (NÆSSET, 2002) que pueden utilizarse, además de para estimar variables de interés, para estratificar ecosistemas y para segmentar un bosque en unidades homogéneas de inventario (MUSTONEN et al., 2008). De esta manera, las unidades que componen el inventario forestal son a baja escala, se ajustan con precisión a la realidad del bosque e incluyen información sobre variables forestales de interés como por ejemplo edad de la parcela, densidad o calidad del sitio.

En este contexto, el concepto de "rodales dinámicos" (en inglés “*dynamic treatment units*”, DTU) surgió como un enfoque de planificación forestal flexible que no considera las unidades de gestión (rodales o sub-rodales) como unidades permanentes sino como combinaciones dinámicas de unidades más pequeñas que, mediante su agregación, forman unidades de gestión (PUKKALA et al., 2014). La idea subyacente de este enfoque es que las unidades de tratamiento, de diferente tamaño y forma, se forman de acuerdo con la evolución del bosque en cada unidad: las unidades de inventario adyacentes se agregan o se dispersan de acuerdo a objetivos a incluir en la gestión. De esta forma, unidades de inventario próximas con similares características o mismo tratamiento asignado (cortas, corta de regeneración, no actuación) se agregarán para formar las unidades de gestión de escala mayor. La inclusión de variables espaciales dentro de problemas de planificación forestal permite conseguir esta agregación que se basa en identificar las relaciones de vecindad entre todas las unidades de inventario. La ya asentada inclusión de los sistemas de información geográfica en planificación forestal facilita el cálculo de esta información.

En estudios anteriores, se han desarrollado sistemas de planificación forestal siguiendo el enfoque de rodales dinámicos utilizando rodales o sub-rodales como unidades de cálculo (ÖHMAN y ERIKSSON, 2002; ÖHMAN y LÄMÅS, 2003; PASCUAL et al., 2016), una malla de hexágonos regulares (PACKALEN et al., 2011), utilizando píxeles cuadrados de baja escala (LU y ERIKSSON, 2000; HEINONEN et al., 2007; DE-MIGUEL et al., 2013) o segmentos (PASCUAL et al., 2017) como unidades de inventario. En estos estudios, la agregación de los tratamientos se llevó a cabo de acuerdo a criterios económicos y productivos como la maximización de la producción de madera a lo largo del plan de gestión. Sin embargo, el criterio de agregación puede ser en base a criterios ecológicos (BETTINGER et al., 2003) con el objetivo de crear conectividad entre los distintos hábitats del área de estudio (KÖNNYŰ et al., 2014). En la formulación de este tipo de problemas se suelen incluir objetivos espaciales y no-espaciales.

En cuanto a los métodos de optimización numérica que se aplican, se mostrará el uso de algoritmos heurísticos dada su buena eficiencia a la hora de abordar problemas espaciales (PUKKALA y KURTTILA, 2005).

2. Objetivo

El uso combinado de teledetección y el enfoque de rodales dinámicos es un tema actual de investigación forestal que puede ayudar a un necesario cambio de paradigma en la gestión de los ecosistemas forestales, adaptando los métodos tradicionales de ordenación por rodales a nuevos métodos flexibles y de precisión. Nuestra contribución pretende describir en detalle el concepto de rodales dinámicos en base a estudios previos desarrollados por los autores en España tratando de hacer énfasis en maximizar el uso de datos de teledetección y en resaltar el beneficio que se obtiene

al añadir objetivos espaciales a otros no espaciales ya clásicos en gestión forestal (cortas periódicas, maximización del beneficio, etc.). Los métodos y resultados que se muestran pertenecen a los estudios realizados por DE-MIGUEL et al., (2013), PASCUAL et al., (2016) y PASCUAL et al., (2017).

3. Métodos

3.1 Inventario forestal y delineación de sus unidades

Los métodos de masa son los enfoques más utilizados en los trabajos de inventario forestal que se realizan actualmente en España. Los datos proporcionados por los sensores remotos, láseres en este caso, se utilizan como información auxiliar para predecir los atributos forestales de un área determinada. El principio básico de este método es que los retornos de todos los pulsos emitidos se computan dentro de un área determinada, generalmente, una parcela de muestreo donde existe información medida sobre el terreno (Figura 1). De esta forma, las métricas resultantes tanto de altura de retornos como de intensidad de los mismos (MCGAUGHEY, 2015), se computan para cada parcela y se usan conjuntamente para predecir las variables forestales de interés para después aplicarlo al conjunto de la zona de estudio (la extensión de los datos es continua en el espacio sobre la zona de interés).

En el caso de ecosistemas forestales abiertos, como ciertos bosques mediterráneos, la utilidad de los métodos de individualización (la información resultante es nivel de árbol individual, no de parcela) permite incrementar la precisión a la hora de estimar la densidad de pies (KAARTINEN et al., 2012), así como aportar información adicional (VAUHKONEN et al., 2008).

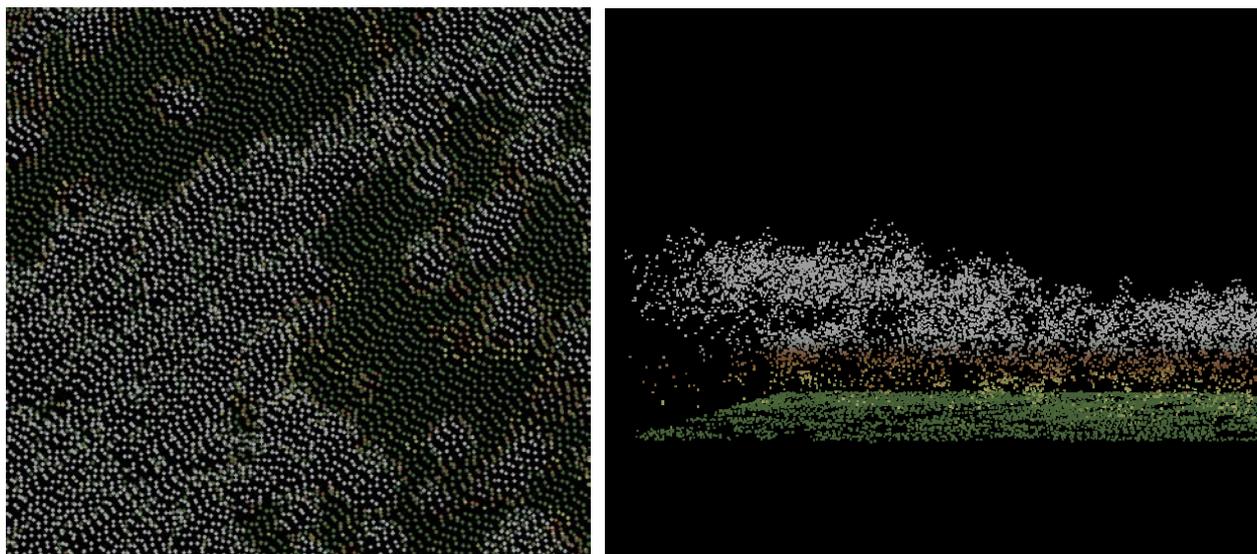


Figura 1. Visualización tanto en dos y tres dimensiones de los datos ALS usados en PASCUAL et al., (2016)

Los variables forestales a nivel de masa se pueden estimar mediante una amplia variedad de técnicas de modelización como regresión lineal múltiple (NÆSSET et al., 2002), métodos no-paramétricos (MALTAMO et al., 2006), modelos mixtos (BREIDENBACH, 2007) o ecuaciones simultáneas (MALTAMO et al., 2009). La modelización resultante permite predecir los atributos forestales para toda la zona de estudio aprovechando la cobertura total.

En PASCUAL et al., (2017) se utilizó regresión lineal múltiple apoyándose en métodos de selección de variables (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2008) utilizando dos sistemas distintos de

planificación: uno usando píxeles y otro utilizando segmentos definidos mediante técnicas de segmentación automática (LEPPÄNEN et al., 2003) usando datos de teledetección y la red de vías para definir las unidades de inventario. (Figura 2). El método de re-crecimiento de regiones se utilizó para aplicar una segmentación multi-resolución dando como resultado un conjunto de 2947 unidades de inventario. En el caso de los píxeles, los atributos a nivel de celda se estimaron usando una malla de 16 metros de lado (mismo tamaño que el área de las parcelas de campo utilizadas). La zona de estudio es un bosque mediterráneo de pino salgareño (*Pinus nigra* Arnold) situado en la comarca de Pinares en Soria.

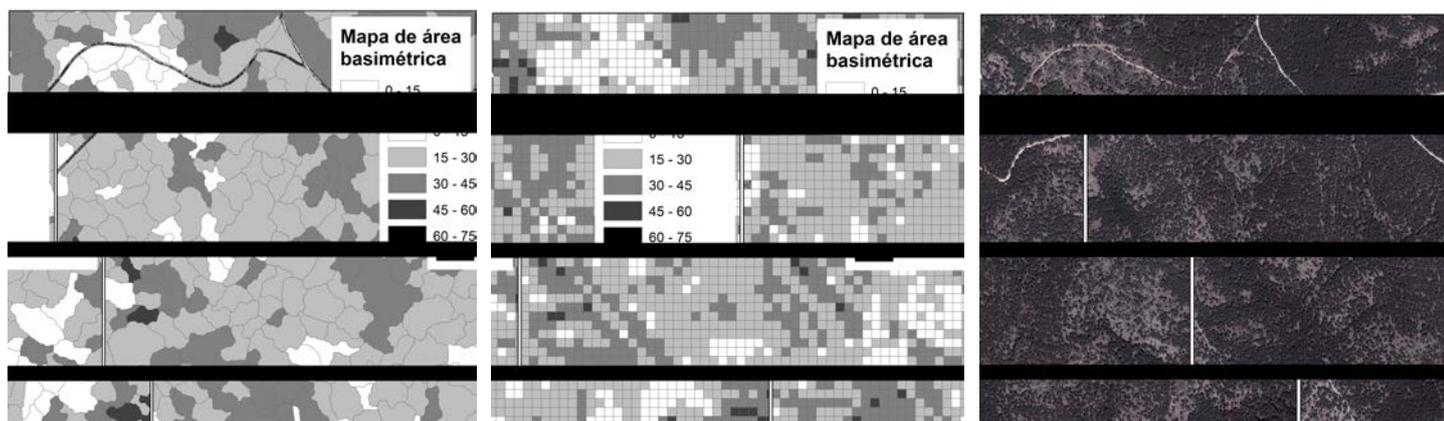


Figura 2. Distribución espacial del área basimétrica según distintas unidades de inventario, segmentos y píxeles, junto con la ortofoto. La zona que se muestra es una mezcla de rodales densos y dispersos.

Los métodos de segmentación son más exigentes desde el punto de vista computacional a la hora de delinear las unidades de cálculo, pero este esfuerzo es compensado en etapas posteriores de la planificación forestal ya que los segmentos tienden a seguir los límites naturales del bosque (PASCUAL et al., 2017). El área de estudio es una mezcla continua de parcelas heterogéneas de vegetación, como en muchas otras áreas de bosques de mediterráneo, lo que da lugar a una variación sustancial de las variables forestales en toda el área de estudio (fracción de cabida cubierta y altura de la vegetación).

Con la segmentación se consiguen unidades de inventario más compactas y homogéneas (reduciendo la desviación estándar de las variables forestales predichas en cada segmento) e incrementando la variabilidad entre segmentos en la zona de estudio. Por lo tanto, su uso como unidad de referencia en inventario forestal es especialmente indicada para zonas abiertas y con discontinuidades horizontales y verticales (claras, cortas, accidentes naturales, presencia de carreteras, etc.) ya que se minimiza la influencia del efecto borde, a diferencia de lo que ocurre con otros enfoques más prácticos como el uso de una malla de polígonos regulares.

3.2 Modelos de dinámica forestal

Una vez obtenida la información y las unidades que componen el inventario forestal, se necesita de modelos de dinámica forestal que puedan hacer uso de los mismos. De estas forma, podemos formular distintos problemas de planificación forestal variando el número de intervalos así como la duración de los mismos.

En un estudio llevado a cabo en Galicia, DE-MIGUEL et al., (2013) implementaron un sistema de gestión basado en los modelos de crecimiento de masa publicados en CASTEDO-DORADO et al. (2007) para *Pinus radiata* en Galicia. En este estudio, distintas variables de masa (densidad de pies,

altura dominante, área basal y edad) se estimaron a lo largo de diez periodos anuales siguiendo las pautas de gestión comercial que esta especie requiere.

Otro ejemplo de modelos aplicados para este propósito, pero en vez de masa de árbol individual, se puede encontrar en (PASCUAL et al., 2016), un estudio localizado en un bosque de mezcla de pinos (*Pinus pinaster* Ait. y *Pinus sylvestris* L.) dentro del Bosque Modelo Urbión en San Leonardo de Yagüe (Soria). Se estimaron las mismas variables forestales que en el caso anterior. Sin embargo, en este caso, la dinámica forestal se modelizó haciendo uso de la información disponible en el Inventario Forestal Nacional que incluía la zona de estudio y otras zonas de las provincias de Burgos y Soria.

Los modelos que se generaron fueron los siguientes: (i) modelo de incremento diametral; (ii) modelo de supervivencia; (iii) relación altura-diámetro; y (iv) masa incorporada (tanto número de pies menores que alcanzan los 7.5 cm como su diámetro medio). Dado que las variables forestales se estimaron a nivel de masa, a nivel de píxel, el uso de modelos de distribución diamétrica fue necesario para estimar la distribución de los árboles dentro de cada unidad de cálculo. En este caso, los parámetros de una función de densidad de Weibull se ajustaron utilizando la función de máxima verosimilitud utilizando los datos de campo de las parcelas como otros estudios han realizado (PALAHÍ et al., 2007). En base a este conjunto de modelos (de dinámica forestal más distribuciones diamétricas) es posible predecir las variables forestales necesarias a lo largo de un plan de gestión.

Alternativamente, otros estudios han demostrado la posibilidad de estimar simultáneamente los atributos forestales y ajustar los modelos de distribución diamétrica utilizando las mismas variables independientes (MALTAMO et al., 2007; THOMAS et al., 2008).

3.3 Definición de las instrucciones óptimas de gestión y generación de itinerarios/alternativas de gestión

En términos financieros, la decisión de si un árbol (o un rodal) está listo para cortarse depende de cuando su incremento en términos de valor relativo se sitúa por encima de la tasa de interés usada como referencia (DAVIS y JOHNSON, 1987). Atendiendo a criterios productivos sin incluir productos no maderables, el valor monetario de un árbol en pie en el momento presente depende del precio de mercado de los distintos productos que lo componen. Este valor puede cambiar a medida que los árboles crecen (los productos madereros se clasifican por el diámetro mínimo de la altura del pecho y la altura del árbol) y a medida que las preferencias de las partes interesadas en el mercado varíen (incentivos fiscales y de mercado para consumir más madera son dos ejemplos).

Asumiendo que el valor de un árbol tiende a aumentar con el crecimiento, el valor relativo del mismo aumenta hasta llegar a la dimensión mínima para ser comercializado como sierra o gruesa o chapa en el mejor de los casos. Una vez pasado este umbral, los picos en el incremento del valor relativo desaparecen y el valor relativo pasa a ser 0, aunque a nivel de rodal, hay que tener en cuenta que no todos los árboles alcanzan la madurez financiera a la misma edad o diámetro (PUKKALA et al., 2015). Otros estudios sí han incluido una valoración más amplia de los bienes y servicios que proporcionan los bosques para desarrollar métodos de selección de árbol individual (MARTÍN-FERNÁNDEZ y GARCÍA-ABRIL, 2005) que pueden complementar métodos de selección, similares a PASCUAL et al., (2016) pero en árbol individual también, basados las relaciones de vecindad y distancia entre los pies (VAUHKONEN y PUKKALA, 2016)

Siguiendo este razonamiento económico, es posible generar unas instrucciones de manejo óptimas para calcular, por ejemplo, el incremento de valor en los próximos 5 años dividido por el valor inicial del rodal. Es posible modelizar este incremento de valor en base a las variables forestales necesarias para desarrollar el sistema de gestión. En PASCUAL et al., (2016) se utilizaron las variables calidad de estación, área basal y diámetro medio cuadrático para calcular los valores

óptimos de corta para la zona de estudio, tanto diámetro a final de turno como el área basal a partir de cual realizar una clara en caso de no alcanzar el diámetro necesario para una corta de regeneración (Figura 3).

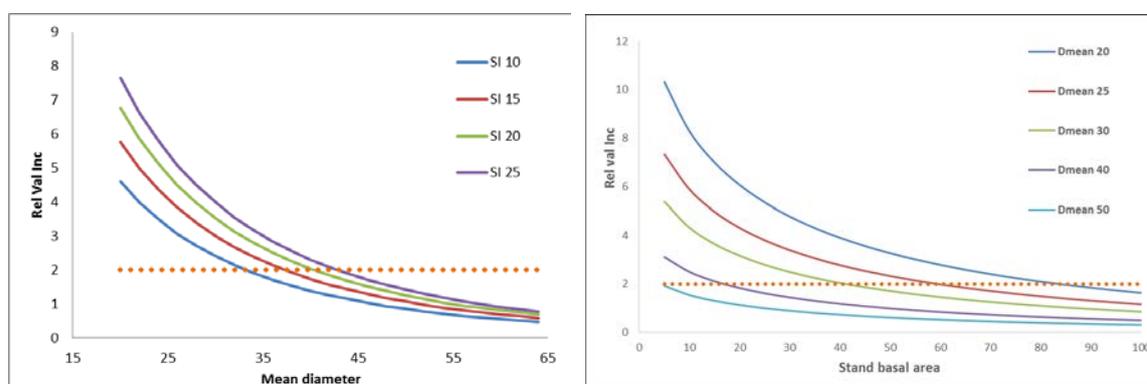


Figura 3. Ejemplo de instrucciones óptimas de manejo atendiendo al diámetro medio cuadrático y área basal.
Fuente: modificado a partir de PASCUAL et al., (2016)

De esta forma, cada unidad de inventario lleva asociada sus valores óptimos de gestión desde el punto de vista productivo.

La decisión de realizar una corta de regeneración, una clara o no tratamiento en cada período se instruyó de la siguiente manera: si el diámetro medio fuera mayor que el diámetro corta definido en las instrucciones, se simula la corta de regeneración seguido de una corta de los árboles semilleros en pie en el siguiente periodo. En caso contrario, el área basal mínima de corta se compara con el valor de la unidad prescribiéndose una clara en caso de ser inferior el de las instrucciones de gestión. Esta clara se simula bajo tres escenarios de intensidad selvícola, extrayéndose aproximadamente el 10%, 20% y 40% del área basal en cada uno. Una vez calculados los valores límite que permitirán asignar unos tratamientos u otros, es necesario generar variabilidad de itinerarios silvícolas para cada una de las unidades de inventario a fin de seleccionar el itinerario, o “*schedule*”, que optimice la solución al problema formulado.

Se utilizaron tres multiplicadores a fin de generar variabilidad a la hora de determinar el turno, el área basal de corta mínima y la intensidad de las cortas. De esta forma, se crearon 27 itinerarios para cada unidad de inventario para aplicar gestión forestal en condiciones de masa regular y otros 9 más en el caso de masas clasificadas como irregular. La opción de no tratamiento se incorporó en la simulación de los itinerarios. En ese estudio, los autores utilizaron una malla de píxel para desarrollar el sistema de planificación basado en rodales dinámicos e hicieron uso de casi 5,5 millones de itinerarios para asignar los tratamientos selvícolas a 6266 píxeles de 0,05 ha cada uno.

3.5 Planificación forestal multi-objetivo incluyendo objetivos espaciales

En los tres estudios de los que se nutre esta revisión, se utilizó una función de utilidad (PUKKALA y KANGAS, 1993) para incluir los múltiples criterios dentro del problema de planificación forestal. En este enfoque, la importancia de los criterios se cuantifica mediante pesos, o coeficientes ligados a cada una de las variables incluidas en la formulación. De una forma teórica, una formulación puede definirse como:

$$\max U = \sum_{i=1}^I a_i u_i (q_i)$$

sujeta a:

$$q_i = Q_i(X), i = 1, \dots, I$$

donde U es el valor total de la función de utilidad, a_i es el peso de la función sub-utilidad u_i , y q_i es la cantidad de la variable objetiva i . Q_i es el procedimiento que calcula el valor de la variable objetiva i a partir de la información de los itinerarios selvícolas que se incluyen en la solución, y X es un vector que contiene los números de código de los itinerarios que se incluyen en la solución.

Los primeros planes de gestión establecieron las pautas de aprovechamiento forestal sostenible que se realizaron en el Oeste de Europa (EVELYN, 1664) cuyo objetivo principal era asegurar un suministro continuo de recursos madereros a lo largo de un turno que permitiera que los árboles llegaran a un óptimo económico (FAUSTMANN, 1948) asegurando la persistencia de la masa. Alcanzar un volumen determinado de cortas en un periodo o aumentar el volumen de madera en pie al final de un periodo son objetivos no espaciales que son incluidos en formulaciones clásicas. Los últimos enfoques en planificación combinan objetivos no espaciales y espaciales para resolver problemas multi-objetivo.

Hoy en día, y gracias al uso extendido de los sistemas de información geográfica (SIG) y la incorporación de la teledetección, es posible mejorar la resolución de problemas de planificación forestal mediante el uso de objetivos espaciales que permitan resolver problemas como agregar zonas de corta (PUKKALA et al., 2014), minimizar la fragmentación entre los hábitats y tipos de bosque (TÓTH et al., 2012), reducir el riesgo de derribo por viento (HEINONEN et al., 2011) o por incendio forestal (GONZÁLEZ-OLABARRIA y PUKKALA, 2011). Estudios previos basados en el concepto de rodales dinámicos (HEINONEN et al., 2007, PUKKALA et al., 2009, PACKALEN et al., 2011, PASCUAL et al., 2016) han utilizado las relaciones de adyacencia (posición y longitud de borde compartido entre cada una de las unidades de inventario) para definir objetivos espaciales.

En los estudios realizados en España, se integraron objetivos espaciales, destinados a agregar unidades y otros dispersarlas, dentro de una función de utilidad, en este caso la formulada para PASCUAL et al., (2016) fue:

$$U = 0.05 u_1(V_{30}) + 0.05 u_2(H_1) + 0.05 u_3(H_2) + 0.05 u_4(H_3) + 0.05 u_5(CC) + 0.75 u_6(CNC)$$

donde V_{30} maximiza el volumen al final del plan de gestión de 30 años de duración; H_1 , H_2 , H_3 son objetivos de cortas periódicas de manera que en cada periódico se corten exactamente 10.000 m³. En cuanto al criterio de agregación, el objetivo CC maximiza en cada periodo el borde compartido entre segmentos en los que se ha prescrito cualquier tipo de actuación selvícola. Para conseguir dispersión entre las unidades se utiliza el objetivo CNC que minimiza el borde compartido entre segmentos asignados con un tratamiento y segmentos en los que la prescripción es no actuar. De esta forma se consigue la formación de unidades de gestión compactas y lo más cohesionadas internamente posibles, de forma circular y aisladas unas de otras a fin de facilitar la concentración de actividades y recursos (maquinaria) en el espacio.

A lo largo del proceso de optimización espacial, la recombinación de las distintas unidades en cada periodo se produce de forma que, progresivamente, se alcancen los objetivos definidos tanto espaciales como no espaciales (Figura 4).

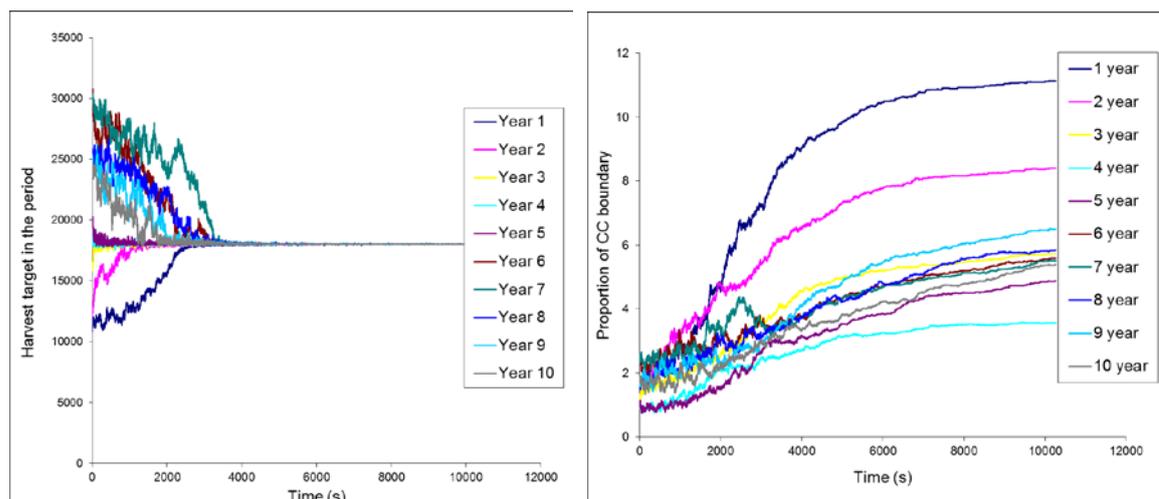


Figura 4. Evolución de la variable global "corta periódica" y de la variable espacial CC durante la optimización.
Fuente: modificado a partir de DE-MIGUEL et al., (2013)

En la formulación anterior se incluyen seis objetivos distintos. Si se hubiera optado por una formulación no espacial, el peso de las variables no espaciales hubiera sido mayor y con ello se hubiera conseguido un valor superior del objetivo V_{30} . Sin embargo, la delineación y la ubicación de los tratamientos en el espacio no resultarían tan efectivos como en el caso anterior.

En un estudio posterior (PASCUAL et al., 2017) se cuantificó la penalización de incrementar el número de objetivos en la función de utilidad, pasando de un problema no-espacial a un problema espacial incluyendo, entre otros, los objetivos espaciales previamente mencionados. En dichos análisis se maximizó el volumen en pie al final de un periodo de gestión de 60 años (V_{END}) donde en cada periodo (3 periodos de 20 años) se fijó el objetivo de cortar 25.000 m³. En el caso de la formulación no espacial, el valor de la función de la utilidad alcanzó 0.9833 mientras que en el caso espacial, el valor fue menor (0.8476). El volumen a final de turno en la formulación no espacial fue tan solo un 1% superior al caso espacial, teniendo en cuenta que el peso de los objetivos espaciales fue de un 91%. De acuerdo a la delineación de los rodales dinámicos en el plano (Figura 5), la formulación espacial compensa la leve pérdida en volumen a final del periodo de gestión dado el grado de aislamiento entre las unidades, agregación y tamaño de los rodales generados.

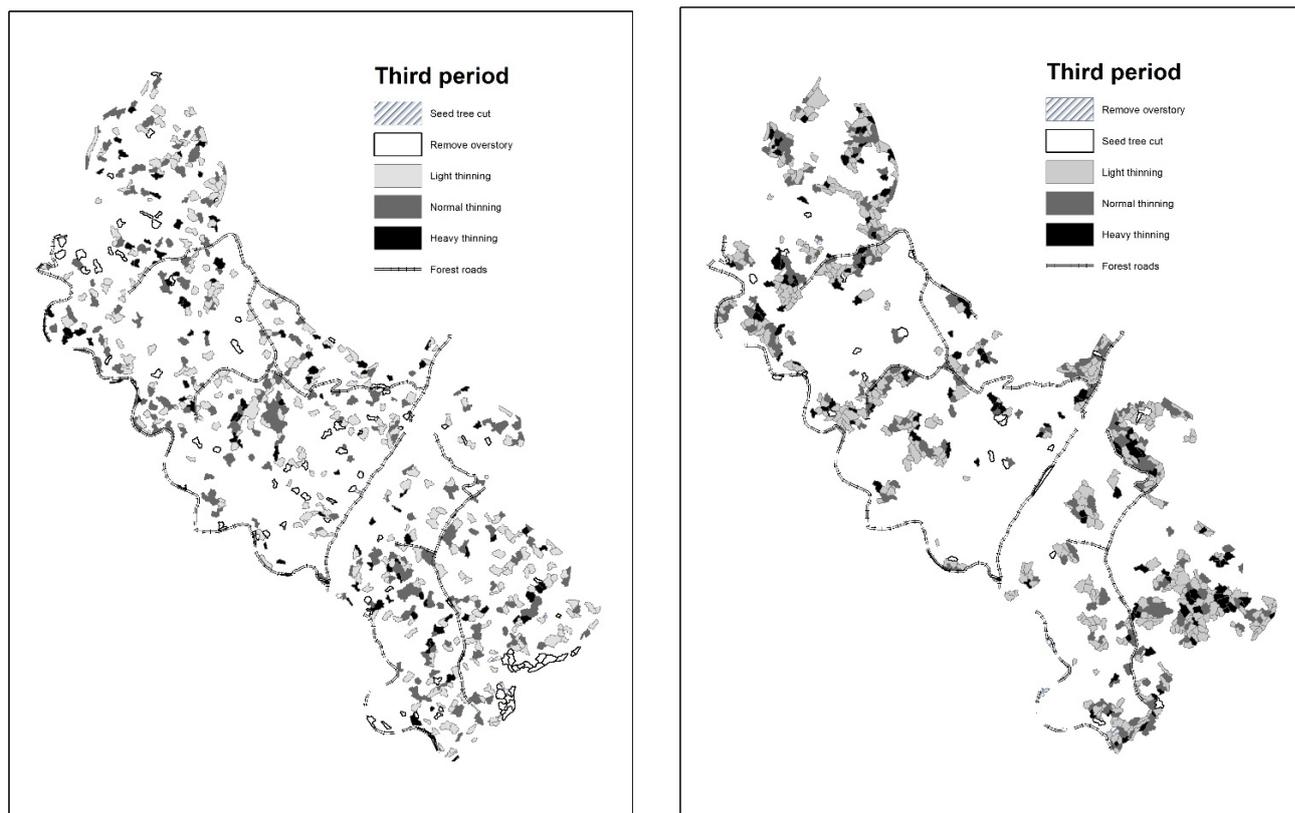


Figura 5. Delineación de los rodales dinámicos en el caso de formulación no espacial (izquierda) y espacial (derecha). Fuente: modificado a partir de PASCUAL et al.,(2017)

En este último estudio, se utilizó el algoritmo meta-heurístico “*simulated annealing*” dada su alta eficacia a la hora de solucionar problemas espaciales en manejo forestal (PUKKALA y KURTTILA, 2005) cuando el número de unidades de inventario no es muy elevada (y por consiguiente tampoco las posibilidades de combinaciones de itinerarios) (PUKKALA et al., 2009). Los métodos heurísticos permiten obtener soluciones óptimas, próximas al óptimo real, a problemas complejos de combinatoria y optimización. Hoy en día, sin embargo, es más factible que nunca utilizar métodos que busquen soluciones exactas dada la potencia de los equipos informáticos comparado con hace dos décadas. En este sentido, previos estudios han utilizado métodos de optimización basados en programación lineal aplicados a la creación de rodales dinámicos (KÖNNYÚ et al., 2014, TÓTH et al., 2012) que permiten obtener soluciones exactas. Una buena revisión del estado del arte de los métodos disponibles se puede encontrar en PASALODOS-TATO et al., (2013).

4. Conclusiones

Con esta contribución pretendemos mostrar la utilidad de los rodales dinámicos para definir las unidades de gestión en base a información espacial precisa. Para ello es necesario un cambio de paradigma en los métodos de planificación forestal que actualmente se aplican en España donde los límites de los rodales y sub-rodales han pasado a ser fijos. Creemos que es el momento de aprovechar el uso extendido, y asentado, de la teledetección como herramienta de apoyo en inventario forestal para integrar nuevos métodos de gestión que sean flexibles, utilicen información

espacial e incorporen métodos de optimización que permitan una gestión más eficiente de los recursos forestales.

5. Bibliografía

BETTINGER, P., JOHNSON, D. L., JOHNSON, K. N. 2003. Spatial forest plan development with ecological and economic goals. *Ecol. Model.* 169 215–236.

BREIDENBACH, J., MCGAUGHEY, R.J., ANDERSEN, H., KÄNDLER, G., REUTEBUCH, S. 2007. A mixed-effects model to estimate stand volume by means of small footprint airborne lidar data for an American and a German study site. *IAPRS XXXVI*, 77-83.

CASTEDO-DORADO, F., DIÉGUEZ-ARANDA, U., ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, J.G. 2007. A growth model for *Pinus radiata* D. Don stands in north- western Spain. *Ann. For. Sci.* 64 453-465.

DAVIS L.S., JOHNSON K.N. 1987. Forest management. Third edition. McGraw-Hill Inc. p 790

DRALLE, K. RUDEMO, M. 1996. Stem number estimation by kernel smoothing in aerial photos. *Can. J. For. Res* 26 1228–1236

DE-MIGUEL, S.; PUKKALA, T.; PASALODOS, J. 2013. Dynamic treatment units: flexible and adaptive forest management and planning by combining spatial optimization methods and LiDAR. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*. 37 49–54.

EID, T. 2000. Use of Uncertain Inventory Data in Forestry Scenario Models and Consequential Incorrect Harvest Decisions. *Silva Fenn.* 34 89–100.

EVELYN, J. 1664. *Silva: or, A discourse of forest-trees, and the propagation of timber in His Majesty's dominions.* Available online in Nisbet, John. 1620-1706

FAUSTMANN, M. 1849. On the determination of the value which forest land and immature stands pose for forestry. En: *Gane M (ed) Martin Faustmann and the evolution of discounted cash flow. Paper 42. Oxford Institute, Oxford, England 1968 54.*

GONZÁLEZ-OLABARRIA, J. R., PUKKALA, T. 2011. Integrating fire risk considerations in landscape-level forest planning. *Forest. Ecol. Manag.* 261 278–287.

HEINONEN, T., KURTTILA, M., PUKKALA, T. 2007. Possibilities to aggregate raster cells through spatial optimization in forest planning. *Silva. Fenn.* 41 89–103.

HEINONEN, T., PUKKALA, T., IKONEN, V. P., PELTOLA, H., GREGOW, H., VENÄLÄINEN, A. 2011. Consideration of strong winds, their directional distribution and snow loading in wind risk assessment related to landscape level forest planning. *Forest. Ecol. Manag.* 261 710–719.

ISLAM, N., PUKKALA, T., KURTTILA, M., MEHTÄTALO, L., HEINONEN, T. 2012. Effects of forest inventory errors on the area and spatial layout of harvest blocks. *Eur. J. For. Res.* 131 1943–1955.

KAARTINEN, H., HYYPPÄ, J., YU, X., VASTARANTA, M., HYYPPÄ, H., KUKKO, A., ... WU, J. C. 2012. An international comparison of individual tree detection and extraction using airborne laser scanning. *Remote Sens.* 4 950–974

KÖNNYÚ, N., TÓTH, S. F., MCDILL, M. E., RAJASEKARAN, B. 2014. Temporal connectivity of mature patches in forest planning models. *For. Sci.* 60 1089–1099.

- LEPPÄNEN, V. J. TOKOLA, T., MALTAMO, M., MEHTÄTALO, L., PUSA, T., MUSTONEN, J. 2003. Automatic delineation of forest stands from lidar data. ISPRS Conf. on GEOBIA
- LU, F., ERIKSSON, L. O. 2000. Formation of harvest units with genetic algorithms. *Forest. Ecol. Manag.* 130 57–67.
- MALTAMO, M., MALINEN, J., PACKALÉN, P., SUVANTO, A., KANGAS, J. 2006. Nonparametric estimation of stem volume using airborne laser scanning, aerial photography, and stand-register data. *Can. J. For. Res.* 36 426–436
- MALTAMO, M., SUVANTO, A., PACKALÉN, P. 2007. Comparison of basal area and stem frequency diameter distribution modelling using airborne laser scanner data and calibration estimation. *Forest. Ecol. Manag.* 247 26–34.
- MALTAMO, M., PEUHKURINEN, J., MALINEN, J., VAUHKONEN, J., PACKALÉN, P. TOKOLA, T. 2009. Predicting tree attributes and quality characteristics of Scots pine using airborne laser scanning data. *Silva Fenn.* 43 507–521
- MALTAMO, M., PACKALEN, P. 2014. Species-Specific Management Inventory in Finland. En: *Forestry Applications of Airborne Laser Scanning: Concepts and Case Studies, Managing Forest Ecosystems* 27 241–252
- MARTÍN-FERNÁNDEZ, S., GARCÍA-ABRIL, A. 2005. Optimisation of spatial allocation of forestry activities within a forest stand. *Comput. Electron. Agric.* 49 159–174.
- MCGAUGHEY, R. J. 2015. FUSION/LDV: Software for LiDAR data analysis and visualization. Version 3.30. U.S. Department of Agriculture Forest Service, Pacific Northwest Research Station, University of Washington, Seattle, Wash. http://forsys.cfr.washington.edu/fusion/FUSION_manual.pdf (Accessed October 2015).
- MUSTONEN, J., PACKALEN, P., KANGAS, A. 2008. Automatic segmentation of forest stands using a canopy height model and aerial photography, *Scan. J. For. Res.* 23 534-545
- NÆSSET, E. 2002. Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data. *Remote Sens. Environ.* 80 88–99.
- ÖHMAN, K., ERIKSSON, L. O. 2002. Allowing for spatial consideration in long-term forest planning by linking linear programming with simulated annealing. *Forest. Ecol. Manag.* 161 221–230.
- ÖHMAN, K., LÄMÅS, T. 2003. Clustering of harvest activities in multi-objective long-term forest planning. *Forest. Ecol. Manag.* 176 161–171.
- PACKALÉN, P.; HEINONEN, T.; PUKKALA, T.; VAUHKONEN, J.; MALTAMO, M. 2011. Dynamic treatment units in Eucalyptus plantation. *For. Sci.* 57 416–426.
- PALAHÍ, M., PUKKALA, T., TRASOBARES, A. 2006. Modelling the diameter distribution of *Pinus sylvestris*, *Pinus nigra* and *Pinus halepensis* forest stands in Catalonia using the truncated Weibull function. *Forestry* 79 553–562.
- PASALODOS-TATO, M., MÄKINEN, A., GARCIA-GONZALO, J., BORGES, J. G., LÄMÅS, T., ERIKSSON, L. O. 2013. Review. Assessing uncertainty and risk in forest planning and decision support systems: review of classical methods and introduction of new approaches. *Forest Syst.* 22 282–303.

- PASCUAL, A., PUKKALA, T., RODRÍGUEZ, F., DE-MIGUEL, S. 2016. Using Spatial Optimization to Create Dynamic Harvest Blocks from LiDAR-Based Small Interpretation Units. *Forests* 7 220.
- PASCUAL, A., PUKKALA, T., DE-MIGUEL, S., PESONEN, A., PACKALEN, P. 2017. Integrating operational harvesting costs into benefit-oriented, spatially-explicit forest management planning. Manuscript.
- PUKKALA, T., KANGAS, J. 1993. A heuristic optimization method for forest planning and decision making. *Scan. J. For. Res.* 8 560–570.
- PUKKALA, T., KURTTILA, M. 2005. Examining the performance of six heuristic optimisation techniques in different forest planning problems. *Silva. Fenn.* 39 67–80.
- PUKKALA, T., HEINONEN, T., KURTTILA, M. 2009. An Application of a Reduced Cost Approach to Spatial Forest Planning. *For. Sci* 55 13–22.
- PUKKALA, T., PACKALÉN, P., HEINONEN, T. 2014. Dynamic treatment units in Forest Management Planning. En: *The Management of Industrial Forest Plantations: Theoretical Foundations and Applications, Managing Forest Ecosystems* 33
- PUKKALA, T., LÄHDE, E., LAIHO, O. 2015. Which trees should be removed in thinning treatments? *For. Ecosyst.* 2 2-32.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM. 2008. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0
- THOMAS, V., OLIVER, R.D., LIM, K., WOODS, M. 2008. LiDAR and Weibull modeling of diameter and basal area. *Forest. Chron.* 84 866–875.
- TÓTH, S. F., MCDILL, M. E., KÖNNYU, N., GEORGE, S. 2012. A strengthening procedure for the path formulation of the area-based adjacency problem in harvest scheduling models. *MCFNS* 4 27–49.
- VAUHKONEN, J., TOKOLA, T., MALTAMO, M., PACKALÉN, P. 2008. Effects of pulse density on predicting characteristics of individual trees of Scandinavian commercial species using alpha shape metrics based on airborne laser scanning data. *Can. J. Remote. Sens.* 34 441–459
- VAUHKONEN, J., PUKKALA, T. 2016. Selecting the trees to be harvested based on the relative value growth of the remaining trees. *Eur. J. For. Res.* 135 581–592.