



**6º CONGRESO FORESTAL
ESPAÑOL**

6CFE01-437

Montes: Servicios y desarrollo rural
10-14 junio 2013
Vitoria-Gasteiz



Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales
Vitoria-Gasteiz, 10-14 junio de 2013
ISBN: 978-84-937964-9-5
© Sociedad Española de Ciencias Forestales

A la búsqueda de un método integrado para la estimación del riesgo de incendio a través de LiDAR Aéreo

GONZÁLEZ OLABARRIA, J.R.¹, RODRÍGUEZ, F.², FERNÁNDEZ LANDA, A.³ y MOLA YUDEGO, B.⁴

¹ Centre Tecnològic Forestal de Catalunya.

² Fundación Cesefor.

³ Agresta Sociedad Cooperativa.

⁴ University of Eastern Finland.

Resumen

La reciente aparición del LiDAR aéreo como medio para inventariar recursos forestales a nivel de paisaje, así como para la estimación de parámetros forestales que influyen en el comportamiento potencial del fuego, ha supuesto una revolución en la manera de afrontar estas tareas, dado que se espera que reduzca sustancialmente el coste de las mismas. El presente estudio presenta un marco metodológico que permite combinar información proveniente de vuelos con sensor LiDAR y simuladores del comportamiento del fuego, con el fin de estimar el riesgo que el fuego supone para los recursos forestales de un monte. La metodología, una vez aplicada en el Bosque Modelo de Urbión, provee una gran variedad de información acerca del estado del monte, desde la localización exacta de existencias madereras y estructura de la masa, hasta predicciones sobre el comportamiento del fuego y riesgo que este supone para los recursos del monte.

Palabras clave

LiDAR aéreo, inventario forestal, análisis del riesgo de incendio, Bosque Modelo de Urbión

1. Introducción

Si se pretende incluir el riesgo de incendio en la planificación de la gestión forestal a nivel de paisaje, las últimas tendencias científicas apuntan a considerar explícitamente el componente espacial de dicho riesgo (Bettinger, 2010; González-Olabarria y Pukkala 2011). En ese sentido, un paso imprescindible es inventariar los recursos forestales respecto a su cantidad y distribución espacial en el paisaje, así como identificar el riesgo potencial que el fuego supone para tales. A la hora de identificar y cuantificar el riesgo que los incendios suponen en una determinada área forestal es necesario considerar que los incendios son eventos espaciales, y que el fuego modifica su comportamiento en función de las condiciones específicas del lugar donde se analice y de la configuración espacial de la topografía y combustibles a lo largo de todo el área de estudio (Finney, 2007).

En las últimas décadas, nuevas herramientas de teledetección han ganado popularidad a la hora de adquirir información espacialmente continua sobre la disposición espacial tanto de combustibles (Arroyo et al; 2008) como recursos forestales (Boyd y Danson, 2005). Entre dichas herramientas, el LiDAR (Light Detection and Ranging) aéreo, es capaz de proporcionar información bastante precisa de la disposición tridimensional de la estructura forestal sobre grandes áreas de terreno, pudiéndose utilizar, entre otras, para el inventariado de recursos forestales (Nelson *et al*; 1988; Næsset, 2002; 2004; Holmgren *et al*; 2003; Hollaus

et al; 2004; Hall *et al;* 2005; Maltamo *et al;* 2005) modelización y mapificado de combustibles (Riaño *et al;* 2007; Mutlu *et al;* 2008a), y la modelación de variables de copa necesarias para la predicción de la actividad de fuegos de copas (Riaño *et al;* 2003, 2004; Andersen *et al;* 2005).

El uso de la información obtenida a través de LiDAR aéreo sobre los recursos forestales, puede ser combinado con predicciones sobre el comportamiento del fuego para estimar el riesgo que los incendios suponen para dichos recursos. Si bien ha sido ampliamente contemplada la posibilidad de utilizar información sobre combustibles obtenida a través de LiDAR para simular el comportamiento potencial del fuego, raramente se ha implementado (Mutlu *et al;* 2008b) ni combinado con el inventario de recursos forestales.

2. Objetivos

El presente estudio se centra en la información obtenida a través de LiDAR para crear un inventario completo de los recursos forestales y el riesgo de incendio al que están sujetos en un monte público en el Bosque Modelo de Urbión. Este objetivo general incluye los siguientes objetivos parciales: 1) Relacionar la estructura a nivel de rodal con información LiDAR; 2) Obtener variables que expliquen el comportamiento del fuego a partir de datos LiDAR; 3) Realizar un inventario completo del bosque a partir de datos LiDAR; 3) Generar información espacialmente continua (que cubra todo el área de estudio) de las variables que influyan en el comportamiento del fuego; 4) Integrar la información generada en sistemas de simulación del comportamiento de incendios; 5) Simular el comportamiento del fuego en nuestro monte e identificar aéreas de alto riesgo susceptibles de medidas adicionales de gestión forestal.

3. Metodología

Para la consecución de los objetivos definidos, se genero una metodología que integra la toma de datos en campo y a través de sensor LiDAR, la modelización de variables a nivel de rodal, la clasificación de combustibles, la generación de información a nivel de paisaje, y la simulación del comportamiento del fuego (Figura 1).

El área de estudio consiste en dos montes públicos de Soria, localizados dentro del Bosque Modelo de Urbión, de 996.7 y 221.7 hectáreas. Ambos montes están dominados por bosques puros regulares de *Pinus Nigra* y *P. Pinaster*, con limitada presencia de *Juniperus* sp. En el área de estudio se establecieron 160 parcelas de 500 m², localizadas en una malla sistemática de 250 X 250 metros. En dichas parcelas se medio para todos los arboles su altura total, la altura de la base de la copa y el diámetro a 1.30 m. Aparte, a nivel de rodal se midió la cobertura arbórea y de los arbustos, y se estimo la altura media de los arbustos. A partir de las mediciones a nivel de árbol, se estimó el volumen maderero y la distribución de la biomasa tanto aérea como radicular, utilizando los modelos de Rodriguez *et al.* (2012) y Ruiz-Peinado *et al.* (2012). La información obtenida a partir de las mediciones en campo se obtuvo con el fin de ajustar modelos que sirvan para convertir los datos LiDAR en información forestal.

Con respecto a los datos LiDAR, se sobrevoló el área de estudio con un Cesna 402-C. equipado con un sensor LiDAR ALS60 II, obteniendo una densidad de 2 primeros pulsos por metro cuadrado. Los datos LiDAR se trataron con el sistema FUSSION (McGaughey and

Carson, 2003), con el fin de obtener información estadística estructurada sobre los retornos láser. Para un adecuado tratamiento posterior de la información, los datos se agregaron en cuadrados de 500 m², coincidiendo con las parcelas medidas en campo, y se segregaron los pulsos a partir de una altura de 2 metros, para identificar los árboles maduros y el substrato arbustivo. Los datos LiDAR se agregaron espacialmente y se separaron por alturas, a fin de obtener métricas, como por ejemplo las alturas e intensidades de diferentes percentiles de retornos láser, la altura e intensidad media de los retornos, y una estimación de la cobertura vegetal por encima (arbórea) y por debajo (arbustiva) de 2 metros.

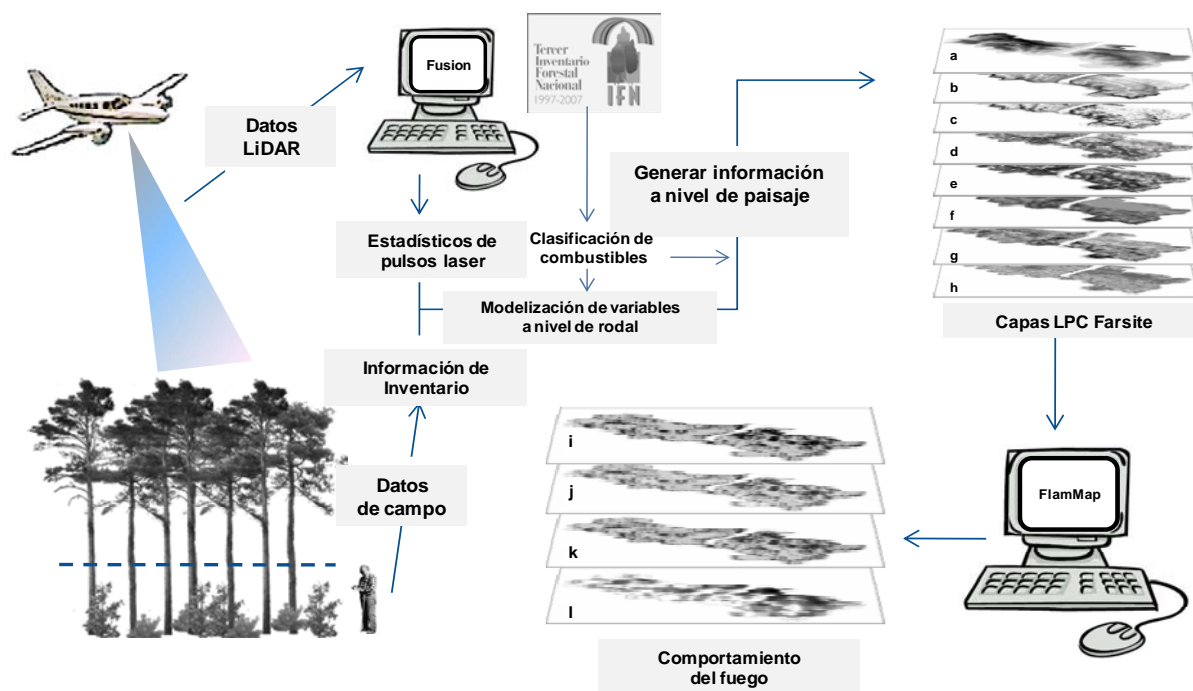


Figura 1. Esquema de la metodología utilizada en el estudio.

Al combinar los datos tomados en campo y las métricas obtenidas, se elaboraron modelos construidos para predecir variables de rodal a partir de los datos LiDAR disponibles. Las variables dependientes predichas fueron las siguientes: número de pies por hectarea (N), área basal (G), volumen total (V), diámetro cuadrático medio (Dq), altura dominante (H₀), altura de Lorey (hL), altura de inserción de la primera rama (hB), biomasa foliar (FB), biomasa en los troncos (SB), biomasa en ramas (BB), biomasa radicular (RB), fracción de cubierta cubierta del matorral (BC), y altura del matorral (hB). Para la realización de los modelos, se utilizaron regresiones no-lineales.

Aparte de las variables previamente definidas a nivel de rodal, se procedió a relacionarla con modelos de combustible estándar (NFFL de Anderson, 1982). Para ello se seleccionaron 431 parcelas dominadas por *P. nigra* o *P. pinaster* del 3er IFN para la provincia de Soria, y tras estimar las variables deseadas (N, G, V, Dq, H₀, hL, hB, FB, SB, BB, RB, BC, hB) se utilizó la técnica de árboles de decisión CHAID (Kass, 1980), para establecer las combinaciones óptimas de variables y puntos de corte que mejor clasificaran las parcelas en función de su modelo de combustible.

Para simular el comportamiento potencial del fuego en nuestro paisaje, se utilizó el sistema FlamMap de mapeación y análisis del fuego (Finney, 2006). Este sistema, utiliza un paisaje LPC FARSITE, consistente en capas de información sobre altitud, pendiente, orientación, fracción de cubierta, altura media del rodal, densidad de biomasa aérea, modelos de combustible, una humedad de combustibles definida y un escenario meteorológico (dirección y velocidad del viento), para simular el comportamiento potencial del fuego en cualquier punto del paisaje. Entre las variables que definen el comportamiento del fuego a que FlamMap es capaz de generar, destacan la altura de llama, la intensidad de fuego, y la presencia de fuegos de copas activos o pasivos. Estas variables están directamente relacionadas con la severidad de fuego y se pueden utilizar como indicadores del nivel de daño esperado que el fuego producirá al bosque. Además FlamMap puede generar múltiples igniciones, y los consiguientes fuegos, con el fin de definir una probabilidad de ocurrencia de incendio en nuestro paisaje para dichas igniciones. La combinación de la probabilidad de ocurrencia de incendio y daño potencial, son necesarias para definir el riesgo debido al fuego, lo que hace de este sistema altamente deseable para su uso en la planificación de la gestión del bosque bajo riesgo de incendios (González-Olabarria y Pukkala 2011).

Las capas que definen el paisaje LPC FARSITE, de nuestro paisaje se generó a partir de los datos LiDAR, y el uso de los modelos generados a nivel de rodal. A la hora de definir las condiciones de humedad de combustibles y condiciones meteorológicas, se optó por seleccionar 4 escenarios, provenientes de la combinación dos alternativas de humedad y dos de velocidad de viento. Las condiciones de humedad se definieron como: 1) humedad esperada en Soria en condiciones normales de verano; 2) humedades en condiciones más secas, o típicas de una región más Mediterránea. Mientras que el viento se considero proveniente del sureste (210°), con velocidades correspondientes a: 3) condiciones medias, 16 km/h; 4) vientos fuertes, 32 km/h.

4. Resultados

La modelización de las variables a nivel de rodal dio como resultado 13 modelos (Tabla 1), con coeficientes de determinación que variaron desde 0.167 para la cobertura arbustiva, hasta 0.906 en el caso de la altura dominante del rodal.

La clasificación de los tipos de combustible, para los rodales, derivó en una serie de reglas (Tabla 2), basadas en variables tales como las alturas del estrato arboreo (hL) y arbustivo (hB), las coberturas arbóreas (FCC) y arbustivas (BC), y la biomasa en copas (FB + BB). Las reglas consiguieron clasificar correctamente un discreto 39% de los combustibles, para las 431 de las parcelas del IFN3 utilizadas para generarlas. Aun así, cuando los combustibles se agruparon en función del comportamiento potencial del fuego (según que porción de los combustibles dirigen el fuego), en combustibles de pasto, combustibles de arbusto, y combustibles de árbol, el nivel de aciertos ascendió hasta un poco desdeñable 64.2%.

Tabla1. Modelos, coeficientes y estadísticos de ajuste para los modelos de variables a nivel de rodal

Variable dependiente	Modelo	Ajuste			Validación	
		R ²	RMSE	CN	R ²	RMSE
N	$181.76 + (\text{LFCC}^{2.5417}) * (\text{LH}_{95}^{-1.6616}) * (\text{LI}_{10}^{-0.1933})$	0.640	206.98	39.2	0.609	215.80
G	$(\text{LFCC}^{0.4183}) * (\text{LH}_{20}^{0.7545}) * (\text{LI}_{05}^{0.1089})$	0.809	6.89	17.5	0.796	7.05
Dq	$4.89 * (\text{LFCC}^{0.1909}) * (\text{LH}_{\text{Mean}}^{0.7997}) * (\text{LI}_{25}^{0.1702})$;	0.752	3.33	36.6	0.731	3.46
Ho	$2.96 * (\text{LH}_{90}^{0.8468}) * (\text{LI}_{95}^{-0.1070})$;	0.906	1.17	91.2	0.896	1.20
hL	$1.13 * (\text{LH}_{90}^{0.9612})$	0.900	1.17	21.5	0.892	1.19
CBH	$0.1657 * (\text{LH}_{40}^{1.3879})$;	0.563	1.72	17.6	0.542	1.77
V	$(\text{LFCC}^{0.3002}) * (\text{LH}_{\text{Mean}}^{1.6721}) * (\text{LI}_{05}^{0.1757})$	0.871	52.46	29.3	0.858	54.12
FB	$(\text{LFCC}^{0.7767}) * (\text{LH}_{40}^{0.7363}) * (\text{LI}_{\text{Mean}}^{-0.4757})$;	0.690	5.66	45.2	0.674	5.79
SB	$(\text{LFCC}^{0.6711}) * (\text{LH}_{40}^{1.1725}) * (\text{LI}_{\text{Mean}}^{-0.2296})$	0.811	25.44	48.8	0.796	26.19
BB	$(\text{LFCC}^{0.5634}) * (\text{LH}_{95}^{1.3488}) * (\text{LI}_{\text{IQ}}^{-0.8220})$	0.593	5.45	42.2	0.574	5.57
RB	$0.0583 * (\text{LFCC}^{0.9588}) * (\text{LH}_{30}^{0.9037}) * (\text{LI}_{05}^{0.1639})$;	0.864	6.55	93.6	0.852	6.74
BC	$(\text{LFCC}^{0.6288}) * (\text{LBC}^{0.3540})$	0.167	21.97	6.1	0.136	22.38
hB	$0.1732 * (\text{LFCC}^{0.3154}) * (\text{LBC}^{0.2119})$;	0.284	0.37	34.0	0.194	0.48

N: pies por ha; G: area basal; Dq: diametro cuadratico medio; Ho: altura dominante; hL: altura de Lorey; CBH: altura de base de copa; V: volume de tronco; FB: biomasa foliar; SB: biomasa de tronco; BB: biomasa foliar; RB: biomasa radicular; BC: Cobertura arbustiva; hB: altura arbustiva; LFCC: Cobertura arborea derivada de LiDAR; LBC: cobertura arbustiva derivada de LiDAR; LH_20. LH_30...: altura media de los pulsos a los percentiles 20, 30...; LH_Mean: altura media de los pulsos; LI_05. LI_10...: intensidades de los pulsos laser para los percentiles 5, 10...; LI_Mean: intensidad media de los pulsos laser; LI_IQ= rango de intensidad de entre los inter-cuartiles de los pulsos laser.

Tabla2. Descripción de los modelos de combustible estándar (Anderson, 1982), y relación con variables de rodal

Modelo	Descripción	Cobertura (%)	Altura (m)	Biomasa (t/ha)
<i>Grass and grass-dominated</i>				
1	Short grass	$(\text{FCC} + \text{BC}) < 33$	--	--
2	Timber (grass and understory)	$33 \leq (\text{FCC} + \text{BC}) < 50$	$\text{hB} < 0.4$	--
3	Tall grass	--	--	--
<i>Chaparral and shrub fields</i>				
4	Chaparral	$\text{FCC} \geq 66$ $\text{BC} \geq 33$ $\text{FCC} \geq 25$	$\text{hL} < 7$ $\text{hB} \geq 1.5$	
5	Brush	$\text{BC} \geq 30$ $(\text{FCC} + \text{BC}) > 50$ $\text{FCC} < 25$	$\text{hB} < 0.4$	
6	Dormant brush. hardwood slash	$\text{BC} \geq 30$ $(\text{FCC} + \text{BC}) > 50$	$\text{hB} < 0.4$	
7	Southern rough	$\text{FCC} \geq 25$ $\text{BC} \geq 30$	$\text{hB} \geq 0.4$ $\text{hL} \geq 7$	
<i>Timber litter</i>				
8	Closed timber litter	$\text{FCC} \geq 50$ $\text{BC} < 30$	$\text{hL} \geq 7$	$W \geq 45$
9	Hardwood litter	$\text{FCC} \geq 50$ $\text{BC} < 30$	$\text{hL} \geq 7$	$W < 45$
10	Timber (litter and understory)	--	--	--
<i>Slash</i>				
11	Light logging slash	--	--	--
12	Medium logging slash	--	--	--
13	Heavy logging slash	--	--	--

Una vez generados los modelos para predecir las variables de rodal y reglas de localización de combustible, se extrapolaron a todo el paisaje con datos LiDAR disponibles. Posteriormente, se generaron las capas necesarias para correr el sistema FlamMap. El resultado de extrapolar los modelos y correr el sistema FlamMap dio como resultado una serie de información georeferenciada sobre la ubicación de los recursos forestales, su estado, y el riesgo de fuego (Figura 2 y 3, de González-Olabarria et al; 2012).

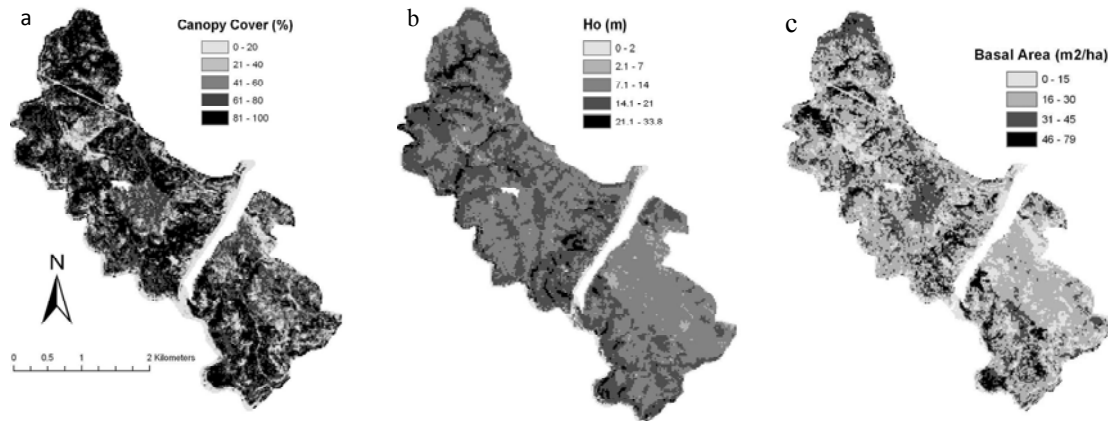


Figura 2. Estimación de variables a nivel de monte

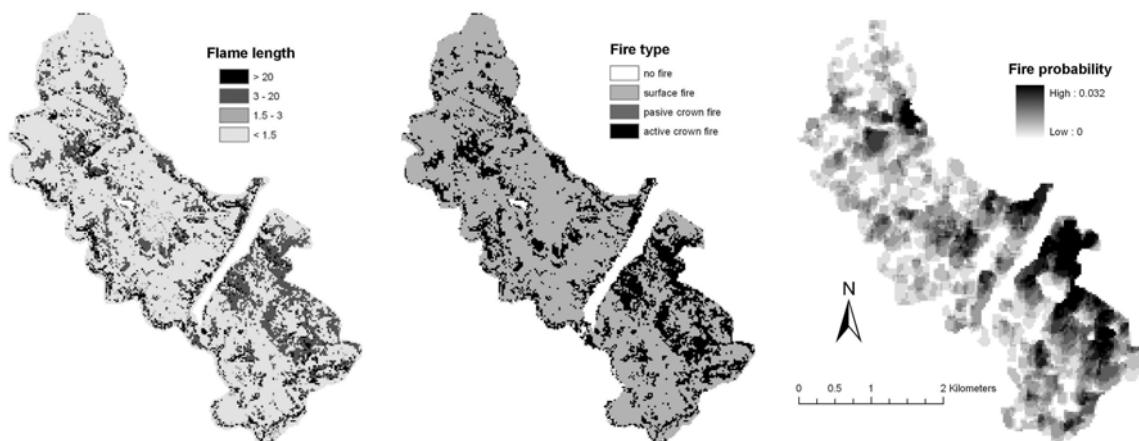


Figura 3. Comportamiento potencial del fuego, para condiciones de baja humedad de combustibles y viento fuerte.

5. Discusión

El presente estudio combina la adquisición de datos LiDAR, la modelización de variables forestales, y la simulación del comportamiento del fuego. A pesar de que el uso de datos LiDAR aéreos para el inventariado de recursos no es una nueva disciplina de estudio, sí lo es compaginarlos con variables que expliquen el comportamiento del fuego, tanto a nivel de estrato arbóreo como arbustivo. La simulación en zonas boscosas del comportamiento del fuego en base a datos LiDAR es un aspecto novedoso que permite obtener información para desarrollar planes de prevención de incendios a medio-largo plazo, integradas dentro de planes de gestión de los recursos madereros (González-Olabarria y Pukkala, 2011).

Sin embargo, el uso de LiDAR en este estudio, y sus especificidades, muestran la dificultad de modelizar variables relacionadas con el estrato arbustivo, al quedar gran parte de los pulsos laser en las copas de los arboles, lo que explica el bajo poder predictivo de los modelos de arbustos. En ese aspecto, futuros estudios deberán incluir y profundizar en la modelización del estrato arbustivo, combinando información proveniente de datos LiDAR con el conocimiento existente sobre el control que el estrato arbóreo ejerce sobre la presencia y abundancia de arbustos (Coll et al; 2011), y la acumulación de combustibles muertos (Reinhardt y Crookston, 2002).

El área estudiada carecía de datos disponibles sobre el régimen de incendios, lo que imposibilita el análisis en profundidad de las probabilidades de ocurrencia de igniciones. El uso de FlamMap compensó esta limitación, al poder simular múltiples puntos de igniciones que permiten estimar indicadores de daño para ser incluidos en la planificación de la gestión forestal (Bettinger, 2009). Futuros estudios pueden mejorar este aspecto incluyendo áreas más extensas, con datos disponibles y de mayor complejidad en cuanto al régimen de incendios. Asimismo, pueden incluir masas irregulares o con otros tipos de formaciones boscosas, a fin de encontrar aplicaciones en otras regiones.

Finalmente, la metodología implementada tiene como objetivo proporcionar un inventario espacialmente continuo de recursos forestales y su riesgo de incendio, para su aplicación en la planificación de la gestión forestal. Así pues, está especialmente orientada a generar planes de gestión a nivel operativo. En caso de planificar la gestión del monte a medio-largo plazo (o a nivel táctico) es necesario incorporar modelos de crecimiento y simular la evolución del monte en función de diferentes planes de gestión candidatos.

6. Conclusiones

El presente estudio presenta un marco metodológico que permite combinar datos de LiDAR aéreo y simuladores del comportamiento del fuego, con el fin de estimar el riesgo que el fuego supone para los recursos forestales de un monte. Obtener la información que esta metodología permite es un primer paso para la inclusión del riesgo de incendio en la planificación de la gestión forestal. Estudios anteriores, se han centrado en el calculo, mediante LiDAR de variables que expliquen el comportamiento del fuego. Pero el presente estudio combina con éxito el estrato arbóreo y arbustivo, con el fin de obtener todo el conjunto de variables necesarias para simular el comportamiento del fuego en zonas arboladas.

7. Agradecimientos

José Ramón González quiere agradecer al programa Ramón y Cajal por el apoyo económico, a EFIMED, Cesefor y a la red de bosques Modelo Mediterránea por facilitar la realización del presente estudio mediante la beca de visita científica al área de estudio. El presente estudio ha sido realizado dentro del proyecto CLAVE “Parametrización y cartografía de especies vegetales en espacios naturales de alto valor ecológico aplicando tecnologías de teledetección” cofinanciado por el Ministerio de Economía, y las empresas Agresta S. Coop. y Stereocarto S.L. Los autores también quieren agradecer el apoyo de David Lasala Sanchez y los técnicos del departamento de medio ambiente de Castilla y León.

8. Bibliografía

ANDERSEN, H.E.; MCGAUGHEY, R.J; REUTEBUCH, S.E.; 2005. Estimating forest canopy fuel parameters using LIDAR data. *Rem. Sens. Environ.* 94, 441-449.

ARROYO, L.; PASCUAL, C.; MANZANERA, J.; 2008. Fire models and methods to map fuel types: The role of remote sensing. *For. Ecol. Manage.* 256, 1239-1252.

BETTINGER, P.; 2009. A prototype method for integrating spatially-referenced wildfires into a tactical forest planning model. *Res. J. Forest.* 3, 8-22.

BETTINGER, P.; 2010. An overview of methods for incorporating wildfires into forest planning models. *Math. Comput. For. Nat. Res. Sci.* 2, 43-52.

BOYD, D.S.; DANSON, F.M.; 2005. Satellite remote sensing of forest resources: three decades of research development. *Prog. Phys. Geo.* 29, 1 1-26.

COLL, L.; GONZÁLEZ-OLABARRIA, J.R.; MOLA-YUDEGO, B.; PUKKALA, T.; MESSIER, C.; 2011. Predicting understory maximum shrubs cover using altitude and overstory basal area in different Mediterranean forest. *Eur. J. FOR. RES.* 130, 55-65.

FINNEY, M. A.; 2006. An overview of FlamMap fire modeling capabilities. In: *Fuels management—how to measure success: conference proceedings. 2006 March 28-30; Portland, Oregon. Proceedings RMRS-P-41. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station: 213-220.*

FINNEY, M.A.; SELI, R.C.; MCHUGH, C.W.; AGER, A.A.; BAHRO, B.; AGEE, J.K.; 2007. Simulation of long-term landscape-level fuel treatment effects on large wildfires. *Int. J. Wildland Fire.* 16, 712-727.

GONZÁLEZ-OLABARRIA, J.R.; PUKKALA, T.; 2011. Integrating fire risk considerations in landscape level forest planning. *For. Ecol. Manage.* 261, 278-297.

GONZALEZ-OLABARRIA, J.R.; RODRIGEZ, F.; FERNANDEZ-LANDA, A.; MOLA-YUDEGO, B.; 2012. Mapping fire risk in the Model Forest of Urbión based on airborne LiDAR measurements. *For. Ecol. Manage.* 282: 149-156

HALL, S.A.; BURKE, I.C.; BOX, D.O.; KAUFMANN, M.R.; STOKER, J.M.; 2005. Estimating stand structure using discrete-return LiDAR: an example from low density, fire prone ponderosa pine forests. *For. Ecol. Manage.* 208, 189-209.

HOLLAUS, M.; WAGNER, W.; MAIER, B.; SCHADAUER, K.; 2007. Airborne laser scanning of forest stem volume in a mountainous environment. *Sensors.* 7, 1559-1577.

HOLMGREN, J.; NILSSON, M.; OLSSON, H.; 2003. Estimation of tree height and stem volume on plots using airborne laser scanning. *For. Sci.* 49(3), 419-428.

KASS, G.V.; 1980. An exploratory technique for investigating large quantities of categorical data. *Appl. Stat.* 29, 119 - 127.

MALTAMO, M.; PACKALEN, P.; YU, X.; EERIKAINEN, K.; HYYPPA, J.; PITKANEN, J.; 2005. Identifying and quantifying structural characteristics of heterogeneous boreal forests using laser scanner data. *For. Ecol. Manage.* 216, 41-50.

MCGAUGHEY, R. J.; CARSON, W.W.; 2003. Fusing LIDAR data, photographs, and other data using 2D and 3D visualization techniques. *Proceedings of Terrain Data: Applications and Visualization—Making the Connection*, October 28–30, 2003 (pp. 16–24).

MUTLU, M.; POPESCU, C.S.; STRIPLING, C.; SPENCER, T.; 2008a. Mapping surface fuel models using LiDAR and multispectral data fusion for fire behavior. *Rem. Sens. Environ.* 112 (1), 274–285.

MUTLU, M.; POPESCU, S.C.; ZHAO, K.; 2008b. Sensitivity analysis of fire behavior modeling with LIDAR-derived surface fuel maps. *For. Ecol. Manage.* 256 (3), 289-294.

NÆSSET, E.; 2002. Predicting forest stand characteristics with airborne laser using a practical two-stage procedure and field data. *Rem. Sens. Environ.* 80, 88-99.

NÆSSET, E.; 2004. Practical large-scale forest stand inventory using a small-footprint airborne scanning laser. *Scand. J. For.Res.* 19, 164-179.

NELSON, R.F.; KRABILL, W.; TONELLI, J.; 1988. Estimating forest biomass and volume using airborne laser data. *Rem. Sens. Environ.* 24 (2), 247–267.

REINHARDT, E.; CROOKSTON, N.L., 2003. The Fire and Fuels Extension to the Forest Vegetation Simulator. *Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR- 116*. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Ogden, UT, 209 p

RIAÑO, D.; MEIER, E.; ALLGÖWER, B.; CHUVIECO, E.; USTIN, S.L.; 2003. Modeling airborne laser scanning data for the spatial generation of critical forest parameters in fire behavior modeling. *Rem. Sens. Environ.* 86, 177–186.

RIAÑO, D.; CHUVIECO, E.; CONDES, S.; GONZÁLEZ-MATESANZ, J.; USTIN, S.L.; 2004. Generation of crown bulk density for *Pinus sylvestris* L. from LiDAR. *Rem. Sens. Environ.* 92, 345–352.

RIAÑO, D.; CHUVIECO, E.; USTIN, S.L.; SALAS, F.J.; RODRÍGUEZ-PEREZ, J.R.; RIBEIRO, L.M.; VIEGAS, D.X.; MORENO, J.F.; FERNÁNDEZ, H.; 2007. Estimation of shrub height for fuel-type mapping combining airborne LiDAR and simultaneous color infrared ortho imaging. *Int. J. Wildland Fire.* 16, 341–348.

RODRÍGUEZ, F.; LIZARRALDE, I.; BROTO, M.; BRAVO, F.; 2012. Merchantable volume equations for the main species in the Spanish plateau. Manuscript.

RUIZ-PEINADO, R.; DEL RIO, M.; MONTERO, G.; 2011. New models for estimating the carbon sink capacity of Spanish softwood species. *For. Systems.* 20 (1), 176-188.