



5º CONGRESO FORESTAL
ESPAÑOL

5º Congreso Forestal Español

Montes y sociedad: Saber qué hacer.

REF.: 5CFE01-544

Editores: S.E.C.F. - Junta de Castilla y León
Ávila, 21 a 25 de septiembre de 2009
ISBN: 978-84-936854-6-1
© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Estimación de recursos forestales con tecnología LiDAR aerotransportada. Aplicación práctica en varios montes de la Provincia de Burgos

CUASANTE CORRAL, D.¹ y GARCÍA GÜEMES, C.²

¹ BLOM España. Director del Área de Ingeniería y Medio Ambiente.

² Junta de Castilla y León. Servicio Territorial de Medio Ambiente de Burgos. Jefe de la Sección Territorial de Ordenación y Mejora I

Resumen

El presente trabajo ofrece una visión de conjunto acerca de la tecnología LiDAR (Light Detection and Ranging) y su aplicación en la estimación de los recursos forestales.

Se revisa la metodología que permite realizar un inventario forestal a partir de datos capturados con este sensor aerotransportado. Esta se ha aplicado en varios montes de la provincia de Burgos, de los cuales se ha logrado estimar exitosamente parámetros forestales de importancia para la gestión forestal como son el volumen de madera (V), el área basimétrica (G), el número de pies (N), el diámetro medio cuadrático (dg) o la altura dominante (H_0).

Se realiza un análisis e interpretación de los resultados obtenidos y se enumeran las ventajas del uso de datos LiDAR respecto de los métodos de inventariación tradicionales, tanto desde el punto de vista cuantitativo como cualitativo.

Finalmente se realiza una descripción de las perspectivas de aplicación de la tecnología LiDAR en nuestro país y los retos que es necesario afrontar en el futuro para su consolidación como instrumento de captura de datos en el medio forestal.

Palabras clave

Inventario forestal, LiDAR, Teledetección, Láser.

1. Introducción

Hace más de 100 años las mediciones en las masas forestales se centraban en la determinación del volumen, del crecimiento y de la posibilidad, hasta el punto de que hubo un momento en el que los inventarios forestales pie a pie eran una práctica generalizada, lo que suponía ingentes cantidades de jornales en campo.

Desde entonces, la toma de datos en los montes se ha ampliado hasta abarcar el inventario de otros aspectos cualitativos y relacionados con el uso múltiple de los bosques, como la fauna silvestre, el uso social, el estado fitosanitario y de conservación, el riesgo de incendios, etc. Por otro lado, los entonces nuevos métodos de inventariación redujeron drásticamente la cantidad de jornadas en campo necesarias al pasar a basarse en técnicas de muestreo, en las que sólo un pequeño porcentaje de la superficie del monte se medía. Estos proporcionan unas buenas estimaciones al nivel al que se ha diseñado el inventario (monte, cuartel, estrato, etc.), pero una habitualmente deficiente aproximación a lo que ocurre a niveles inferiores al del diseño, como puede la unidad silvícola de cortas, el cantón o incluso el rodal.

Mediante el inventario forestal por teledetección que se expone en la presente comunicación se pretende dar un paso adelante, seguramente irreversible, en la modernización de la gestión forestal en cuanto a la toma de datos de los montes. Tiene las particularidades de realizar mediciones rápidas y precisas sobre la totalidad del área que se pretende inventariar, de ofrecer resultados de alta precisión en pequeñas superficies de gestión (no hay que olvidar que esto es justamente lo que demandan los gestores forestales), de arrojar datos, muchas veces cualitativos, de gran valor añadido y de no necesitar de grandes cantidades de mano de obra, uno de los factores limitantes de los inventarios en la actualidad en nuestro país.

La altimetría con LiDAR (Light Detection and Ranging), montado éste en una plataforma aérea como un avión o un helicóptero, puede determinar la distancia del sensor a un objeto en el que impacta el láser, de tal forma que la distancia es calculada como el producto de la velocidad de la luz y el tiempo que tarda ésta en viajar del sensor al objeto con el que impacta.

El uso de sensores LiDAR se desarrolló rápidamente al comienzo y mediados de los años 70, especialmente en América del Norte, con experimentos para aplicaciones batimétricas e hidrográficas. Los primeros estudios de aplicación de la tecnología LiDAR aplicados al ámbito forestal empezaron alrededor de 1980 en la Unión Soviética (SOLODUKHIN *et al.*, 1977) y en Canadá y Estados Unidos (NELSON *et al.* 1984; ALDRED & BONNOR, 1985; MACLEAN AND KRABILL, 1986), concentrándose en el uso de sensores de perfil aerotransportados para la estimación de alturas, densidades y biomasa forestal, así como para la identificación de especies de árboles. Las bases del uso de datos LiDAR aplicado a inventarios forestales se sentaron en aquella época.

A finales de los años 80 el uso del GPS hizo más precisa la georreferenciación de las medidas con láser y a principios de los 90 los sensores de perfil fueron reemplazados gradualmente por los de barrido, capaces de capturar datos en una banda de varios centenares de metros de ancho en sentido transversal al del avance del avión. El GPS se comenzó a combinar con sistemas de navegación inercial (INS), permitiendo la captura de coordenadas de los impactos reflejados. Esto supone un punto de inflexión en la historia de captura de datos en las masas forestales, ya que es el único sistema que permite la captura de datos en tres dimensiones.

En la actualidad la precisión de los sistemas LiDAR es normalmente centimétrica, pueden emitir cientos de miles de pulsos por segundo, son capaces de almacenar múltiples retornos por cada pulso emitido, ondas completas, intensidad del retorno e incluso de capturar imágenes en un mismo vuelo.

La irrupción en el sector forestal de la tecnología LiDAR implicó la modelización del terreno debajo del dosel arbóreo (KRAUS & PFEIFER, 1998), la estimación del volumen de madera y cálculos de alturas medias (NÆSSET, 1997a,b), estimación de altura y volumen pie a pie (HYYPÄ & INKINEN, 1999; BRANDTBERG, 1999), identificación de especies (BRANDTBERG *et al.*, 2003; HOLMGREN & PERSSON, 2004) o medida del crecimiento del bosque y detección de árboles cortados (YU, *et al.*, 2004). También se han realizado investigaciones acerca del estudio de la regeneración y otras propiedades biofísicas, como la calidad de la madera, la altura de copa verde, la distribución diamétrica, etc.



Los métodos fundamentales de inventario forestal con sensores láser aerotransportados se basan o bien en la evaluación de los principales parámetros forestales (volumen, área basimétrica, número de pies, diámetro medio, altura media y altura dominante) a nivel de tesela de vegetación (tipo de masa), para los que se ha demostrado que densidades de escaneo en torno a 1 punto/m² son suficientes, o bien en la estimación pie a pie de los mismos, para los cuales son necesarios al menos 5-10 puntos/m². Recientemente se están desarrollando, además, métodos resultantes de la combinación de los anteriores.

En la actualidad es posible cuantificar la cantidad de biomasa forestal, incluida la procedente de matorrales, así como el efecto de los bosques como sumideros de CO₂.

Objetivos

El objetivo de la presente comunicación es mostrar el potencial de la captura de datos con la tecnología LIDAR para su utilización en múltiples aplicaciones del sector forestal, fundamentalmente en la cuantificación de los recursos forestales.

Para ello, se realiza una aproximación a la metodología aplicada en varios proyectos piloto realizados por la empresa BLOM en la Provincia de Burgos para la Junta de Castilla y León, con el objetivo de obtener parámetros como el volumen (V), el área basimétrica (G), la densidad (N), el diámetro medio cuadrático (d_g) y la altura dominante (H_0).

2. Metodología

Área de estudio

El proyecto piloto se realizó en la provincia de Burgos, en los montes de Utilidad Pública n.º 246 “Guerreado y Abejón” (516 ha), n.º 253 “Revenga” (464 ha) y n.º 581 “El Carrascal” (266 ha), lo que supuso un total de 1.246 ha. Estos montes se encuentran ubicados en los Términos Municipales de Palacios de la Sierra, Quintanar de la Sierra y Hontoria de Valderarados, respectivamente.

Los montes de U.P. n.º 246 y 253 son pinares ordenados de pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.) monoespecífico el primero y con algo de mezcla con pino resinero (*Pinus pinaster* Ait.) el segundo, en la Sierra Alta de Pinares. El monte n.º 581 del C.U.P. es un pinar antiguamente resinado de pino resinero (*Pinus pinaster* Ait.) mezclado de forma más o menos homogénea con sabina albar (*Juniperus thurifera* L.) y encina (*Quercus ilex* subsp. *rotundifolia*). Se escogieron, por tanto, montes con condiciones muy diferentes para evaluar la idoneidad de la tecnología y el método de inventario en estos ecosistemas.

Captura de datos LiDAR

La toma de datos LiDAR se realizó por parte de la empresa BLOM el 7 de julio de 2007, para lo que se utilizó el equipo LIDAR Optech ALTM Gemini, que operaba montado en un avión modelo Piper Pa 31/350 Chieftain Navajo, ambos propiedad de la mencionada empresa. El avión voló a una altura aproximada de 1.500 m sobre el nivel del suelo, a una frecuencia de emisión de pulsos (PRF) de 70.000 Hz, una frecuencia de barrido de 44 Hz y un ángulo de escaneo (*half angle*) de 12°. Se volaron un total de 27 líneas, cada una de las cuales cubrió 529 m de ancho y se dispusieron de tal forma que el solape transversal fuera del 30% entre pasadas. La densidad final de pulsos emitidos fue de 1,24 puntos/m² y la distancia entre

los mismos de 81 cm, lo que supuso una cantidad total de 47,7 millones de medidas registradas en el área de estudio.

Los datos obtenidos con el vuelo LiDAR permiten obtener un modelo digital del terreno (MDT) de alta precisión de la zona de estudio. El MDT es el resultado de la interpolación de los puntos clasificados como suelo por el software TerraScan de Terrasolid, que posteriormente se editaron de forma manual para dotar al modelo de la máxima precisión.

El MDT es el primero de los muchos productos de valor añadido que se obtienen al realizar un inventario forestal con tecnología LiDAR, pudiendo ser utilizado para el diseño de pistas forestales, planificación de actuaciones, estudio de pendientes y orientaciones, estudios hidrológicos y de procesos erosivos, etc.

Por otro lado, a partir de los pulsos impactados en el dosel arbóreo, y de nuevo mediante interpolación, se construye un modelo digital de superficies (MDS), que representa la estructura de la vegetación objeto de estudio. Por diferencia entre ambos se puede obtener el DCM (*digital canopy model*) con las alturas relativas (alturas desde el suelo) de dicha vegetación.

Una vez procesada la información proveniente del vuelo y del sensor, se obtienen de forma directa otros resultados de aplicación marcadamente forestal, como son las alturas y la fracción de cabida cubierta (Fcc%) de la totalidad del dosel arbóreo, lo que facilita de forma considerable la elaboración de una cartografía de tipos de masa, además del estudio de la estructura de los bosques.

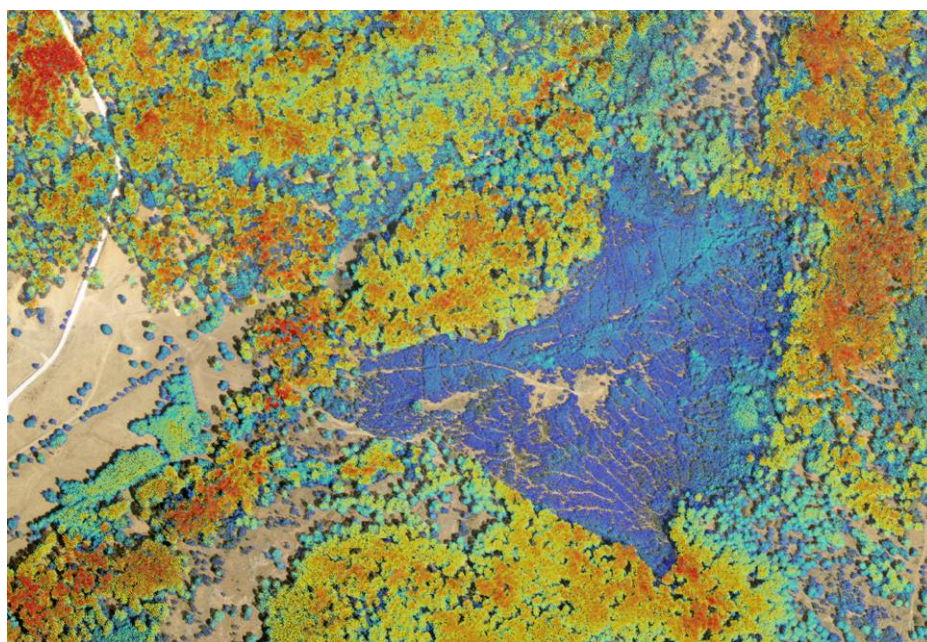


Figura 1. Mapa de alturas de la vegetación a partir de datos LiDAR, Monte de U.P. n.º 253 "Revenga" (Burgos)

Si además se conoce la edad de las masas forestales a estudiar, se puede obtener la calidad de estación de cada lugar del monte e incluso permite evaluar la calidad del material vegetativo introducido en el caso de plantaciones.

Desde otro punto de vista, estos datos reflejan en tres dimensiones la continuidad no sólo horizontal, sino también vertical del combustible forestal, información realmente útil para el análisis del riesgo o simulación de propagación de incendios forestales.

Esta información que se obtiene de forma directa se relacionará más adelante con las medidas de campo para obtener el resto de parámetros forestales deseados, esta vez de forma indirecta mediante regresiones.

Cartografía de tipos de masa y estratificación

Como en cualquier diseño de un inventario forestal, es necesario realizar una cartografía de tipos de masa y una posterior agrupación de teselas homogéneas en estratos. De esta forma, tanto la reducción de los coeficientes de variación dentro de los estratos como la posterior extrapolación de los resultados a unidades delimitadas con suficiente precisión, redunde en la mayor exactitud en el resultado del inventario. En el caso de montes escaneados con láser se dispone de la mejor información posible en la actualidad en cuanto a estados de desarrollo de las masas forestales, máxime si se tiene en cuenta que se realiza una captura de datos sobre la totalidad del área de estudio.

Esta información procedente del vuelo será una capa de información más que, junto con las ortofotografías disponibles, permitirá la elaboración de una precisa cartografía de tipos de masa. Uno de los factores que es necesario tener en cuenta en este punto es que el sensor LiDAR no es capaz, hasta la fecha, de diferenciar especies de forma fiable, si bien son muchas las investigaciones al respecto, basadas sobre todo en el análisis de la intensidad del retorno, del DCM o en la combinación de varios sensores, como en HOLMGREN & PERSSON, (2004), HOLMGREN *et al.* (2008), PERSSON, *et al.* (2004), HILL & THOMSON (2005), KOUKOULAS & BLACKBURN (2005) o SÄYNÄJOKI *et al.* (2008).

Una vez realizado un teselado preciso del área de estudio las teselas se agruparon en estratos atendiendo a factores como la especie, estado de desarrollo o calidad de estación. Así, se definieron cinco estratos objeto de cuantificación de sus parámetros forestales para el área de estudio; masas puras de *Pinus sylvestris* en estado de fustal adulto y latizal (dos estratos), formando parte de los montes n.º 246 y 253, masa pura de *Pinus pinaster* en estado de fustal adulto en el monte n.º 246, masa mixta de *Pinus sylvestris* y *Pinus pinaster* en estado de fustal adulto en el monte n.º 246 y masa mixta de *Pinus pinaster* con *Quercus ilex* ssp. *rotundifolia* y *Juniperus thurifera* en el monte n.º 581.

Toma de la muestra en campo

En cada estrato se replanteó un número determinado de parcelas circulares de 10 m de radio distribuidas de forma sistemática, en las que se midieron todos los diámetros normales de los árboles con forcípula registradora y la altura del árbol más alto de cada parcela con VERTEX. El diámetro mínimo inventariable se fijó en 10 cm. Los datos tomados se exponen en la Tabla 1.

Una vez localizado el centro de la cada parcela, dicho punto se levantó con un GPS Leica SR530 bifrecuencia, radioenlazado con una estación base de referencia, garantizando que la precisión en el levantamiento de este punto fuera centimétrica, de tal forma que las mediciones de campo estuvieran, al menos, georreferenciadas con la misma calidad que los datos LiDAR. La Q de posición de estas mediciones fue, en todos los casos, inferior a 5 cm.

Toma de datos en campo para la validación de los modelos de regresión

Para validar los modelos elaborados, en una de cada dos parcelas de campo se levantó otra concéntrica y de radio doble que la anterior (20 m). De esta forma, se dispuso de otras mediciones aparte de las que formaron parte de las regresiones.

Los valores medidos en campo correspondientes a la corona circular resultante de la sustracción de la parcela de radio menor de la de radio mayor se contrastaron con las predicciones realizadas a partir de los datos láser para esa misma superficie.

Al establecer esta metodología se asume una alta correlación entre el anillo que sirvió de contraste y la parcela que se utilizó en las regresiones, ya que el primero es una clara continuación del dosel arbóreo de la segunda. Sin embargo, se recurrió a este método para minimizar costes, ya que con un único punto GPS se definió la ubicación exacta de ambas parcelas. Por otro lado, tal y como se explica más adelante, se empleó un segundo método de validación, esta vez una validación cruzada.

En cada parcela de validación se tomaron los mismos datos que se recogieron en las parcelas que se utilizaron como muestra y con la misma metodología, a excepción de la altura dominante, que no fue tomada. En el estrato III (masa joven de *Pinus sylvestris*) no se realizaron parcelas de validación debido a que la alta densidad de arbolado (en ocasiones por encima de los 2.000 pies/ha) dificultaba en exceso el replanteo de parcelas de semejantes dimensiones.

Regresiones

Se realizó un estudio estadístico con el fin de determinar los modelos de regresión que relacionaran las variables directas medidas por el láser aerotransportado, como son las alturas y la fracción de cabida cubierta (variables explicativas), con la información recogida en campo (variables respuesta). En la elaboración de estos modelos se ha primado garantizar la capacidad predictiva del modelo, en detrimento de la obtención del valor más alto de otro tipo de indicadores como puede ser el erre cuadrado (R^2).

Se utilizaron regresiones lineales múltiples, en las que se establece una relación, a poder ser lineal, entre una de las variables respuesta y las variables explicativas. Se verificó la consistencia de los modelos garantizando que se cumplieran las hipótesis sobre la distribución de la variable respuesta, la distribución de los errores del modelo y la relación entre las variables explicativas que intervienen en el modelo.

Para validar las regresiones obtenidas se aplicaron las diferentes fórmulas sobre las parcelas de validación que previamente habían sido levantadas y medidas en campo, tal y como se expuso con anterioridad. Posteriormente se compararon los valores observados en campo con los predichos por los modelos elaborados y se estudiaron las diferencias.

Además, se realizó una validación cruzada para determinar de forma empírica la precisión de los modelos elaborados. Para cada estrato, con n parcelas, una de ellas se eliminó de la muestra cada vez, y los modelos seleccionados se ajustaron a las $n-1$ parcelas remanentes.

Tabla 1. Resumen de los datos tomados en las parcelas de campo (314,16 m²) por estratos de inventario

Estrato/Parámetro	Rango	Media
I. <i>P. sylvestris</i> fustal, buena calidad. Montes n.º 246 y 253		
Superficie (ha)		432,48
N.º de parcelas		42
Ho (m)	15,30 – 27,20	22,21
dg (cm)	19,92 – 49,64	35,51
N (pies/ha)	32 – 1.210	462
G (m ² /ha)	5,45 – 69,14	42,26
V (m ³ /ha)	58,15 – 736,43	395,51
Distribución de especies por volumen		
<i>Pinus sylvestris</i> (%)	0 - 100	89,2
<i>Pinus pinaster</i> (%)	0 - 100	10,2
<i>Quercus pyrenaica</i> (%)	0 - 6,7	0,6
II. <i>P. pinaster</i> fustal, buena calidad. Monte n.º 246		
Superficie (ha)		163,61
N.º de parcelas		42
Ho (m)	13,00 – 28,80	18,57
dg (cm)	16,49 – 44,03	31,07
N (pies/ha)	191 – 2.515	689
G (m ² /ha)	12,12 – 77,07	47,59
V (m ³ /ha)	81,42 – 559,03	326,41
Distribución de especies por volumen		
<i>Pinus sylvestris</i> (%)	0 - 95	8,4
<i>Pinus pinaster</i> (%)	5 - 100	91,6
III. <i>P. sylvestris</i> latizal, buena calidad. Montes n.º 246 y 253		
Superficie (ha)		121,56
N.º de parcelas		34
Ho (m)	9,00 – 24,10	14,02
dg (cm)	11,85 – 38,40	18,62
N (pies/ha)	95 – 2.928	1.259
G (m ² /ha)	5,51 – 83,04	33,12
V (m ³ /ha)	31,51 – 544,85	217,35
Distribución de especies por volumen		
<i>Pinus sylvestris</i> (%)	29 - 100	93,8
<i>Pinus pinaster</i> (%)	0 - 71	4,4
<i>Quercus pyrenaica</i> (%)	0 - 23	1,8
IV. Masa mixta adulta de <i>P. sylvestris</i> y <i>P. pinaster</i>. Monte n.º 246.		
Superficie (ha)		146,95
N.º de parcelas		35
Ho (m)	13,30 – 23,20	18,53
dg (cm)	17,88 – 42,04	30,88
N (pies/ha)	223 – 1.114	638
G (m ² /ha)	14,45 – 80,72	45,68
V (m ³ /ha)	122,01 – 641,10	326,60
Distribución de especies por volumen		
<i>Pinus sylvestris</i> (%)	0 - 100	24,6
<i>Pinus pinaster</i> (%)	0 - 100	75,4
V. Masa mixta <i>P. pinaster</i> con <i>J. thurifera</i> y <i>Q. ilex</i>. Monte n.º 581.		
Superficie (ha)		259,96
N.º de parcelas		44
Ho (m)	7,70 – 17,30	12,73
dg (cm)	14,88 – 37,68	25,77
N (pies/ha)	64 – 1.146	385
G (m ² /ha)	2,02 – 49,88	18,08
V (m ³ /ha)	6,70 – 274,69	78,68
Distribución de especies por volumen		
<i>Pinus pinaster</i> (%)	0 - 100	90,6
<i>Pinus nigra</i> (%)	0 - 68	4,4
<i>Quercus ilex</i> (%)	0 - 24	2,5
<i>Juniperus thurifera</i> (%)	0 - 96	2,5

Posteriormente, todos los parámetros forestales se predijeron para cada parcela eliminada. Este procedimiento se repitió hasta que todos los valores predichos se obtuvieron

para todas las parcelas eliminadas. El objetivo de esta práctica fue estudiar de nuevo las desviaciones entre los valores predichos y la realidad, esta vez teniendo en cuenta observaciones totalmente independientes, a diferencia de lo realizado con las parcelas de validación.

Una vez validadas las regresiones que sirvieron finalmente para predecir el volumen, el área basimétrica, el diámetro medio cuadrático, la densidad y la altura dominante de cada estrato, éstas se aplicaron a la totalidad del área de estudio, ya que como se expuso al principio, se realizó una captura de datos láser sobre la totalidad de los tres montes objeto del proyecto piloto. Para ello, el ámbito de estudio se dividió en celdas cuadradas con una superficie de 324 m² que se tomaron como unidades mínimas de inventario y sobre las que se aplicaron directamente los modelos estadísticos definidos.

El cálculo de los parámetros a nivel de cantón o rodal se obtienen integrando todas las celdas que contienen dichos cantones o rodales, con lo que se compensan en buena medida los errores de regresión que se puedan producir en observaciones individuales.

3. Resultados

Los resultados de los modelos lineales que relacionan los parámetros forestales que se quería estimar con los datos LiDAR tomados del dosel arbóreo se exponen en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultado de los modelos lineales obtenidos por estrato.

ESTRATO	DESCRIPCIÓN	MODELO	R ² ajustado	MEDIA	RMSE	RMSE %
I	<i>P. sylvestris</i> fustal, buena calidad	N (pies/ha)	0,5137	444,00	126,93	28,6%
		G (m ² /ha)	0,6526	42,26	8,77	20,8%
		V (m ³ /ha)	0,6570	378,74	79,61	21,0%
		dg (cm)	0,2259	35,55	4,66	21,8%
		Ho (m)	0,8017	22,16	1,22	5,5%
II	<i>P. pinaster</i> fustal, buena calidad	N (pies/ha)	0,6552	637,41	160,49	25,2%
		G (m ² /ha)	0,6609	47,58	9,01	18,9%
		V (m ³ /ha)	0,7214	316,64	53,19	16,8%
		dg (cm)	0,6191	31,07	3,27	10,5%
		Ho (m)	0,7467	18,41	1,23	6,7%
III	<i>P. sylvestris</i> latizal, buena calidad	N (pies/ha)	0,5752	1.259,20	513,91	38,3%
		G (m ² /ha)	0,8342	33,12	8,84	26,7%
		V (m ³ /ha)	0,8420	217,35	61,28	28,2%
		dg (cm)	0,7732	18,01	2,32	12,9%
		Ho (m)	0,9446	14,03	0,96	6,8%
IV	Masa mixta adulta de <i>P. sylvestris</i> y <i>P. pinaster</i>	N (pies/ha)	0,3757	638,43	217,46	34,1%
		G (m ² /ha)	0,6638	45,68	10,53	23,1%
		V (m ³ /ha)	0,7378	326,60	69,22	21,2%
		dg (cm)	0,3552	30,88	4,39	14,2%
		Ho (m)	0,7604	18,53	1,32	7,1%
V	Masa mixta <i>P. pinaster</i> con <i>J. thurifera</i> y <i>Q. ilex</i>	N (pies/ha)	0,6194	384,87	151,51	39,4%
		G (m ² /ha)	0,7353	18,08	4,78	26,4%
		V (m ³ /ha)	0,7218	78,68	24,67	31,4%
		dg (cm)	0,6556	25,77	3,69	14,3%
		Ho (m)	0,6094	12,73	1,29	10,1%

Como se puede observar en la Tabla 2, los R² ajustados varían entre 0,22 del diámetro medio cuadrático del Estrato I hasta 0,95 de la altura dominante en el estrato III, si bien como se expuso con anterioridad, en la elaboración de los modelos se ha seguido un criterio de maximización de la capacidad predictiva de los mismos en detrimento en muchas ocasiones del coeficiente R² ajustado.

El error medio cuadrático (RMSE de las regresiones) más alto siempre se ha producido para el número de pies (N), en un rango de 25-41%, mientras que los más bajos han correspondido siempre a la altura dominante (H_o), en un rango de 6–10%.

Los resultados que se desprenden de las parcelas de validación se recogen en la Tabla 3 y los correspondientes a la validación cruzada en la Tabla 4.

Tabla 3. Diferencias en los valores predichos a partir de LiDAR y las parcelas de validación.

ESTRATO	DESCRIPCIÓN	VCC	AB	N	dg
I	<i>P. sylvestris</i> fustal, buena calidad	21,49 %	21,65 %	28,07 %	12,40 %
II	<i>P. pinaster</i> fustal, buena calidad	14,93 %	13,78 %	22,87 %	8,40 %
IV	Masa mixta adulta de <i>P. sylvestris</i> y <i>P. pinaster</i>	14,45 %	14,41 %	24,04 %	9,67 %
V	Masa mixta <i>P. pinaster</i> con <i>J. thurifera</i> y <i>Q. ilex</i>	21,80 %	17,51 %	18,84 %	11,92 %

Tabla 4. Diferencias en los valores predichos a partir de LiDAR mediante validación cruzada

ESTRATO	DESCRIPCIÓN	RMSE VCC	RMSE G	RMSE N	RMSE dg	RMSE Ho
I	<i>P. sylvestris</i> fustal, buena calidad	21,68 %	25,09 %	29,55 %	23,65 %	5,79 %
II	<i>P. pinaster</i> fustal, buena calidad	17,42 %	19,39 %	26,02 %	11,14 %	7,08 %
III	<i>P. sylvestris</i> latizal, buena calidad	32,09 %	29,85 %	44,16 %	13,53 %	7,19 %
IV	Masa mixta adulta de <i>P. sylvestris</i> y <i>P. pinaster</i>	21,84 %	23,87 %	36,88 %	14,86 %	7,33 %
V	Masa mixta <i>P. pinaster</i> con <i>J. thurifera</i> y <i>Q. ilex</i>	33,32 %	27,98 %	42,36 %	14,78 %	10,46 %

Los errores recogidos en las Tablas 2, 3 y 4 aproximan a la desviación que se producirá, de media, en las celdas en las que se divide el monte, mientras que los errores a nivel de cantón o rodal serán inferiores, normalmente en torno al 5-15% para todos los parámetros.

Los RMSE obtenidos tanto en el caso de la validación mediante parcelas de campo como mediante validación cruzada siguen arrojando máximos para la densidad (N), en un rango de 19–28% para el primer caso y de 26–44% en el segundo. Una vez más, los menores valores de RMSE se dan para la altura dominante, entre el 6 y el 10% en la validación cruzada.

Otro aspecto a considerar es que modelos como los elaborados para el diámetro medio cuadrático, pese a mostrar algunos de los valores de R² más bajos en las regresiones, demuestran una alta capacidad predictiva, con un rango del 8-12% en el caso de las parcelas de validación y del 11–24% para la validación cruzada.

Los resultados expuestos en las Tablas 3 y 4 dimensionan la desviación media que se produciría para cada celda individual en que se divide el monte durante el proceso de extrapolación y sobre las que se aplican directamente las regresiones obtenidas, pero no suponen lo que ocurrirá a nivel de cantón o rodal.

A nivel de cantón o rodal los errores que se cometen oscilan entre el 5-15 % para todos los parámetros, dependiendo de la variabilidad del dosel arbóreo en cada lugar concreto.

4. Discusión

Los resultados del proyecto piloto revelan que la metodología aplicada arroja resultados precisos en los bosques estudiados, incluso, aunque de peor calidad, en los más complicados

debido a su alta variabilidad estructural, como es el monte n.º 518 de Hontoria de Valdearados.

Típicamente los mejores resultados se obtienen para el volumen, el área basimétrica y la altura dominante, debido en parte a que los árboles más grandes son los que más peso tienen en estas variables y, a su vez, los que mejor se detectan por el sensor láser.

En el presente proyecto se realizan regresiones para evaluar la altura dominante a pesar de que la altura es un parámetro que se mide de forma directa con el sensor LiDAR, como ya se ha expuesto. Sin embargo, ocurre que las medidas de alturas de los árboles con LiDAR se encuentran normalmente subestimadas, debido a la dificultad de que el impacto se produzca exactamente en el ápice de los árboles y a que el haz láser necesita un mínimo de materia sobre la que reflejar hasta registrar un retorno, por lo que es normal que se produzca una cierta penetración en la copa hasta que este hecho se produzca.

Considerando la naturaleza del método, su aplicación es idónea y los resultados de máxima calidad para los casos en los que el dosel arbóreo (sobre el que se realizan las mediciones directas) es lo más homogéneo posible; es decir, para masas monoespecíficas, coetáneas o regulares. A medida que la estructura del dosel arbóreo aumente en variabilidad, los resultados decrecerán en precisión, si bien es necesario considerar que normalmente serán mejores que los obtenidos mediante los tradicionales muestreos.

Por otro lado, es muy importante que la cartografía de tipos de masa que sirva de base al inventario sea de la mayor calidad posible, ya que deficiencias en ésta repercuten de forma negativa en los resultados finales.

A la vista de los resultados se puede afirmar que el método de inventario forestal con tecnología LiDAR aplicado es más preciso que los inventarios tradicionales por muestreo, debido fundamentalmente a su capacidad de predecir lo que ocurre en pequeñas superficies de gestión. No se puede decir lo mismo, por norma general, de los inventarios por muestreo, en los que la escasa densidad de parcelas provoca normalmente una gran falta de precisión cuando lo que se quiere estudiar son superficies más pequeñas que las que se consideraron a la hora de diseñar el inventario.

Las ventajas de un inventario forestal con LiDAR respecto de un inventario tradicional son las siguientes:

- Se realizan mediciones sobre la totalidad del área de estudio, lo que redundará en una mayor precisión en pequeñas superficies de gestión. Los errores a nivel de cantón o rodal son del 5-15 % para todos los parámetros forestales.
- Gran rapidez en la toma de datos incluso para áreas muy grandes y posibilidad de medición de áreas inaccesibles mediante métodos terrestres.
- Se genera una cartografía de tipos de masa mucho más valiosa al disponer de información del estado de desarrollo de toda la cubierta vegetal del área de estudio.
- En los inventarios forestales tradicionales es habitual tomar en cada parcela multitud de variables cualitativas de difícil interpretación posterior. Sin embargo, con LiDAR todos estos datos están capturados de forma continua para todo el ámbito de estudio, si bien se deberían completar con buenos informes selvícolas de las unidades de gestión.

- El resultado es un inventario “flexible”, que se puede explotar mediante SIG y en el que solamente realizando cálculos sobre el área deseada (área quemada por un incendio, corta, expropiación, derribos por viento, etc.) se pueden obtener las existencias maderables de esa área.
- Alto valor añadido. Se obtienen, no sólo resultados de existencias de mejor calidad, sino también un modelo digital del terreno (MDT) de alta precisión, información acerca de la continuidad horizontal y vertical del combustible, de la calidad de estación, etc.
- Se podrían realizar valiosos inventarios forestales continuos, en los que sería posible hacer comparaciones en cualquier área del bosque.
- El coste es similar al de los inventarios forestales tradicionales por muestreo.

Esta tecnología supone un gran avance en la toma de datos forestales y todo apunta a que se producirá una consolidación de la misma en este ámbito, si bien se vería facilitada por una toma de datos única, realizada por parte de las Administraciones Públicas y con vocación de uso del dato con múltiples propósitos, lo que coincide con la iniciativa INSPIRE de la Comisión Europea. Para ello será necesario definir, en una primera fase, los parámetros técnicos que cumplen este objetivo de uso múltiple de los datos (inventario forestal, áreas inundables, infraestructuras, etc.), de tal forma que se garantice su utilidad para todos los sectores de la sociedad.

El siguiente paso a seguir sería la combinación de la tecnología LiDAR con otros sensores como, por ejemplo, los escáneres multispectrales, capaces de capturar información de alta resolución para la discriminación directa de especies, con lo que se aumentaría aún más la precisión en las estimaciones cuantitativas y cualitativas de la vegetación.

5. Bibliografía

ALDRED, A.H.; BONNOR, G.M.; 1985. Application of airborne lasers to forest surveys. Information report PI-X-51, Canadian Forestry Service, Petawawa national Forestry Institute, 62 p.

BRANDTBERG, T.; 1999. Automatic individual tree-based analysis of high spatial resolution remotely sensed data. PhD thesis, *Acta Universitatis. Agriculturae Sueciae, Silvestria* 118, Swedish University of Agricultural Sciences. 47 p. Uppsala, Sweden.

BRANDTBERG, T.; WARNER, T.; LANDENBERGER, R.; MCGRAW, J.; 2003. Detection and analysis of individual leaf-off tree crowns in small footprint, high sampling density LiDAR data from the Eastern deciduous forest in North America. *Remote Sensing of Environment* 85: 290-303.

HILL, R. A.; THOMSON, A. G.; 2005. Mapping woodland species composition and structure using airborne spectral and LiDAR data. *International Journal of Remote Sensing*, 26: 3763-3779.

HOLMGREN, J.; PERSSON, Å; 2004. Identifying species of individual trees using airborne laser scanning. *Remote Sensing of Environment* 90: 415-423.

- HOLMGREN, J.; PERSSON, Å; SÖDERMAN, U.; 2008. Species identification of individual trees by combining high resolution LiDAR data with multi-spectral images Source. *International Journal of Remote Sensing* 29: 1537-1552
- HYYPPÄ, J.; INKINEN, M.; 1999. Detecting and estimating attributes for single trees using laser scanner. *The Photogrammetric Journal of Finland*, 16: 27-42.
- KRAUS, K.; PFEIFER, N.; 1998. Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 53: 193-203.
- KOUKOULAS, S.; BLACKBURN, G. A.; 2005. Mapping individual tree location, height and species in broadleaved deciduous forest using airborne LIDAR and multi-spectral remotely sensed data. *International Journal of Remote Sensing*, 26: 431-455.
- MACLEAN, G.; KRABILL, W.; 1986. Derivations of stand heights from airborne laser scanner data with canopy-based quantile estimators. *Canadian Journal of Forest Research* 28: 1106-1031
- NÆSSET, E.; 1997a. Determination of mean tree height of forest stands using airborne laser scanning data . *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 52: 49-56.
- NÆSSET, E.; 1997b. Estimating timber volume of forest stands using airborne laser scanner data. *Remote sensing of Environment* 61: 246-253.
- NELSON, R.; KRABILL, W.; MACLEAN, G.; 1984. Determining forest canopy characteristics using airborne laser data. *Remote sensing of Environment* 60: 201-212
- NELSON, R; ODERWALD, R.; GREGOIRE, G.; 1997. Separating the ground and airborne laser sampling phases to estimate tropical forest basal area, volume and biomass. *Remote Sens. Environ.* 60: 311-326
- PERSSON, Å.; HOLMGREN, J.; SÖDERMAN, U.; OLSSON, H.; 2004. Tree species classification of individual trees in Sweden by combining high resolution laser data with high resolution near-infrared digital images. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, 36: 204-207.
- SÄYNÄJOKI R.; PACKALÉN P.; MALTAMO M.; VEHMAS M.; EERIKÄINEN K.; 2008. Detection of Aspens Using High Resolution Aerial Laser Scanning Data and Digital Aerial Images. *Sensors*. 8: 5037-5054.
- SOLODUKHIN, V.; ZUKOV, A.; MAZUGIN, I.; 1977. Possibilities of laser aerial photography for forest profiling. *Lesnoe Khozyaisto* 10: 53-58
- YU, X.; HYYPPÄ, J.; KAARTINEN, H.; MALTAMO, M.; 2004. Automatic detection of harvested trees and determination of forest growth using airborne laser scanning. *Remote Sensing of Environment* 90: 451- 462.

