



7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

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

26 - 30 junio 2017 | Plasencia
Cáceres, Extremadura

7CFE01-109

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

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Comparativa entre inventario forestal por muestreo e inventario LiDAR de baja resolución en dos montes de utilidad pública de Extremadura

JURADO-VARELA, A.¹, GUERRA-HERNÁNDEZ, J.²

¹ Sociedad de Gestión Pública de Extremadura (GPEX), Área del Medio Natural. C/ Benito Arias Montano, 1. Escalera 2, Planta 4. 06800 Mérida, (Badajoz).

² Forest Research Centre, School of Agriculture, University of Lisbon, Departamento de Recursos Naturais, Ambiente e Território Tapada da Ajuda, 1349-017 Lisboa, Portugal.

Resumen

Este trabajo tiene por objeto comparar los resultados obtenidos entre el inventario forestal por muestreo y el inventario basado en tecnología LiDAR (Light Detection and Ranging) para las variables volumen con corteza y área basimétrica en las masas de pinar (pino piñonero y pino negral) de dos montes de utilidad pública de Extremadura: Tudía y sus Faldas (750 has.) y Ventosillas (5775 has.). El inventario a nivel de masa se realizó mediante la aplicación de modelos predictivos obtenidos mediante el tratamiento y el análisis estadístico de los datos LiDAR de baja densidad (0,5 primeros retornos m²), procedentes del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA). Los resultados obtenidos muestran una gran verosimilitud entre los resultados obtenidos del inventario por muestreo y del inventario LiDAR a nivel de monte y de estrato con una diferencia a nivel de monte entre ambos inventarios inferior a un 4 % para la variable volumen e inferior a un 7% para la variable área basimétrica. El estudio confirma la utilidad de los modelos predictivos utilizados y su aplicación a otros montes de Extremadura con la consecuente reducción de los elevados costes de los inventarios por muestreo.

Palabras clave

Láser escáner aerotransportado, modelización forestal, teledetección

1. Introducción

La gestión forestal sostenible conlleva como paso previo a la toma de decisiones conocer las existencias de los montes mediante inventarios forestales, los cuáles determinarán y condicionarán los objetivos de la futura planificación forestal (GONZALEZ-MOLINA et al., 2006). Por una parte, los inventarios forestales por muestreo están basados en la toma de datos de campo mediante muestreos sistemáticos o aleatorios de parcelas de campo con los que se obtienen los valores medios y sus correspondientes errores estadísticos de las distintas variables dasométricas que definen la masa forestal, referidas a las unidades mínimas inventariables y unidades básicas de gestión ya sean rodales o cantones.

Este tipo de inventarios por muestreo tienen la desventaja que en el caso de superficies forestales muy extensas serían necesarias un elevado número de parcelas de muestreo y un trabajo de campo muy intenso para recoger toda la variabilidad del monte (LOVELL et al., 2005) y obtener resultados fidedignos con la realidad y errores de muestreo asumibles, con el consecuente elevado coste económico asociado (HALL et al., 2005), por lo que el inventario forestal por muestreo puede que no sea idóneo en masas forestales de gran extensión (GONZÁLEZ-FERREIRO, E., et al., 2014).

Por otra parte y para solventar esta limitación, la aplicación de la tecnología del láser escáner aerotransportado (ALS "Airbone Laser Scanning" también denominado como LiDAR

(Light Detection and Ranging) a los inventarios forestales ha sido desarrollada paulatinamente desde los años 90 (NEASSET., 1997) hasta la fecha, y ha sido reconocida como una herramienta muy efectiva y de gran utilidad para estimar -entre otros aspectos- la distribución espacial de los recursos forestales (LIM et al., 2003 & MALTAMO et al., 2014) con la ventaja añadida de la reducción de los costes de inventario (ORTUÑO PÉREZ, S. et al. 2003, GONZALEZ-FERREIRO et al., 2014) al reducirse el número de parcelas de muestreo necesarias (ANDERSEN & BREIDENBACH 2007, MAURO et al., 2012.) y la posibilidad de elaborar una cartografía con un nivel de detalle mucho mayor en comparación con la obtenida de los inventarios forestales por muestreo. (FERNANDEZ-LANDA y RODRIGUEZ-PUERTA, 2013, TOME-MORAN et al., 2013, GUERRA-HERNÁNDEZ et al., 2015,2016).

En España, diferentes trabajos de investigación han permitido el desarrollo de modelos LiDAR a nivel de masa para estimar las variables dasométricas y de biomasa para un amplio rango de formaciones forestales. En clima atlántico, se han obtenido modelos para las especies de *Pinus radiata* D. Don (GONZALEZ-FERREIRO et al., 2012) y *Eucalytus globulus* Labill. (GONÇALVES-SECO et al, 2011; GONZALEZ-FERREIRO et al., 2013) en Galicia. En clima Mediterráneo, se han desarrollado modelos para las principales fracciones de biomasa para especies como *Pinus nigra* Arn., *Juniperus thurifera* L., y *Quercus ilex* L. (GARCÍA et al. 2010) en el centro de España. También en ambientes Mediterráneos usando datos LiDAR del PNOA encontramos estudios más recientes, con modelos aplicables a masas puras y mixtas de *Pinus pinea* L., *Pinus pinaster* Ait., y *Quercus pyrenaica* Will. en Extremadura (GUERRA-HERNÁNDEZ et al., 2015,2016) o para *Pinus pinaster* Ait (RUIZ et al., 2014) y *Pinus halepensis* Miller. (MONTALEGRE et al., 2016) en Valencia y Aragón, respectivamente.

La Administración Forestal de Extremadura comenzó a probar la utilidad de los modelos LiDAR desarrollados para Extremadura (GUERRA-HERNÁNDEZ et al., 2015, 2016) para las masas de pino piñonero y pino negral y a constatar que los inventarios forestales basados en tecnología LiDAR pueden suponer una alternativa válida para la caracterización de las existencias de las masas forestales, con la ventaja añadida de la reducción de los costes de los inventarios forestales por muestreo. De hecho, el Servicio de Ordenación y Gestión Forestal de la Junta de Extremadura está aplicando actualmente el inventario asistido mediante la tecnología LiDAR en licitaciones de proyectos y planes técnicos de ordenación de montes.

2. Objetivos

El objetivo de este trabajo consistió en comparar los resultados obtenidos en los inventarios forestales por muestreo llevados a cabo por el Servicio de Ordenación y Gestión Forestal de la Junta de Extremadura y los obtenidos en los inventarios forestales asistidos por LiDAR aplicando los modelos predictivos desarrollados por GUERRA-HERNÁNDEZ et al., 2015. Las variables comparadas entre ambos inventarios han sido el volumen con corteza y el área basimétrica a nivel de monte y estrato para las masas de pinar, ya se trate de masas puras o mixtas de pinar de pino piñonero (*P. pinea* L.), o de masas puras de pino negral (*P. pinaster*) en los montes de Utilidad Pública *Tudía* y *sus Faldas* (750 has.) y *Ventosasillas* (5775 has.).

3. Metodología

En los años 2007 y 2009 el Servicio de Ordenación y Gestión Forestal de la Junta de Extremadura licitó la ordenación de los montes de utilidad pública MUP 146-CC *Ventosasillas* de 5863 has. situado en los TT.MM de Alía y Villar del Pedroso (Cáceres), y el MUP-1 BA *Tudía* y *sus Faldas* de 750 has. situado en el T.M de Calera de León (Badajoz). Los inventarios forestales basados en parcelas de muestreo tomadas en campo se llevaron a cabo en los años 2008 y 2010, respectivamente. Para el inventario forestal del monte “Ventosasillas” se establecieron en

total 1537 parcelas circulares, con un lado de malla de 150 metros para las masas de pinar y una superficie por parcela de 201 m² y 380 m². En cambio en el monte Tudía y sus Faldas se establecieron 191 parcelas circulares de inventario con una superficie de 380 m² cada una, con un lado de malla de 200 metros masas puras de pino piñonero y 150 m para el resto de los estratos.

Los datos LIDAR procedentes del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) promovido por el Ministerio de Fomento (Dirección General del Instituto Geográfico Nacional, IGN, y el Centro Nacional de Información Geográfica, CNIG), fueron tomados en Extremadura entre Julio y Agosto de 2010, fecha que coincide con la del inventario del monte “Tudía y sus Faldas” y dos años posterior al del inventario realizado del monte “Ventosillas” (realizado en 2008).

Guerra-Hernández et al., 2015,2016 desarrolló modelos robustos y simples con un máximo de tres variables independientes, para estimar las distintas variables dasométricas a nivel de masa (volumen, área basimétrica, altura de Lorey) y fracciones de biomasa para masas puras de pino negral (*P. pinaster*, masas puras y mixtas de pino piñonero (*P. pinea*) y masas puras de rebollo (*Q. pyrenaica*), a partir del inventario forestal por muestreo realizado en el monte Tudía y sus Faldas y los estadísticos de la distribución de alturas de la nube de puntos LiDAR obtenidos de las imágenes del PNOA. El modelo aplicado tuvo la siguiente expresión:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon \quad (3)$$

Donde Y es la variable de masa a estimar, $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$, parámetros del modelo y X_1, X_2, \dots, X_n son los estadísticos procedentes de la nube de puntos LiDAR (más detalles de la descripción de los estadísticos de la distribución de alturas la nube de puntos pueden consultar en la tabla 2 (GUERRA-HERNÁNDEZ et al., 2015).

Tabla 1: Resumen de los modelos Lidar aplicados en este estudio para las variables de masa, estadísticos de bondad del ajuste y resultados de los errores estimados a nivel de parcela desarrollados por GUERRA-HERNÁNDEZ et al., 2015 para masas de puras y mixtas de *P.pinea*, y masas puras de *P. pinaster*. G (m²/ha): Área basimétrica ; V (m³/ha):Volumen con corteza. h_{10} : Altura percentil 10; h_{50} : Altura percentil 50 ; ARAM: Todos retornos encima de la media; TFR: Total primeros retornos; h_{mean} : Altura media; CRR: ((altura media - altura min) / (altura max - altura min)); PARA2: Porcentaje de todos los retornos por encima de 2 metros; h_{kurt} : Kurtosis; LFCC: Porcentaje de primeros retornos por encima de 2 metros; h_{IQ} : Distancia intercuartil; ARAMO: Todos retornos encima de la moda ; R^2_{adj} : coeficiente de determinación ajustado; rRMSE(%):error medio cuadrático relativo

Masas puras de <i>P.pinea</i>				
Variable dependiente	Variable independiente	Parámetros	R ² adj	rRMSE(%)
G	h_{10} , ARAM/TFR	β_0 : -1,37539 β_1 : 1,20412 β_2 : 0,26586	0,67	26,25
V	h_{mean} , CRR, PARA2	β_0 :-62,91283 β_1 : 7,41690 β_2 : 61,78661 β_3 : 0,72387	0,74	26,5



Masas mixtas de <i>P.pinea</i>				
Variable dependiente	Variable independiente	Parámetros	R²adj	rRMSE(%)
G	$h_{10}, h_{kurt}, LFCC$	$\beta_0: -3,96641$ $\beta_1: 3,25229$ $\beta_2: -2,89818$ $\beta_3: 0,18395$	0,71	36,47
V	$h_{10}, h_{10}, LFCC$	$\beta_0: -66,4839$ $\beta_1: 13,5049$ $\beta_2: 9,2327$ $\beta_3: 0,6741$	0,69	42,05
Masas puras de <i>P. pinaster</i>				
Variable dependiente	Variable independiente	Parámetros	R²adj	rRMSE(%)
G	$h_{kurt}, ARAM/TFR,$ $ARAMO/TFR$	$\beta_0: -11,4426$ $\beta_1: 0,9798$ $\beta_2: 1,0283$ $\beta_3: -0,2395$	0,88	21,42
V	$h_{50}, h_{kurt}, PARA2$	$\beta_0: -167,0034$ $\beta_1: 14,7454$ $\beta_2: 3,6568$ $\beta_3: 2,8008$	0,88	21,49

La proximidad entre las fechas de los inventarios forestales por muestreo realizados en los montes Tudía y sus Faldas (2010) y Ventosillas (2008) y la fecha del vuelo en el que se obtuvieron los datos LiDAR del PNOA (2010), junto con que no hubo grandes perturbaciones como incendios forestales en los montes considerados entre ambas fechas nos permitieron comparar los resultados de las existencias obtenidos en los inventarios forestales de los proyectos de ordenación de montes con los resultados obtenidos tras la aplicación de los modelos predictivos de GUERRA-HERNÁNDEZ et al, 2015 reflejados en la tabla 1 basados en los datos LiDAR de baja densidad del PNOA,

La obtención de estadísticos de la nube de puntos LiDAR del PNOA de los montes de utilidad pública Ventosillas y Tudía y sus Faldas se realizó mediante el programa FUSION LIDAR Toolkit (McGaughey, 2009) en los pasos que se describen a continuación. En primer lugar, se obtuvo el modelo digital del terreno (MDT) con un tamaño de celda de un metro obteniendo los primeros retornos de los pulsos de la superficie del suelo mediante la herramientas *Groundfilter* y

filtrando e interpolando la nube de puntos LiDAR calculando una altura media de todos los puntos dentro de cada celda o interpolando los datos de altura de las celdas vecinas mediante la herramienta *Gridsurfacecreate*. Posteriormente, mediante la herramienta *Gridmetrics* se obtuvieron 36 variables estadísticas LiDAR (medias, varianza, percentiles...etc,) organizadas espacialmente en una cuadrícula de 20 x 20 metros utilizando umbrales de altura de 2 metros en la extracción de los estadísticos LiDAR en el comando *Gridmetrics*.

La comparación de los inventarios por muestreo con el inventario LiDAR se realizó de distinta forma para cada uno de los dos montes objeto de este trabajo, dependiendo de la fecha en el que se realizó el inventario por muestreo:

1. Monte Tudía y sus Faldas

En el caso del monte *Tudía y sus Faldas* el inventario por muestreo coincide con la fecha del vuelo LiDAR del PNOA (año 2010), y por esta razón los resultados obtenidos a nivel de monte una vez aplicado los modelos predictivos LiDAR son directamente comparables con los obtenidos en el inventario por muestreo. En este monte se compararon las existencias de volumen y el área basimétrica entre ambos inventarios para masas puras de *P.pinaster*, masas puras de *P.pinea* y masas mixtas de *P.pinea* y *P.pinaster*.

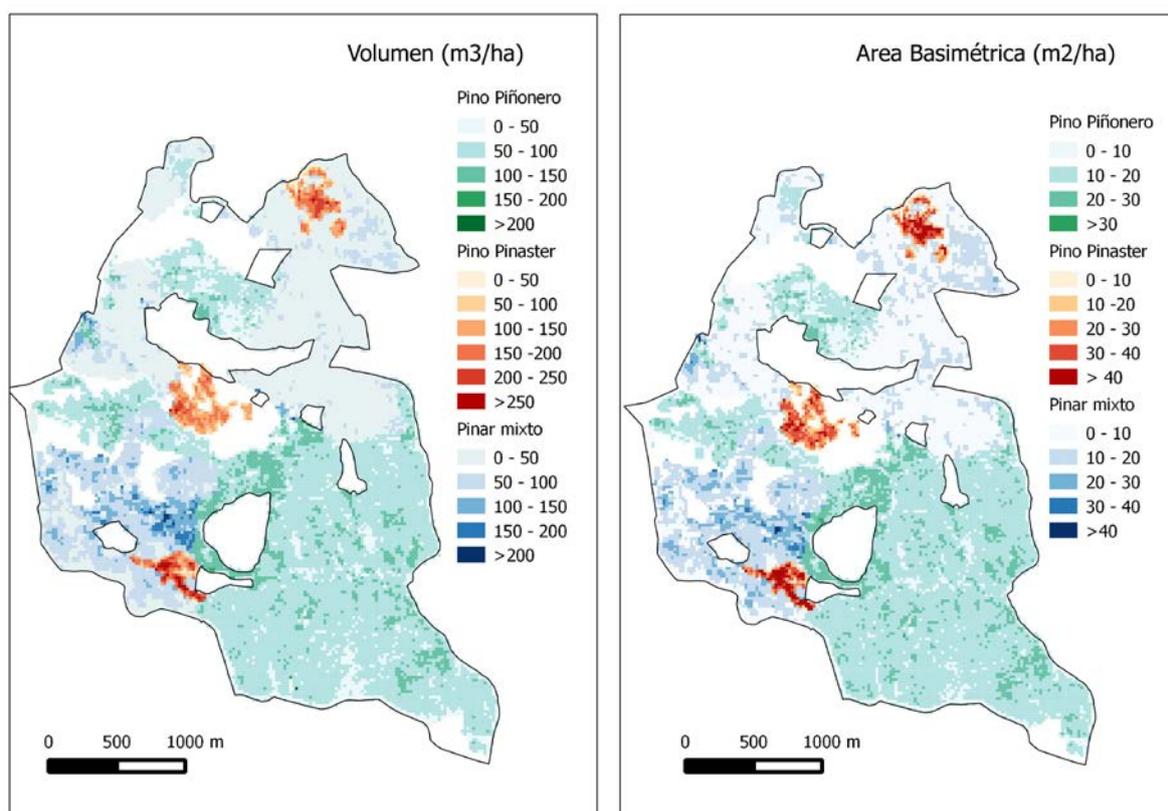


Figura 1. Estimación de volumen y área basimétrica de masas puras de *P.pinaster*, masas puras de *P.pinea* y masas mixtas de *P.pinea* y *P.pinaster* en el monte *Tudía y sus Faldas* referido al año 2010 mediante aplicación de los modelos LiDAR (GUERRA-HERNÁNDEZ et al., 2015)

2. Monte Ventosillas

El inventario por muestreo basado en parcelas de muestreo realizado en el monte Ventosillas se llevó a cabo en el año 2008, dos años antes del vuelo LiDAR del PNOA, por lo que la comparación entre ambos inventarios precisó que se tuviera en cuenta el crecimiento de las masas forestales durante el periodo (2008-2010). El crecimiento considerado para realizar la comparativa de inventarios en el monte Ventosillas ha sido calculado a partir de la tabla 945 denominada “Cambios por estrato, especie y unidad de superficie de Volumen entre IFN2 e IFN3” para la provincia de Cáceres y para la especie de *P. pinaster*. del Tercer Inventario Forestal Nacional (IFN3). La metodología para obtener el crecimiento anual en volumen con corteza para las masas de *Pinus pinaster* Ait. de clase natural de edad latizal-fustal (estrato predominante en el monte Ventosillas) en función de la fracción de cabida cubierta (Tabla 2) ha sido sumar al crecimiento neto para uno de los 3 estratos definidos (Vcc IFN3 - Vcc IFN2) el volumen de las cortas y árboles caídos (C+) suponiendo que se cortaron o murieron a mitad del periodo entre el IFN2 e IFN3 (5,5 años), y todo ello dividido entre el número total de años transcurridos entre el IFN2 e IFN3 (11 años).

$$\text{Crecimiento anual volumen (m}^3\text{/ha)} = \frac{(\text{Vcc IFN3} - \text{Vcc IFN2}) + \text{C}^+}{11 \text{ años}}$$

Tabla 2: Incremento anual de volumen por hectárea (V) para masa de *Pinus Pinaster* Ait, de clase natural de edad Latizal-Fustal para la provincia de Cáceres en función de la fracción de cabida cubierta (FCC).

Estrato	Especie	Estado De Masa	FCC (%)	Neto (m ³ /ha) (Vcc IFN3- Vcc IFN2)	C+ (m ³ /ha)	Incremento anual volumen (m ³ /ha)
1	<i>P. pinaster</i>	Fustal, Latizal	70 - 100	54,60	21,91	6,95
2	<i>P. pinaster</i>	Fustal, Latizal	40 - 69	22,48	16,96	3,58
3	<i>P. pinaster</i>	Fustal, Latizal	20 - 39	-0,44	14,89	1,31

De la misma forma se procedió para obtener el crecimiento de área basimétrica, una vez conocido el crecimiento neto para cada uno de los tres estratos (G IFN3 - G IFN2) y el área basimétrica de las cortas y árboles caídos (C+)

$$\text{Crecimiento anual área basimétrica (m}^2\text{/ha)} = \frac{(\text{G IFN3} - \text{G IFN2}) + \text{C}^+}{11 \text{ años}}$$

Tabla 3: Incremento anual de área basimétrica (G) por hectárea para masa de *P. Pinaster*, de clase natural de edad Latizal-Fustal para la provincia de Cáceres en función de la fracción de cabida cubierta (FCC).

Estrato	Especie	Estado De Masa	FCC (%)	Neto (m ² /ha) (G IFN3-G IFN2)	C+ (m ³ /ha)	Incremento anual área basimétrica (m ² /ha)
1	<i>P. pinaster</i>	Fustal, Latizal	70 - 100	10,72	2,74	1,22
2	<i>P. pinaster</i>	Fustal, Latizal	40 - 69	6,03	2,21	0,75
3	<i>P. pinaster</i>	Fustal, Latizal	20 - 39	2,03	1,87	0,35

Una vez conocido el crecimiento anual del volumen con corteza y el área basimétrica en función de la fracción de cabida cubierta (Tablas 2 y 3), y una vez aplicado el modelo LiDAR para todo el monte y organizado en cuadrículas de 20 x 20 metros se procedió a simular el decrecimiento de las masas de pino negral de 2010 (año del vuelo LiDAR) a 2008 (año del inventario por muestreo). Esta simulación se realizó en cada una de las cuadrículas restando los valores de volumen con corteza y área basimétrica obtenidos en los modelos LiDAR el crecimiento correspondiente a dos años de duración (2008-2010) (Tablas 2 y 3) para cada uno de los intervalos de valores de fracción de cabida cubierta (LFCC) definidos (20% - 39 %, 40% - 69%, 70% - 100%), la cual fue previamente obtenida mediante la herramienta *Gridmetrics* del programa FUSION LIDAR Toolkit (McGaughey, 2009) para cada una de las cuadrículas de 20 x 20 metros.



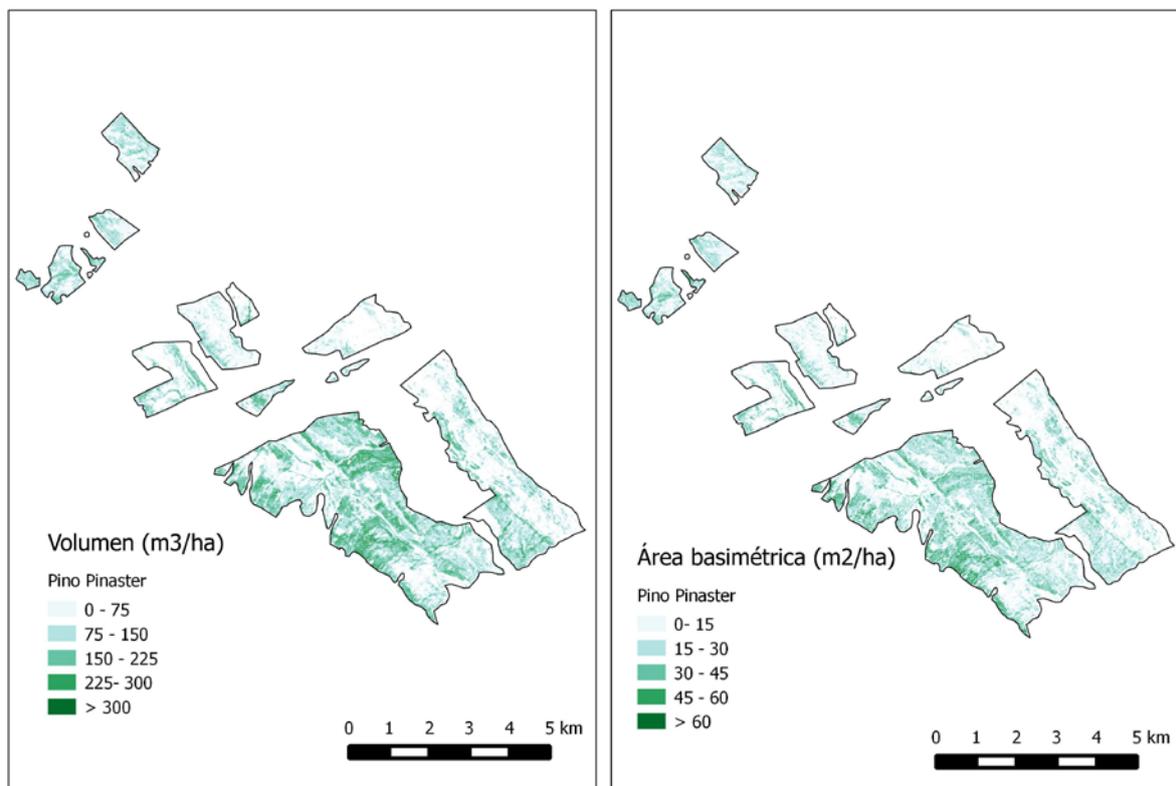


Figura 2. Estimación de volumen y área basimétrica de *P.Pinaster* en el monte Ventosillas actualizado al año 2008 mediante aplicación de los modelos predictivos LiDAR desarrollados por GUERRA-HERNÁNDEZ et al, 2015 y considerando del crecimiento de las masas de 2008 a 2010.

Finalmente se procedió a comparar los resultados obtenidos a nivel de monte y cuartel con respecto a los obtenidos en los inventarios forestales por muestreo basados en parcelas de muestreo.

4. Resultados

Los resultados obtenidos muestran una gran verosimilitud entre los resultados obtenidos para las variables volumen con corteza y área basimétrica entre el inventario forestal por muestreo y el inventario asistido por LiDAR para los dos montes considerados.

4.1 Monte Ventosillas

En el monte Ventosillas la diferencia entre el inventario LiDAR y el inventario por muestreo a nivel de monte para la especie de pino predominante (*Pinus pinaster* Ait.) resultó ser de un 0,43% para la variable volumen con corteza y de un 6,41% para la variable área basimétrica, oscilando estos porcentajes según el cuartel de inventario definido en el proyecto de ordenación, tal como se resume en la tabla 4. Comparando los resultados a nivel de estrato de *P.pinaster* la diferencia entre ambos inventarios para variable volumen en las masas puras de *P.pinaster* fue inferior al 13,23 % en la mayoría de los cuarteles excepto en el cuartel C donde encontramos una diferencia sobrestimada del 31,60% con el inventario de campo. Para la variable de área basimétrica la diferencia de ambos resultados fue inferior al 22,30%, excepto en el cuartel C (28,3%), tal como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 4. Resultados obtenidos y diferencia porcentual entre el inventario forestal por muestreo y el inventario LiDAR tras la aplicación del modelo para *P. pinaster* (Guerra-Hernández et al., 2015) y considerando del crecimiento de las masas de 2008 a 2010, para la variable volumen con corteza (V) y área basimétrica (G) para el estrato *P. pinaster* y a nivel de monte en el monte Ventosillas

MONTE VENTOSILLAS		Volumen con corteza			Área basimétrica		
Cuarteles inventario	Superficie <i>P. pinaster</i> (has)	V inventario por muestreo (2008) (m ³)	V LiDAR 2010 actualizado a 2008 (m ³)	% Diferencia V Inv por muestreo - Inv, LiDAR	G inventario por muestreo (2008) (m ²)	G LiDAR 2010 actualizado a 2008 (m ²)	% Diferencia G Inv por muestreo - Inv. LiDAR
Cuartel A	275,44	24163,56	22690,25	6,49 %	4023,7	3567,59	11,33 %
Cuartel B	435,25	21627,62	19099,81	13,23 %	3495,03	3112,65	10,94 %
Cuartel C	240,15	10039,36	7628,68	31,60 %	1679,85	1204,16	28,31 %
Cuartel F	748,02	44769,97	43428,79	2,99 %	7598,27	6447,86	15,14 %
Cuartel H	1316,43	138168,5	145942,65	5,33 %	22158,64	21941,34	0,98 %
Cuartel I	22,87	3189,47	3273,08	2,55 %	530,29	682,46	22,30 %
Total monte	3038,17	243093,6	242063,26	0,43 %	39485,78	36956,06	6,41 %

4.2 Monte Tudía y sus Faldas

En el monte Tudía y sus Faldas se estudió la diferencia entre ambos inventarios para la variable volumen con corteza y área basimétrica por monte y por estratos, definidos según la especie de pino (*P. Pinaster*, o *P. pinea*) y de la forma de distribución de las masas (masas puras o mixtas). A nivel de monte la diferencia para la variable volumen fue de un 3,68%, y de un 2,33% en el caso del área basimétrica. Comparando los resultados a nivel de estratos la diferencia entre ambos inventarios para variable volumen en las masas puras de *P.pinea* y *P.pinaster* fue inferior al 10 %, y entorno al 15% en masas mixtas de pinar. Para la variable de área basimétrica la diferencia de ambos resultados fue inferior al 16% dependiendo del tipo de estrato tal como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 4. Resultados obtenidos y diferencia porcentual entre el inventario forestal por muestreo y el inventario LiDAR, para la variable volumen con corteza (V) y área basimétrica (G) por estrato.

MONTE TUDIA Y SUS FALDAS		Volumen con corteza			Área basimétrica		
Estratos	Superficie (has)	V inventario por muestreo 2010 (m3)	V LiDAR 2010 (m3)	% Diferencia V Inv por muestreo - Inv, LiDAR	G inventario por muestreo (m2/ha)	G LiDAR (m2/ha)	% Diferencia G Inv por muestreo - Inv, LiDAR
<i>P. pinaster</i> en masas puras	32,44	4135,08	4442,57	6,92%	29,41	28,05	4,63%
<i>P. pinea</i> en masas puras	408,67	28017,02	30814,7	9,07%	17,85	14,86	16,75%
Masa mixta <i>P. pinea</i> y <i>P. pinaster</i>	248,05	7010,28	8299,36	15,53%	17,67	15,37	13,01%
Total monte masas pinar	689,16	41951,22	43556,67	3,68%	12,44	12,15	2,33%

5. Discusión

El estudio confirma la utilidad de los modelos predictivos LiDAR utilizados y su aplicación a otros montes de Extremadura. Otros autores HUMMEL, S et al. 2011 concluyeron al igual que en este estudio que los resultados de los inventarios asistidos por LiDAR son similares a los obtenidos con los inventarios por muestreo, sin encontrar una diferencia significativa entre ambos tipos de inventario, la cual resultó ser inferior a un 25% para la variable área basimétrica para la mayoría de las parcelas de inventario consideradas. Sin embargo hay que tener en cuenta que HUMMEL, S et al. 2011 comparó los resultados a nivel de parcela de muestreo mientras que en este trabajo se compararon los resultados globales a nivel de monte y por estrato.

Los resultados obtenidos muestran una gran verosimilitud entre los resultados obtenidos entre el inventario por muestreo y el inventario asistido por LiDAR, especialmente en el caso de la variable volumen en masas de *Pinus pinaster* Ait. en el monte Ventosillas, donde la diferencia fue solo de un 0,43 % a nivel de monte. La diferencia entre los resultados de inventario a nivel de monte entre los dos casos en estudio se pudo deber principalmente a dos razones: 1) La complejidad orográfica del monte "Tudia y sus Faldas", al poder afectar la topografía a la precisión en las estimativas de las existencias del inventario asistido por LiDAR (ESTORNELL et al., 2011). 2) Ventosillas está caracterizado por grandes superficies continuas de masas monoespecíficas de pinar de *Pinus pinaster* Ait. (3038,17 has.) con menor complejidad estructural de la vegetación que en "Tudia y sus Faldas" donde las masas de pinares son más complejas estructuralmente por la presencia de otras especies diferentes a la especie principal que caracteriza cada estrato en el proyecto de ordenación, los cual también se ha demostrado

que podría afectar a la precisión en las predicciones de los modelos LiDAR (ESTORNELL et al., 2011; VALBUENA et al., 2011).

En el caso de la diferencia de más del 30% en las existencias de volumen para *P. pinaster* del cuartel C del monte “Ventosillas”, verificamos que la diferencia podría estar debida al aplicar los modelos de *P. pinaster* en un cuartel con varios cantones que presentan teselas de vegetación con mayor variabilidad y complejidad estructural de la vegetación (alta presencia de matorral, repoblaciones jóvenes.....etc). Estas teselas dentro de los cantones fueron considerados en algunos casos como superficie monoespecíficas de *P. pinaster* en la estratificación previa realizada para la ordenación del monte, lo que podría afectar en forma de una sobrestimación de las existencias con el inventario por muestreo al captar con menos precisión la variabilidad de la distribución espacial de los recursos que con el inventario asistido por LiDAR. En estos casos aislados la solución pasaría por mejorar tanto la estratificación previa de en la ordenación del monte, así como el desarrollo de nuevos modelos LiDAR más específicos para estos tipos de estratos.

En el caso de masas de *P. Pinea* en el monte “Tudía y sus Faldas” se obtuvieron resultados muy semejantes en las masas puras y una diferencia entorno del 15% en masas mixtas, resultados muy prometedores teniendo en cuenta la variabilidad estructural de estas masas en comparación con las masas puras.

6. Conclusiones

Los resultados demostraron que el inventario asistido por la tecnología LiDAR puede ser aplicable a otros montes de Extremadura para *P. pinea* y *P. pinaster* y masas mixtas con la consecuente reducción de los costes de inventarios forestales por muestreo.

Aunque podemos concluir que los resultados de las existencias por especie fueron similares a nivel de monte y estrato entre los dos tipos de inventario, serán necesarias en un futuro nuevas base de datos de parcelas de inventario forestal tomadas con gps submétrico con el objetivo de tener muestras independientes a nivel regional que nos permitan desarrollar modelos más robustos y específicos por tipo de bosque, así como mejorar y validar los modelos ya existentes. Igualmente podrían ser usadas las nuevas parcelas del IFN4 con las nuevas normas y especificaciones adaptadas para poder ser utilizadas como fuente de datos para poder trabajar con las próximas imágenes de LiDAR programadas para los próximos años en la comunidad autónoma de Extremadura.

7. Agradecimientos

Este trabajo surge de un Protocolo de Colaboración entre el Servicio de Ordenación y Gestión Forestal de la Consejería de Medio Ambiente y Rural, Políticas Agrarias y Territorio de la Junta de Extremadura y el Centro de Estudios Forestales del Instituto Superior de Agronomía de la Universidad de Lisboa.

Agradecimientos también a Vicente Jesús Sandoval Altelarrea, Jefe de Servicio de Inventario Forestal del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (Magrama).

8. Bibliografía

ANDERSEN, H.; BREIDENBACH, J.; 2007. Statistical properties of mean stand biomass estimators in LiDAR Based double sampling survey design, En: IAPRS: Proceedings of the ISPRS Workshop on Laser Scanning, SilviLaser 2007 36, 8–13.

ESTORNELL, J.; RUIZ, L. A.; VELÁZQUEZ-MARTÍ, B.; HERMOSILLA, T. 2011. Analysis of the factors affecting LiDAR DTM accuracy in a steep shrub area. *Int J Digit Earth* 4(6) 521-538.

FERNÁNDEZ-LANDA, A.; RODRÍGUEZ PUERTA, F.; 2013. La tecnología LiDAR en la planificación de la gestión forestal: Nuevas formas de cálculo de existencias y generación de cartografía en masas forestales. En *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales* 37 67-73.

GONZÁLEZ-FERREIRO, E.; M., MIRANDA, D.; BARREIRO-FERNANDEZ, L.; BUJAN, S.; GARCIA-GUTIERREZ, J.; DIEGUEZ-ARANDA, U; 2013. Modelling stand biomass fractions in Galician *Eucalyptus globulus* plantations by use of different LiDAR pulse densities. *Forest Syst* 22(3) 510-525.

GONZÁLEZ-FERREIRO, E.; DIÉGUEZ-ARANDA, U.; CRECENTE-CAMPO, F.; BARREIRO-FERNÁNDEZ, L.; MIRANDA, D.; CASTEDO-DORADO, F. 2014. Modelling canopy fuel variables for *Pinus radiata* D. Don in NW Spain with low-density LiDAR data. *Int J Wildland* 23(3) 350-362.

GONZÁLEZ-OLABARRIA, J. R.; RODRÍGUEZ, F.; FERNÁNDEZ-LANDA, A.; MOLA-YUDEGO, B. 2012. Mapping fire risk in the Model Forest of Urbión (Spain) based on airborne LiDAR measurements. *Forest Ecol Management* 282 149-156,

GONÇALVES-SECO, L.; GONZÁLEZ-FERREIRO, E.; DIÉGUEZ-ARANDA, U.; FRAGA-BUGALLO, B.; CRECENTE, R.; MIRANDA, D. 2011, Assessing the attributes of high density *Eucalyptus globulus* stands using airborne laser scanner data. *Int J Remote Sensing* 32 (24): 9821 -9841.

GUERRA-HERNÁNDEZ, J.; GONZÁLEZ-FERREIRO, E.; JURADO-VARELA, A.; TOMÉ, M.; 2015. Uso de LiDAR aerotransportado para la estimación de variables forestales de un bosque Mediterráneo en el suroeste de España (Extremadura). En: *Teledetección: Humedales y Espacios Protegidos*, XVI Congreso de la Asociación Española de Teledetección, Sevilla, España. 21-23 Octubre, 379-382.

GUERRA-HERNÁNDEZ, J.; GÖRGENS, E. B.; GARCÍA-GUTIÉRREZ, J.; CARLOS, L.; RODRIGUEZ, E.; TOMÉ, M.; GONZÁLEZ-FERREIRO, E. 2016, Comparison of ALS based models for estimating aboveground biomass in three types of Mediterranean forest. *Eur J Remote Sens* 49 185-204.

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. *Forest Ecol Management* 208(1) 189-209.

HUMMEL, S., HUDAK, A. T., UEHLER, E. H., FALKOWSKI, M. J., MEGOWN, K. A. 2011. A comparison of accuracy and cost of Lidar versus stand exam data for landscape management on the malheur national forest. *J Forest* 109(5) 267-273.

LOVELL, J. L., JUPP, D. L. B., NEWNHAM, G. J., COOPS, N. C., CULVENOR, D. S. 2005. Simulation study for finding optimal lidar acquisition parameters for forest height retrieval. *Forest Ecol Management* 214(1), 398-412.

MALTAMO, M.; NÆSSET, E.; VAUHKONEN, J. 2014. *Forestry applications of airborne laser scanning*. Dordrecht: Springer.



MAURO F, et al., Uncertainty of mean values of forest variables, calculated combining field plots and ALS data for a 300 ha area, Estimation of possibilities for field work reduction, 2012 ForestSAT Conference, Sept, 11-14, Corvallis OR, USA.

MCGAUGHEY, R. 2009 FUSION/LDV: Software for LIDAR Data Analysis and Visualization, US Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, Seattle, WA, 123 pp,

MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE; 1997-2007. Tercer Inventario Forestal Nacional. Dirección General de Conservación de la Naturaleza. Madrid.

MOLINA, J. M. G.; NICOLAU, M. P.; GRAU, P. V. 2006, Manual de ordenación por rodales: gestión multifuncional de los espacios forestales, Centre Tecnològic Forestal de Catalunya, Solsona, Lérida

MONTEALEGRE,A.L.; LAMELAS,M.T.; DE LA RIVA, J.; GARCÍA-MARTÍN,A.; ESCRIBANO,F. (2016), Use of low point density ALS data to estimate stand-level structural variables in Mediterranean Aleppo pine forest, Forestry, cpw008,

NAESSET, ERIK. (1997). Estimating timber volume of forest stands using airborne laser scanner data. Remote Sens Environment 61(2) 246-253.

RUIZ, L. A.; HERMOSILLA, T.; MAURO, F.; GODINO, M. 2014. Analysis of the influence of plot size and lidar density on forest structure attribute estimates. Forests 5(5), 936-951.

TOMÉ MORÁN, J. L.; SANJUANBENITO GARCÍA, P.; FERNÁNDEZ LANDA, A. 2013. Cartografía de Vegetación en la Comunidad de Madrid utilizando información LiDAR del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA), VI Congreso Forestal Español, Vitoria Gasteiz, 10-14 de junio de 2013, Sociedad Española de Ciencias Forestales.

VALBUENA, R.; MAURO, F.; ARJONILLA, F. J.; MANZANERA, J. A. 2011. Comparing airborne laser scanning-imagery fusion methods based on geometric accuracy in forested areas. Remote Sens Environment 115(8) 1942-1954.

ORTUÑO PÉREZ, S.; NÚÑEZ MARTÍ, M. V.; MAURO, F.; GAMAZO, M. V.; MARTÍN FERNÁNDEZ, S. 2013. Estimación de los costes de inventario forestal con y sin información LIDAR. 6º Congreso Forestal Español. Vitoria- Gasteiz.