



2022
Lleida

27·1
junio · juny
julio · juliol

Cataluña
Catalunya

8º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

La **Ciencia forestal** y su contribución a los **Objetivos de Desarrollo Sostenible**

8CFE

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales

Cataluña | Catalunya · 27 junio | juny - 1 julio | juliol 2022

ISBN 978-84-941695-6-4

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Organiza



Estimación de la biomasa forestal en las masas de encina (*Quercus ilex* L.) y alcornoque (*Quercus suber* L.) de la provincia de Huelva mediante inventario forestal LiDAR y fotogrametría aérea

JIMÉNEZ FERNÁNDEZ PALACIOS, A.¹, VÁZQUEZ PIQUÉ, J.¹ y CALZADO CARRETERO, A.¹

¹ Departamento de Ciencias Agroforestales, Universidad de Huelva.

Resumen

El presente trabajo recoge los resultados del inventario forestal de biomasa a escala regional realizado mediante LiDAR y fotogrametría aérea en las masas de encina y alcornoque de la provincia de Huelva por los métodos de masa y árbol individual. Se inventariaron 99 parcelas divididas en cuatro estratos correspondientes a dehesa de encina, dehesa de alcornoque, encinar con matorral y alcornocal con matorral mediante inventario forestal clásico. Adicionalmente 24 de estas parcelas fueron levantadas con LiDAR terrestre manual. En el método de masa, la biomasa por parcela se obtuvo por agregación de la biomasa arbórea y biomasa de matorral y se modelizó empleando los datos LiDAR del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA). En el método de árbol individual, se individualizaron copas utilizando coberturas LiDAR y ortofotografías PNOA y se desarrollaron regresiones de biomasa arbórea en función de datos de altura total y superficie de proyección de copa obtenidos a partir de datos de LiDAR terrestre manual. Los resultados obtenidos mostraron una mejor estimación de la biomasa forestal por el método de árbol individual que el método de masa, obteniendo un RMSE del 25,9 % en la estimación por el método de árbol individual.

Palabras clave

Método de masa, método de árbol individual, LiDAR PNOA, LiDAR terrestre.

1. Introducción

La cuantificación de la biomasa es un elemento fundamental a la hora de describir y estimar distintos parámetros en el medio forestal, siendo actualmente además un elemento clave en la política energética española, enfocada en promover el desarrollo de energías renovables. En el caso de la biomasa, la fuente de producción principal se encuentra en el sector forestal, cuyo rendimiento depende estrechamente de una buena adecuación de las masas forestales a las condiciones climáticas (PNIEC, 2020). Entre las distintas aplicaciones derivadas de la estimación de biomasa destacan la utilización como indicador de cantidad de materia prima disponible como combustible (GÓMEZ-GARCÍA, 2021; GONÇALVES et al., 2021) y el cálculo de la fijación de CO₂ como sumidero de carbono (GARCIA ROSA, 2013; PATIÑO et al., 2018; CIESZEWSKI et al., 2021). Dentro de los métodos principales de cuantificación de biomasa forestal se distinguen los métodos directos e indirectos. Los primeros consisten en el apeo de individuos para su posterior pesado y determinación del peso seco (MONTERO et al., 2005). Los segundos se basan en la estimación de la biomasa a partir de variables de fácil medición, normalmente diámetro normal, altura del árbol o volumen con corteza (CANGA et al., 2013). La combinación de ambos métodos ha hecho factible la aplicación de ecuaciones de estimación de biomasa en inventarios forestales (AVENDAÑO et al., 2009; GÓMEZ-DÍAZ et al., 2011; HOSSAIN et al., 2021).

Según el Plan Forestal Español, España cuenta con casi 4 millones de hectáreas de masas de frondosas, de las que 1,976 corresponden a *Quercus ilex* L., y 0,373 a *Quercus suber* L. (PFA, 2002). Entre los aprovechamientos tradicionales de estas formaciones destacan el aprovechamiento de la bellota como alimento para el ganado, el corcho en el caso del alcornoque y el aprovechamiento de la biomasa como fuente energética, ya sea como leña o carbón. Por otro lado, el tipo de gestión

asociada al aprovechamiento hace que la estructura de estas masas varíe, siendo abundantes en nuestro país tanto las masas adehesadas como las masas con matorral.

Debido al elevado trabajo de campo que conlleva el inventario forestal clásico, en las últimas décadas se han venido desarrollando nuevas técnicas de inventariación a partir de la adquisición de datos procedentes de sensores remotos (VÁSCONEZ Y SEVILLA, 2018). Esto, unido a la mejora computacional, ha permitido disminuir los costes de inventario (GONZÁLEZ-FERREIRO et al., 2012). Dentro de los sensores remotos empleados destacan dos tipos. Por un lado, los sensores pasivos como las cámaras fotográficas, captan la energía emitida o reflejada por fuentes naturales. Por otro lado, los sensores activos como el LiDAR, cuentan con su propia fuente energética, emitiendo y captando el tiempo y la intensidad del retorno. Ambos tipos de sensores han sido empleados con éxito en numerosos estudios de estimación de variables forestales (WANG et al., 2021; GÓMEZ et al., 2021; GUERRA-HERNÁNDEZ & PASCUAL, 2021), destacando en la actualidad el empleo de la tecnología LiDAR en el inventario forestal (LEKUONA et al., 2017; ALBEROLA et al., 2018; SHOOT et al., 2021). En relación a esto, la mayor parte de los trabajos realizados mediante LiDAR emplean datos procedentes de láseres escáner aerotransportados (ALS) que permiten barrer grandes extensiones de superficie, aunque en los últimos años se están incorporando los láseres escáner terrestres (TLS) en el ámbito forestal (DASSOT et al., 2011). En este sentido, España cuenta con el Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA), que posee datos procedentes tanto de sensores aerotransportados pasivos (imágenes orto-rectificadas PNOA) como activos (nube de puntos LIDAR PNOA de baja densidad) (MITMA, 2021), posibilitando combinar información espectral y estructural en el análisis de vegetación. Por otro lado, la estimación de variables forestales mediante LiDAR puede llevarse a cabo mediante los enfoques del método de masa y del método de árbol individual. Los primeros se centran en la estimación de variables dasométricas de forma continua mediante regresiones (BERNAL et al, 2017), mientras que los segundos estiman variables dendrométricas pie a pie (PACKALÉN et al., 2008), ya sea por medición directa o mediante modelos predictivos, lo que permite el cálculo dasométrico por agregación de individuos (GONZÁLEZ-JARAMILLO et al., 2013).

En el presente trabajo, enmarcado dentro de la línea de modelización de biomasa forestal del Proyecto de Centro Ibérico para la Investigación y Lucha contra Incendios Forestales (CILIFO), se ha realizado la estimación de la biomasa forestal a escala regional de las masas de *Quercus ilex* L. y *Quercus suber* L. de la provincia de Huelva, empleando y comparando para ello los enfoques del método de masa y método de árbol individual a partir de la información del PNOA y de datos procedentes de TLS y fotogrametría aérea.

2. Objetivos

Los objetivos del presente trabajo son:

- Estimar la biomasa arbórea y de matorral de las masas de *Quercus ilex* L. y *Quercus suber* L. en las comarcas agrarias de la Sierra, Andévalo Occidental y Andévalo Oriental de la provincia de Huelva.
- Comparar el desempeño del método de masa y método de árbol individual en el caso de estimación de biomasa en masas de *Quercus ilex* L. y *Quercus suber* L. a escala regional.
- Comparar la bondad de los métodos de inventario propuestos aplicados sobre la primera y segunda cobertura LiDAR del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea.

3. Metodología

Área de estudio

El presente estudio se desarrolla en el área cubierta por las masas de encinar y alcornocal de las comarcas de La Sierra, Andévalo Occidental y Andévalo Oriental de la provincia de Huelva,

comarcas que suman una superficie de 642.682 ha. Según el Plan Forestal Español (PFA, 2002), la superficie de encinares y alcornoques en dicha área asciende a 220.549 ha, de las cuales 190.087 ha corresponden a encinares y 30.462 ha a alcornoques, lo que supone el 94,7 % de la superficie de estas formaciones en la provincia (Figura 1). Dentro de la zona de estudio se realizó una estratificación atendiendo a la especie principal y la presencia - ausencia de matorral. Como límite de diferenciación se estableció una cobertura del matorral del 10 %, definiéndose de esta forma cuatro estratos correspondientes a dehesa de encina (ED), encinar con matorral (EM), dehesa de alcornoque (AD) y alcornocal con matorral (AM).

Fuentes de información

Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA)

Se dispuso del conjunto de ortofotografías PNOA RGB 2016, los vuelos LiDAR PNOA de los años 2014 y 2015 de Andalucía Noroeste y Andalucía Suroeste correspondientes a la primera cobertura LiDAR (L1G), y el vuelo LiDAR PNOA del año 2020 de Andalucía Cuenca Atlántica perteneciente a la segunda cobertura LiDAR (L2G). Las ortofotografías PNOA RGB de 2016 cuentan con una resolución espacial de 0.5 m y tres bandas espectrales (azul, verde y rojo) y fueron adquiridas en formato EWC y con profundidad de pixel de 8 bits. Los vuelos LiDAR PNOA presentan una densidad media de 0.5 y 1.5 pulsos/m² para L1G y L2G respectivamente, no estando este último disponible en toda el área de estudio. Los tres productos fueron proporcionados por el Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG).

Inventario forestal

Se realizó el levantamiento de 99 parcelas de inventario forestal en 16 montes tanto públicos como privados de la provincia de Huelva. El número de parcelas de inventariación por estrato queda recogido en la Tabla 1. La forma de la parcela fue circular y el radio de 18 m. El centro de cada parcela fue levantado mediante receptor topográfico GPS Emlid Reach RS+, obteniendo la solución con técnicas de postprocesado PPK apoyado en la Red Andaluza de Posicionamiento (RAP). El error de posicionamiento se estimó en decimétrico. En cada parcela se georreferenciaron los pies mayores (considerándose como tales aquellos que presentaban una altura superior a 4 m) mediante rumbo y distancia, anotándose la especie, estado sanitario, diámetro normal (d_n), altura total (H_t) y altura de copa (h_c). De forma complementaria, se clasificaron los pies en dominados y no dominados, entendiéndose como dominados aquellos pies cuya copa no es visible desde ortofotografía aérea. La medición del d_n se realizó mediante cinta pi, mientras que para las alturas se empleó un hipsómetro Vertex III. Finalmente se midió la altura de matorral (h_m) en cuatro puntos situados a 9 metros del centro de parcela y dirección norte, sur, este y oeste.

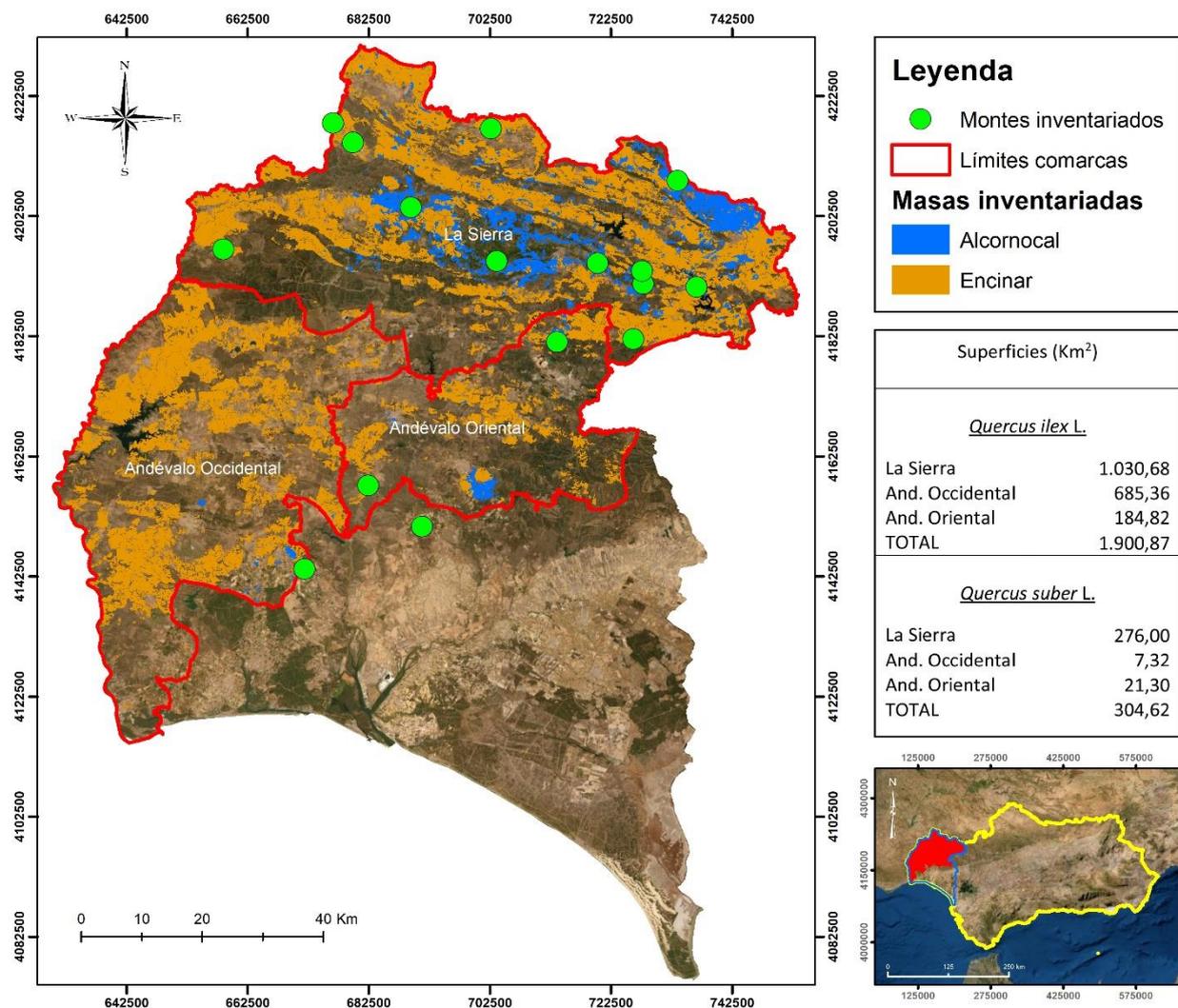


Figura 1. Área de estudio.

Vuelo fotogramétrico

A fin de obtener la fracción de cabida cubierta del arbolado (FCC_a) y la fracción de cabida cubierta del matorral (FCC_m) se realizó un vuelo fotogramétrico sobre cada parcela inventariada. El equipo empleado para ello consistió en un cuadricóptero Phantom 4 pro equipado con sensor RGB 1"CMOS, campo de visión (FOV) de 84° y distancia focal 8.8 mm. Como apoyo topográfico al vuelo se empleó una diana central situada en el centro de parcela y dos dianas complementarias a modo de escala. registrándose rumbo y distancia con respecto a la diana central. La configuración de los vuelos persiguió la correcta definición de la copa de los árboles, por lo que se optó por vuelos de doble pasada (norte-sur y este-oeste) a 30 m de altura sobre el arbolado y ángulo de inclinación de la cámara sobre el nadir de 30°, volándose de esta forma una superficie cuadrada de 60 m de lado con distancia entre pasadas paralelas de 10 m.

Tabla 1. Número de parcelas por estrato de inventario.

Estrato	Nº parcelas	Estrato	Nº parcelas
Dehesa de encina	37	Dehesa de alcornoque	23
Encinar con matorral	22	Alcornocal con matorral	17

LiDAR terrestre

Se realizó el levantamiento mediante TLS de 24 de las 99 parcelas previamente inventariadas y levantadas fotogramétricamente. Dichas parcelas correspondieron con 12 parcelas de especie principal *Quercus ilex* L., y 12 de *Quercus suber* L. El equipo empleado fue un láser escáner ZEB-HORIZON con alcance de 100 m y ratio de escaneo de 300.000 puntos/s. El barrido de cada parcela se efectuó mediante un único escaneo de pasadas paralelas de 9 m perpendiculares a la línea de máxima pendiente, partiendo desde el centro de parcela de inventario de coordenadas conocidas y finalizando en el mismo, de forma que se levantó una superficie cuadrada de 54 m de lado centrada con respecto a la parcela de inventario.

Preprocesado de datos

LiDAR PNOA

El procesado de las coberturas LiDAR PNOA se llevó a cabo mediante el software libre FUSION (MCGAUGHEY, 2015). Como producto se obtuvo la métrica de la nube de puntos de ambas coberturas, así como un modelo digital de vegetación (MDV) de 2.5 m y 1 m de resolución procedente de las coberturas L1G y L2G respectivamente. Dichos MDVs fueron remuestreados y ajustados a la malla de 0.5 m de las ortofotografías RGB, empleando para ello el método de convolución cúbica con el objetivo de suavizar el MDV.

LiDAR terrestre

El procesado de los datos TLS de las 24 parcelas escaneadas fue realizado mediante el software LiDAR360. El proceso seguido fue el siguiente: (1) georreferenciación y normalización de las nubes de puntos de cada parcela; (2) eliminación de los puntos pertenecientes a pies fuera de parcela; (3) obtención de nube de puntos de pie individual mediante individualización manual de cada pie inventariado; (4) obtención de las variables dendrométricas.

Vuelo fotogramétrico

Los datos procedentes de los vuelos fotogramétrico fueron procesados mediante el software Agisoft Metashape, obteniéndose la ortofotografía y el MDV a 1,5 cm de resolución de cada parcela de inventario. Posteriormente los MDV fueron reclasificados por alturas, de forma que los valores entre 0,2 y 2,5 m se clasificaron como matorral y los superiores a 2,5 m como arbolado, obteniéndose de esta forma las superficies y fracción de cabida cubierta arbolada y de matorral.

Método de masa

En primer lugar, se procedió a la obtención de la biomasa arbórea por parcela (B_{ap}) por agregación de la biomasa de cada pie, para lo que se aplicaron las ecuaciones de biomasa de *Quercus ilex* L. y *Quercus suber* L. desarrolladas por MONTERO et al (2005). Dichos modelos relacionan la biomasa total del pie y el d_n , presentando un rango de aplicación de d_n de 7,7 a 63,7 cm en el caso de *Quercus ilex* L. y de 10,5 a 83,0 cm en *Quercus suber* L. Por otro lado, la biomasa de matorral por parcela (B_{mp}) fue estimada a través de la ecuación de biomasa para arbustados y matorrales mediterráneos desarrolladas por MONTERO et al (2013), que relacionan la biomasa de matorral con las variables de FCC_m y h_m .

En segundo lugar, se modelizó B_{ap} y B_{mp} obtenida a partir de las fracciones de cabida cubierta correspondientes y de las métricas LiDAR PNOA mediante regresión múltiple. Para ello, las nubes de puntos LiDAR PNOA se dividieron en dos grupos. Por un lado, valores de altura normalizada superiores a 2,5 m y por otro lado valores inferiores a 2,5 m. Se calcularon las métricas para cada uno de los grupos y se modelizó B_{ap} utilizando las métricas superiores, y B_{mp} mediante las métricas inferiores. Debido a la existencia de parcelas de inventario con pies de d_n fuera de rango de aplicación del modelo de biomasa por pie de MONTERO et al (2005), el conjunto de datos inicial de 99 y 64 parcelas de inventario coincidentes con las coberturas L1G y L2G, se redujo a 67 y 44 parcelas respectivamente. La validación en ambos casos fue realizada mediante validación cruzada.

Método de árbol individual

La individualización del arbolado a partir de las coberturas L1G y L2G se realizó siguiendo el flujo de trabajo desarrollado por JIMÉNEZ et al (2022), quien obtuvo una fiabilidad global de individualización por fotointerpretación del 88,78 % en masas de encinar en la provincia de Huelva. En ambos casos, el procesado de los datos se realizó mediante los datos de campo de las parcelas de inventario forestal coincidentes con las respectivas coberturas L1G y L2G (99 y 64 respectivamente) obteniéndose el porcentaje de aciertos de la individualización al cruzar la capa poligonal de copas con la capa de puntos georreferenciados de los pies inventariados. De esta forma, se contabilizó como:

- Acierto: intersección punto-polígono.
- Comisión: polígono no intersectado.
- Omisión: punto no intersectado o del segundo al enésimo punto contenido en un mismo polígono.

Una vez obtenida la capa de individualización, se ensayaron modelos de biomasa arbórea individual (B_{ai}) en función de las variables S_c y H_t procedentes de los datos TLS en *Quercus ilex* L. y *Quercus suber* L. Con el objeto de tener en cuenta la correlación espacial entre pies de la misma parcela, el análisis se realizó mediante el ajuste de modelo mixto de coeficientes aleatorios en cada especie incluyendo el efecto aleatorio parcela. La muestra estuvo formada por 111 pies de *Quercus ilex* L. y 100 de *Quercus suber* L. de estado sanitario óptimo. Ambas muestras se dividieron en dos subconjuntos de datos del 50 %, el primero destinado a entrenamiento y el segundo a validación. La evaluación de la estimación de S_c y H_t en la individualización se realizó mediante las mediciones dendrométricas obtenidas con TLS, mientras que la B_{ap} fue determinada por agregación de la biomasa arbórea de cada pie.

Finalmente, como metodología complementaria de cuantificación de B_{mp} en el método de árbol individual, se testeó la determinación de ésta en base al MDV procedente de las coberturas LiDAR PNOA. De esta forma, se aplicó la ecuación de biomasa para arbustados y matorrales mediterráneos desarrolladas por MONTERO et al (2013) sobre la FCC_m y h_m obtenidas a partir de la reclasificación del MDV en suelo (altura de 0 a 0,15 m), matorral (altura de 0.15 a 2,5 m) y arbolado (altura superior a 2,5 m),

4. Resultados

Método de masa

El ajuste de modelos por estrato en el método de masa no mostró mejora con respecto a modelos agrupados por especie, por lo que se optó por la simplificación de los cuatro estratos iniciales en estratos de encinar (ED-EM) y alcornocal (AD-AM). De esta forma, en las Tablas 3 y 4 se recogen los modelos y el RMSE de B_{ap} y B_{mp} obtenidos mediante las coberturas L1G y L2G respectivamente.

Tabla 3. Método de masa. Modelos de biomasa cobertura L1G desarrollados para los estratos ED, EM, AD y AM. FCC: fracción de cabida cubierta; LH_95: percentil 95.

Estrato	Modelo	Parámetros			R ²	RMSE (%)
		a	b	c		
ED-EM	$LN(B_{ap}) = a + b \cdot LN(LH_{05}) + c \cdot LN(FCC)$	4,1666	1,2678	0,8191	0,684	34,2
AD-AM	$LN(B_{ap}) = a + b \cdot LN(LH_{10}) + c \cdot LN(FCC)$	5,0466	1,0034	0,5426	0,372	28,1
Matorral	No significativo					

Tabla 4. Método de masa. Modelos de biomasa cobertura L2G desarrollados para los estratos ED, EM, AD y AM. FCC: fracción de cabida cubierta; LH_05: percentil 5; FCC_m: fracción de cabida cubierta del matorral.

Estrato	Modelo	Parámetros			R ²	RMSE (%)
		a	b	c		
ED-EM	$LN(B_{ap}) = a + b \cdot LN(LH_{95}) + c \cdot LN(FCC)$	2,1115	1,1366	1,1906	0,801	33,1
AD-AM	$LN(B_{ap}) = a + b \cdot LN(LH_{05}) + c \cdot LN(FCC)$	3,3390	0,6806	1,0985	0,451	29,2
Matorral	$B_{mp} = a + b \cdot FCC_m$	8,18519	0,51731		0,795	24,0

Método árbol individual

Desempeño del método de individualización

El proceso de individualización aplicado sobre la cobertura L1G logró un acierto global del 73,29 % sobre el total de 1.007 pies inventariados procedentes de las 99 parcelas de inventario. Teniendo en cuenta que la muestra contuvo 97 pies dominados, los pies detectables por el método desde ortofotografía aérea descendieron a 910 pies, habiéndose obtenido un acierto del 81,10 % sobre pies no dominados. Desde el punto de vista de los errores, el método seguido comete mayor omisión que comisión de pies, contabilizándose éstos en 269 y 54 respectivamente. Finalmente, en base al balance de aciertos/errores de comisión y omisión, la estimación de pies final en relación a la inventariada expresada en porcentaje fue del -21,35 % con respecto al total de pies y del -12,97 % con respecto a los pies no dominados. Los resultados tanto globales como por estrato para L1G quedan recogidos en la Tabla 5.

Por otro lado, la Tabla 6 recoge la comparación del acierto de la individualización entre las coberturas L1G y L2G teniendo en cuenta únicamente las 64 parcelas coincidentes. De esta forma, sobre el total de 621 pies inventariados y los 569 pies inventariados no dominados, se logró un aumento del acierto del 4,83 % y del 5,27 % respectivamente, a lo que hay que añadir un descenso de los errores de comisión y omisión de 4,82 % y 6,29 %. De acuerdo con el balance acierto/errores de comisión y omisión, la estimación final de pies en relación a los pies inventariados aumentó en 0,96 %, mientras que con respecto a los pies inventariados y no dominados el aumento fue del 1,06 %.

Finalmente, la Tabla 7 recoge el RMSE de las variables H_t y S_c obtenido por la individualización en las coberturas L1G y L2G con respecto a TLS, así como la comparación entre ambas.

Tabla 5. Método de árbol individual. Resultados obtenidos por el proceso de individualización del método de árbol individual mediante la cobertura L1G. Inv: inventariados; indiv: individualizados; ND: no dominados; EC: errores de comisión; EO: errores de omisión; N: número de pies.

Estrato	Pies inv.	Pies inv. ND	Pies indiv.	EC	EO	Aciertos	% aciertos total	% aciertos ND	N total %	N ND %
ED	230	226	221	17	50	202	87,83	89,38	-4,78	-3,10
EM	312	272	245	12	76	214	68,59	78,68	-27,56	- 16,91
AD	284	247	207	17	94	190	66,90	76,92	-27,11	- 16,19
AM	181	165	142	8	49	132	72,93	80,00	-22,65	- 15,15
Total	1007	910	815	54	269	738	73,29	81,10	- 21,35	- 12,97

Tabla 6. Método de árbol individual. Mejora del proceso de individualización mediante la cobertura L2G en comparación con L1G teniendo en cuenta únicamente las parcelas comunes a ambas coberturas. Inv: inventariados; indiv: individualizados; ND: no dominados; EC: errores de comisión; EO: errores de omisión; N: número de pies.

Estrato	Pies inv.	Pies inv. ND	Pies indiv.	EC	EO	% aciertos total	% aciertos ND	N total %	N ND %
ED	125	125	119	-10,28	-5,24	+5,6	+11,6	-4,8	-4,8
EM	78	78	75	-2,96	-5,81	+5,13	+5,13	+2,56	+2,56
AD	248	212	180	-2,43	-6,36	+3,63	+4,24	+2,02	+2,36
AM	170	154	134	-3,94	-8,85	+5,89	+6,49	+2,94	+3,24
Total	621	569	508	-4,82	-6,29	+4,83	+5,27	+0,96	+1,06

Tabla 7. Método de árbol individual. Error medio cuadrático de la estimación de altura total y superficie de proyección de copa obtenido mediante el proceso de individualización de las coberturas L1G y L2G con respecto a las mediciones de TLS.

Cobertura LiDAR PNOA	<i>Quercus ilex</i> L.		<i>Quercus suber</i> L.	
	H _t	S _c	H _t	S _c
L1G	15,6	45,1	15,8	41,7
L2G	11,8	36,8	12,4	39,4
Comparación	-3,8	-8,3	-3,4	-2,3

Modelos de biomasa de árbol individual

El ajuste de modelos mixtos de coeficientes aleatorios presentó problemas de convergencia de los parámetros por lo que se ajustó finalmente un modelo de efectos fijos. Igualmente, el ajuste de un único modelo para ambas especies no mostró diferencias en la pendiente ni en la varianza del modelo, pero sí diferencia significativa en el término independiente. El modelo presentó un R² de 0,7458, siendo el RMSE del 57,84 % sobre la muestra de validación de ambas especies. Los modelos finalmente seleccionados se indican en la Tabla 8.

Tabla 8. Método de árbol individual. Modelos de biomasa de árbol individual de *Quercus ilex* L. y *Quercus suber* L. desarrollados mediante la toma de datos con TLS.

Modelo	Especie	Parámetros	
		a	b
$\ln(B_a) = a + b * \ln(S_c)$	Q.I.	0,6784	1,3634
	Q.S.	0,8333	

Biomasa por parcela mediante método de árbol individual

Los resultados del RMSE de la estimación de B_{ap} en L1G y L2G de forma global y por estrato, así como la comparación entre sus valores en ambas coberturas, quedan recogidos en la Tabla 9. Por otro lado, el método complementario propuesto para la estimación de B_{mp} no logró estimar dicha biomasa mediante L1G, mientras que en el caso de L2G, el RMSE total obtenido fue de 30,0 %.

Cuantificación de la biomasa forestal a escala regional

En base a los resultados mostrados anteriormente por el método de masa y método de árbol individual, y teniendo en cuenta la no disponibilidad de L2G en toda el área de estudio, la cuantificación de la biomasa arbórea se llevó a cabo por aplicación del método de árbol individual sobre la cobertura L1G. De esta forma, la biomasa arbórea media obtenida para la totalidad del área de estudio fue de 46,88 t/ha en *Quercus ilex* L. y 45,74 t/ha en *Quercus suber* L, mientras que las existencias totales en el global de la superficie ascendieron a 8.911.890 y 1.393.201 t de biomasa respectivamente. Los resultados desagregados por comarca agraria y especie quedan recogidos en la Tabla 10, mientras que en la Figura 2 se muestra la distribución de la biomasa arbórea determinada en la zona de trabajo.

Finalmente, la biomasa de matorral no pudo ser obtenida en la totalidad del área de estudio, ya que L1G no permitió su obtención, mientras que L2G, que demostró capacidad para ello, no cubrió la totalidad del área a fecha de finalización de este trabajo.

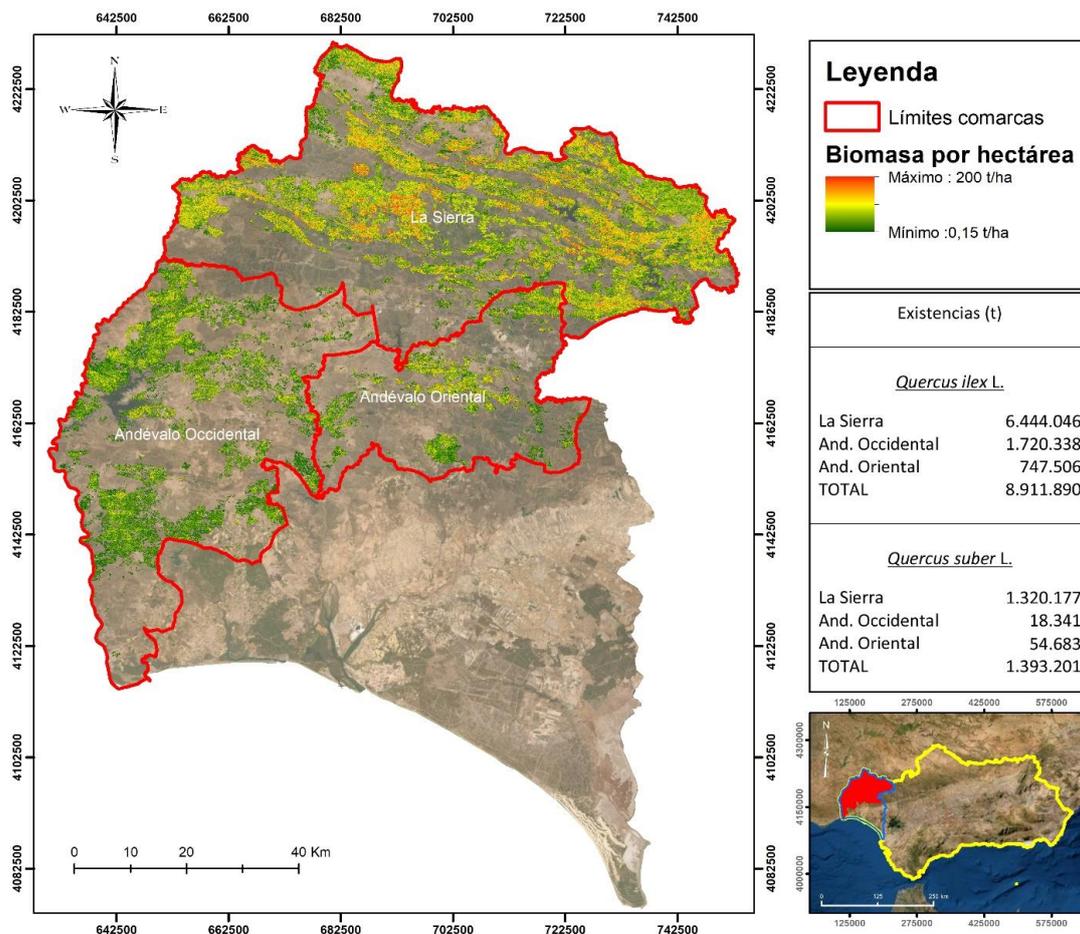


Figura 2. Existencias de biomasa arbórea en *Quercus ilex L.* y *Quercus suber L.* obtenidas mediante árbol individual y cobertura L1G en la zona de estudio.

Tabla 9. Método árbol individual. Error medio cuadrático en la estimación de la biomasa arbórea por parcela obtenida por el método de árbol individual para cada estrato de inventario y de forma total en las coberturas L1G y L2G.

Cobertura LiDAR	Estrato				Total
	ED	EM	AD	AM	
1G	30,2	28,6	21,2	21,7	25,9
2G	29,1	24,3	21,3	28,2	25,2
Comparación	- 1,1	- 4,3	+ 0,1	+6,5	- 0,7

Tabla 10. Existencias de biomasa arbórea obtenidas en la zona de estudio mediante el método de árbol individual y cobertura L1G.

Comarca	Biomasa (t/ha)		Existencias (t)	
	<i>Quercus ilex L.</i>	<i>Quercus suber L.</i>	<i>Quercus ilex L.</i>	<i>Quercus suber L.</i>
La Sierra	62,52	47,83	6.444.046	1.320.177
Andévalo Occidental	25,10	25,04	1.720.338	18.341
Andévalo Oriental	40,45	25,58	747.506	54.683
TOTAL	46,88	45,74	8.911.890	1.393.201

5. Discusión

Para modelizar la biomasa empleando el método de masa a partir de datos LiDAR procedentes de sensores aerotransportados se han utilizado, por lo general, diferentes percentiles de la distribución de frecuencias de la altura (LIM & TREITZ, 2004; PATENAUDE et al., 2004; GARCÍA et al., 2010; GONZÁLEZ-FERREIRO et al., 2012; GONZÁLEZ-FERREIRO et al., 2013; JIMÉNEZ et al., 2017), métricas vinculadas a la variabilidad y la asimetría de las alturas (NILSSON et al. 2017; KOTIVUORI et al. 2016), y también métricas relacionadas con la fracción de cabida cubierta (GUERRA-HERNÁNDEZ et al., 2015). Las variables seleccionadas en el presente trabajo son similares a las señaladas; sin embargo, en la mayoría de las publicaciones se han empleado percentiles altos (LIM & TREITZ, 2004; PATENAUDE et al., 2004; GARCÍA et al., 2010; GONZÁLEZ-FERREIRO et al., 2012), mientras que en el presente trabajo se han elegido, además del percentil 95, el percentil 5 y 10. En este sentido, cabe destacar que en otros trabajos también han sido utilizados percentiles bajos en la modelización de la biomasa. De esta manera, GONZÁLEZ-FERREIRO et al. (2012) utilizó el percentil 5 en la modelización de la biomasa de *Pinus radiata* y JIMÉNEZ et al., (2017) empleó el percentil 10 para *Pinus pinaster*. El hecho de que en tres de los cuatro modelos desarrollados para la encina y el alcornoque en el presente estudio no aparezcan percentiles altos puede ser debido a que de la biomasa total aérea únicamente corresponde al fuste el 28,1% para la encina y el 41,8 % para el alcornoque (MONTERO et al., 2005).

Los resultados obtenidos en cuanto a la bondad del ajuste, tanto para la encina (RMSE: 33,1 %) como para el alcornoque (RMSE: 29,2 %) en el método de masa, utilizando L1G del PNOA (densidad del pulso láser de 0,5 pulsos/m²) no difieren mucho a los alcanzados en otros trabajos en los que se ha utilizado la misma fuente de datos para modelizar la biomasa. De esta manera GUERRA-HERNÁNDEZ et al. (2016) para masas de *Pinus pinea*, bosque mixto y *Quercus pyrenaica* obtuvieron un RMSE de entre 25,9 y 33,92 %. Por su parte, JIMÉNEZ et al., (2017), para *Eucalyptus ssp. Pinus pinaster* y *Pinus radiata* en Galicia, alcanzaron valores algo más elevados de RMSE estando entre 46,92 y 64,52 %. ZUAZO et al. (2017) obtuvieron un RMSE de 32,66 % para masas de *Pinus radiata*. Por último, NOVO-HERNÁNDEZ et al. (2019) obtuvieron valores de RMSE de 34,7, 39,6 y 40,6 % para *Eucalyptus globulus*, *Pinus pinaster* y *Pinus radiata* respectivamente en el noroeste de España, utilizando datos de las parcelas del cuarto Inventario Forestal Nacional.

El empleo de L2G del PNOA (densidad del pulso láser de 1,5 pulsos/m²), frente al de la primera cobertura, permitió obtener modelos en los que el valor de la R² mejoró ligeramente; sin embargo, los resultados en cuanto al RMSE fueron similares. En este sentido, GONZÁLEZ-FERREIRO et al. (2012) para modelos de biomasa de *Pinus radiata* obtuvieron que la precisión del modelo no varió esencialmente después de reducir el 94 % la densidad de la nube de puntos LiDAR. Similares resultados encontraron GONZÁLEZ-FERREIRO et al. (2013) al reducir la densidad un 87,5 % en la modelización de la biomasa para *Eucalyptus globulus*. Considerando que en ambos trabajos la densidad mínima fue de 0,5 pulsos/m² parece, por tanto, que esta densidad es suficiente para modelizar la biomasa utilizando el método de masa. No obstante, el uso de L2G del PNOA en el presente estudio posibilitó modelizar la biomasa del matorral utilizando como variable de entrada la fracción de cabida cubierta (RMSE 24 %). Tanto el error como la variable empleada en el modelo son similares a los obtenidos por TRASSIERRA et al (2017), que modelizó la biomasa de *Cistus laurifolius* en montes de Soria utilizando la fracción de cabida cubierta como variable de entrada en el modelo (además de varios percentiles), con un RMSE de 26,75 %, y empleando también datos LiDAR aerotransportados provenientes del PNOA.

Con respecto a la individualización de copas en el método del árbol individual, los resultados obtenidos (73,29 % de aciertos) muestran fiabilidades similares a otros trabajos realizados. De esta forma, GIL-YEPES et al. (2012) lograron aciertos de entre el 67 % y el 81.7 % en zonas forestales con predominio de coníferas y densidad de puntos LiDAR aerotransportado de 4 pulsos/m²; por su parte,

AMIRI (2014), nuevamente en masas de coníferas y combinando datos ópticos GeoEye-2 y LiDAR aerotransportado de densidad mayor a 100 pulsos/m², obtuvo aciertos de hasta el 85.1 %. Las diferencias en las densidades de las nubes de puntos LiDAR y las estructuras de las masas de *Quercus ilex* L. y *Quercus suber* L. con respecto a las coníferas, así como la diferencia de forma del árbol entre estos géneros, donde las coníferas de los mencionados estudios destacan por una forma cónica que hace más fácil la localización de sus ápices frente a la forma globosa de la frondosa, hace difícilmente comparable dichos trabajos.

La altura de los árboles es una de las variables más estrechamente relacionadas con los datos LiDAR (ARIAS-RODIL et al., 2018), y diferentes trabajos han demostrado la eficiencia de estos datos para modelizar esta variable (p. ej. NILSSON; 1996; KWAK et al., 2007). El RMSE obtenido en el presente trabajo para las alturas utilizando los datos provenientes del PNOA (entre 11,8 y 15,8 %), permite afirmar que estos datos posibilitan estimar la altura en *Quercus suber* L. y *Quercus ilex* L. de cara a la gestión forestal. Con respecto a superficie de proyección de copa, cuya definición cobra especial interés al caracterizar los pies en los métodos de árbol individual, el RMSE obtenido se ha situado entre 45,1 y el 36,8 %. En este sentido, el método de individualización propuesto por JIMENEZ et al. (2022) y seguido en el presente trabajo, obtiene la delimitación de los árboles mediante un proceso cíclico basado en criterios de forma y escala. De esta forma, el elevado RMSE obtenido en superficie de proyección de copa con respecto a LEE et al. (2010) y WAN MOHD JAAFAR et al. (2018), que obtienen un 10,0 % y 14,4 % de RMSE respectivamente en el diámetro de copa mediante LiDAR de mayor densidad (en torno a 8 puntos/m²), puede deberse a la baja densidad de puntos LiDAR empleado en este estudio y al criterio de escala empleado. El aumento de dicha densidad, como demuestra RAHMAN & GORTE (2009), que mejoran los resultados de TEIDE et al. (2005) empleando su misma metodología al aumentar la densidad de puntos LiDAR en individualización de copas, así como la incorporación de información procedente de datos de inventario de campo (altura total y superficie de proyección de copa) como criterios de escala, debe mejorar la delineación de pies, y con ello, el RMSE obtenido en la estimación de superficie de proyección de copa mediante el método seguido.

El cálculo de la biomasa arbórea por parcela a partir de las ecuaciones desarrolladas con datos LiDAR obtenidos mediante TLS y la individualización de los árboles con datos del PNOA presenta mejores resultados que el método de masa. Se ha demostrado que TLS es una herramienta valiosa para estimar la biomasa de los árboles (CALDERS et al., 2015; DISNEY et al., 2018; GONZALEZ DE TANAGO et al., 2018; MOMO TAKOUDJOU et al., 2018; LAU et al., 2019; BEYENE et al.; 2020). La bondad de los ajustes obtenidos en estos trabajos es difícilmente comparable con la del presente trabajo: por una parte, la mayoría de estos trabajos han sido desarrollados en bosques tropicales; por otra parte, el enfoque metodológico es muy diferente ya que están orientados a utilizar las mediciones de TLS como una alternativa operativa al muestreo destructivo tradicional que se lleva a cabo para construir las ecuaciones alométricas de biomasa. Los resultados alcanzados en el presente trabajo en el porcentaje de aciertos de la individualización de copas (73,29%), así como en el RMSE de la estimación de la biomasa arbórea por parcela (25,9% y 25,2% para *Quercus ilex* L. y *Quercus suber* L. respectivamente) permite señalar que esta metodología puede ser muy útil para la redacción de Planes Técnicos en la zona de estudio, ya que las actuales Instrucciones Generales de Ordenación de Montes de Andalucía obligan a la realización de inventario de la vegetación en la que la variable principal es el número de pies, permitiendo un error de muestreo de hasta el 30%.

6. Conclusiones

El empleo del láser escáner terrestre manual en este estudio se ha presentado como una herramienta válida y eficaz a la hora de realizar inventario forestal. La información obtenida mediante este tipo de sensores ha permitido el modelado de biomasa de árbol individual de *Quercus ilex* L. y *Quercus suber* L. en función de la superficie de proyección de copa, mientras que la inclusión de la

variable altura total en dichos modelos no mostró mejora significativa. El desarrollo de estos modelos, que emplean las variables dendrométricas típicas procedentes de una individualización de copas, ha permitido la obtención de biomasa arbórea por el método de árbol individual.

El método de árbol individual empleado ha mostrado mejor bondad que el método de masa a la hora de estimar biomasa arbórea en masas de *Quercus ilex* L. y *Quercus suber* L. a escala regional. El mayor coste computacional del método de árbol individual derivado de la generación de grandes capas de copas con información alfanumérica asociada a la dendrometría de cada pie puede ser salvado con los avances computacionales actuales.

El aumento de la densidad media de puntos de 0,5 a 1,5 puntos/m² de la primera y la segunda cobertura LiDAR del PNOA no ha mostrado una mejora significativa a la hora de estimar la biomasa arbórea tanto por el método de masa como por el método de árbol individual. Por el contrario, dicho aumento de densidad hace posible la obtención de biomasa de matorral en el tipo de masas estudiadas. En este sentido, tanto el empleo de la fracción de cabida cubierta y la altura del matorral (procedente de la métrica de alturas normalizadas inferior a 2,5 m) en el método de masa, como la reclasificación directa por alturas del MDV en suelo, matorral y arbolado, han mostrado capacidad de estimar biomasa de matorral con errores admisibles a través de la segunda cobertura LiDAR del PNOA.

En el método de árbol individual, se aprecia mejora en la estimación mediante la segunda cobertura LiDAR de las variables altura total y superficie de proyección de copa con respecto a la primera cobertura LiDAR. De esta forma, el aumento de la resolución 2,5 m a 1 m del MDV generado mediante la primera y segunda cobertura respectivamente ha permitido una mejor definición de la copa del árbol y la consecuente disminución del error de estimación de superficie de proyección de copa y altura total.

Finalmente, pensamos que existe margen de mejora en el método de individualización propuesto por JIMENEZ et al 2022 y seguido en el método de árbol individual en este estudio. Dicha mejora puede venir de dos vías. En primer lugar, la aplicación de dicho método sobre coberturas de mayor densidad de puntos LiDAR debe seguir mejorando la delimitación del borde de las copas, favoreciendo la localización de individuos. En segundo lugar, complementar el método de individualización mediante los datos obtenidos en campo, de forma que los valores máximos y mínimos de las variables inventariadas de superficie de proyección de copa y altura total queden establecidos como limitantes a la hora de generar individuos. De esta forma, se intuye que aumentar la fiabilidad de la individualización conllevaría una mejor estimación de biomasa arbórea por el método de árbol individual propuesto.

7. Agradecimientos

Este estudio ha sido realizado bajo el proyecto “Centro Ibérico para la Investigación y Lucha contra Incendios Forestales” CILIFO (0753_CILIFO_5_E) y financiado por el Programa de Cooperación Transfronteriza Interreg VA España-Portugal – Interreg POCTEP (2014-2020) quedando enmarcado dentro de la línea 4.1.5.1 de modelización, cuantificación y aprovechamiento de la biomasa orientado a la prevención de incendios forestales.

8. Bibliografía

ARIAS-RODIL, M.; DIÉGUEZ-ARANDA, U.; ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, J.; PÉREZ, CÉSAR.; CASTEDO-DORADO, F.; GONZÁLEZ-FERREIRO, E.; 2018. Modeling diameter distributions in radiata pine plantations in Spain with existing countrywide LiDAR data. *Annals of Forest Science*. 75(2).

ALBEROLA, J. S.; OLIVER, P.; ESTORNELL, J.; DOPAZO, C.; 2018. Estimación de variables forestales de *Pinus sylvestris* L. en el contexto de un inventario forestal aplicando tecnología lidar aeroportada. *GeoFocus*. 21: 79–99.

AMIRI, N.; 2014. Assessment of marker-controlled watershed segmentation algorithm for individual tree top detection and Crown delineation (Master thesis). University of Twente. Twente. 78.

AVENDAÑO HERNANDEZ, D. M.; ACOSTA MIRELES, M.; CARRILLO ANZURES, F.; ETCHEVERS BARRA, J. D.; 2009. Estimación de biomasa y carbono en un bosque de *Abies religiosa*. *Revista fitotecnica mexicana*. 32(3): 233–238.

BERNAL, N.; TRASSIERRA, A.; ESTEBAN, J.; TOMÉ, J.L.; SÁNCHEZ, T.; FERNÁNDEZ, A.; SABÍN, P.; 2017. Manual para la cuantificación de existencias de biomasa en masas forestales de matorral mediante metodología LiDAR.

BEYENE, S.M.; HUSSIN; Y.H.; KLOOSTERMAN, H.E.; HASMADI, M.; 2020. Forest Inventory and Aboveground Biomass Estimation with Terrestrial LiDAR in the Tropical Forest of Malaysia. *Can. J. Remote Sens*. 46(2): 130-145.

CALDERS, K.; NEWNHAM, G.G.; BURT, A.; MURPHY, S.; RAUMONEN, P.; HEROLD, M.; CULVENOR, D.; AVITABILE, V.; DISNEY, M.; ARMSTON, J.; et al.; 2015. Nondestructive estimates of above-ground biomass using terrestrial laser scanning. *Methods Ecol. Evol.* 6: 198–208.

CANGA, E.; DIEGUEZ-ARANDA, I.; AFIF-KHOURI, E.; CAMARA-OBREGON, A.; 2013. Above-ground biomass equations for *Pinus radiata* D.don in asturias. *Forest Systems*. 22(3):408–415.

CIESZEWSKI, C.J.; ZASADA, M.; LOWE, R.C.; LIU, S.; 2021. Estimating Biomass and Carbon Storage by Georgia Forest Types and Species Groups Using the FIA Data Diameters, Basal Areas, Site Indices, and Total Heights. *Forests*. 12: 141.

DASSOT, M.; CONSTANT, T.; FOURNIER, M.; 2011. The use of terrestrial LiDAR technology in forest science: application fields, benefits and challenges. *Annals of forest science*. 68(5): 959–974.

DISNEY, M.I.; BONI VICARI, M.; BURT, A.; CALDERS, K.; LEWIS, S.L.; RAUMONEN, P.; WILKES, P.; 2018. Weighing trees with lasers: Advances, challenges and opportunities. *Interface Focus*. 8: 20170048.

GARCÍA; M.; FIANO, D.; CHUVIECO, E.; DANSON, F.M.; 2010. Estimating biomass carbon stocks for a Mediterranean forest in central Spain using LiDAR height and intensity data. *Remote Sens. Environ*. 114: 816-830.

GARCÍA ROSA, M.; 2013. Estudio de la biomasa de *Cistus ladanifer* L. y *Retama sphaerocarpa* L. como sumidero de CO²: existencias y potencialidad. Badajoz, España. Tesis Doctoral. Departamento de Biología Vegetal, Ecología y Ciencias de la Tierra, Universidad de Extremadura.

GIL-YEPES, J.L.; RUIZ, L.A.; FERNÁNDEZ-SARRÍA, A.; HERMOSILLA, T.; 2012. Detección y localización de árboles en áreas forestales empleando datos LiDAR y ortofotografías. *MAPPING*. 155: 20–26.

GÓMEZ, C.; LOPEZ-SANCHEZ, J. M.; ROMERO-PUIG, N.; ZHU, J.; FU, H.; HE, W.; XIE, Q.; 2021. Canopy Height Estimation in Mediterranean Forests of Spain With TanDEM-X Data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 14: 2956–2970.

GÓMEZ-DÍAZ, J. D.; ETCHEVERS-BARRA, J. D.; MONTERROSOS-RIVAS, A. I.; CAMPO-ALVEZ, J.; TINOCO-RUEDA, J. A.; 2011. Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Quercus magnoliaefolia*. *Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente*. 17(2): 261–272.

GÓMEZ-GARCÍA, E.; 2021. Estimation of primary forest harvest residues and potential bioenergy production from fast-growing tree species in NW Spain. *Biomass and Bioenergy*. 148: 106055.

GONÇALVES, A.C.; MALICO, I.; SOUSA, A.M.O.; 2021. Energy production from forest biomass: An overview. *Forest Biomass—From Trees to Energy*. 1–23.

GONZÁLEZ-FERREIRO, E.; DIÉGUEZ-ARANDA, U.; MIRANDA, D.; 2012. Estimation of stand variables in *Pinus radiata* D. Don plantations using different LiDAR pulse densities. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 85(2): 281–292.

GONZÁLEZ-FERREIRO, E.; MIRANDA, D.; BARREIRO-FERNÁNDEZ, L.; BUJAN, S.; GARCÍA-GUTIERREZ, J.; DIÉGUEZ-ARANDA, U.; 2013. Modelling stand biomass fractions in Galician *Eucalyptus globulus* plantations by use of different LiDAR pulse densities. *For. Syst.* 22: 510–525.

GONZÁLEZ-JARAMILLO, V.; BUJÁN, S.; GONZÁLEZ-FERREIRO, E.; BARREIRO-FERNANDEZ, L.; DIEGUEZ-ARANDA, U.; MIRANDA, D.; 2013. Caso de estudio: estimación de volumen a partir de datos LiDAR para pino radiata en el municipio de Guitiriz. *Geoespacial*. 10: 45–57.

GONZÁLEZ DE TANAGO, J.; LAU, A.; BARTHOLOMEUS, H.; HEROLD, M.; AVITABILE, V.; RAUMONEN, P.; MARTIUS, C.; GOODMAN, R.C.; DISNEY, M.; MANURI, S.; et al.; 2018. Estimation of above-ground biomass of large tropical trees with terrestrial LiDAR. *Methods Ecol. Evol.* 9: 223–234.

GUERRA-HERNÁNDEZ, J.; BASTOS GÖRGENS, E.; GARCÍA-GUTIÉRREZ, J.; ESTRIVIZ RODRIGUEZ, L.C.; 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(1): 185-204.

GUERRA-HERNÁNDEZ, J., PASCUAL, A.; 2021. Using GEDI lidar data and airborne laser scanning to assess height growth dynamics in fast-growing species: a showcase in Spain. *Forest Ecosystems*, 8(1): 1–17.

HOSSAIN, M.; SAHA, C.; SIDDIQUE, M. R. H.; ABDULLAH, S. R.; ISLAM, S. Z.; MONDOL, F. K.; MATIEU, H.; 2021. Development of Allometric Biomass Models for *Hevea brasiliensis* Müll. Arg. Plantation of Bangladesh: A Non-Destructive Approach. *Indian Forester*. 147(4): 366–373.

JIMÉNEZ, A.; VÁZQUEZ, J.; CALZADO, A.; 2022. Individualización de copas en encinares (*Quercus ilex* L.) mediante el empleo de técnicas de segmentación de imágenes y clasificación por objetos. *Geofocus*. [En revisión].

JIMÉNEZ, E.; VEGA, J.A.; FERNÁNDEZ-ALONSO, J.M.; VEGA-NIEVA, D.; ORTIZ, L.; LÓPEZ-SERRANO, P.M.; LÓPEZ-SÁNCHEZ, C.A.; 2017. Estimation of aboveground forest biomass in Galicia (NW Spain) by the combined use of LiDAR, LANDSAT ETM+ and National Forest Inventory data. *IFOREST*. 10: 590–596.

KOTIVUORI, E.; KORHONEN, L.; PACKALEN, P.; 2016. Nationwide airborne laser scanning based models for volume, biomass and dominant height in Finland. *Silva Fenn*. 50: 1-28.

KWAK, D.A.; LEE, W.K.; LEE J.H.; BIGING, G.S.; GONG, P.; 2007. Detection of individual trees and estimation of tree height using LiDAR data. *J. For. Res.* 12: 425–434.

LAU, A.; CALDERS, K.; BARTHOLOMEUS, H.; MARTIUS, C.; RAUMONEN, P.; HEROLD, M.; VICARI, M.; SUKHDEO, H.; SINGH, J.; GOODMAN, R.C; 2019. Tree Biomass Equations from Terrestrial LiDAR: A Case Study in Guyana. *Forests*. 10: 527.

LEKUONA, I.; MONTEALEGRE, A.L.; LAMELAS, M.T.; 2017. Cartografía de la biomasa aérea total en masas de *Pinus radiata* D. Don a partir de datos públicos LiDAR-PNOA e Inventario Forestal Nacional. *GeoFocus*. 20: 87–107.

LIM, K.S.; TREITZ, P.M.; 2004. Estimation of aboveground forest biomass using airborne scanning discrete return LIDAR in Douglas-fir. *Int. Arch. Photogram. Rem. Sens. Spatial Inform. Sci.* 36: 149-152.

MCGAUGHEY, R.J.; 2015. Fusion/LDV: Software for LiDAR Data Analysis and Visualization; USDA Forest Service, Pacific Northwest Research Station: Portland, OR, USA.

MITMA; 2021. *Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA)*. Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana. [Consulta: 21-12-2021]. Disponible en <https://pnoa.ign.es/presentacion-y-objetivo>

MONTERO, G.; PASALODOS-TATO, M.; LOPEZ-SENEPLEDA, E.; ONRUBIA, R.; MADRIGAL, G.; 2013. Ecuaciones para la estimación de la biomasa en matorrales y arbustados mediterráneos. 6º Congreso Forestal Español. Sociedad Española de Ciencias Forestales. Vitoria-Gasteiz, España.

MONTERO, G.; RUIZ-PEINADO, R.; MUÑOZ, M.; 2005. Producción de biomasa y fijación de CO² por los bosques españoles. Monografías INIA, Serie forestal nº 13. Madrid, España.

MOMO TAKOUDJOU, S.; PLOTON, P.; SONKÉ, B.; HACKENBERG, J.; GRIFFON, S.; DE COLIGNY, F.; KAMDEM, N.G.; LIBALAH, M.; MOFACK, G.I.I.; LE MOGUÉDEC, G.; 2018. Using terrestrial laser scanning data to estimate large tropical trees biomass and calibrate allometric models: A comparison with traditional destructive approach. *Methods Ecol. Evol.* 9: 905–916.

NILSSON, M.; NORDKVIST, K.; JONZÉN, J.; LINDGREN, N.; AXENSTEN, P.; WALLERMAN, J.; EGBERTH, M.; LARSSON, S.; NILSSON, L.; ERIKSSON, J.; et al.; 2017. A nationwide forest attribute map of Sweden predicted using airborne laser scanning data and field data from the National Forest Inventory. *Remote Sens. Environ.* 194: 447–454.

NILSSON, M.; 1996. Estimation of tree heights and stand volume using an airborne lidar system. *Remote Sens. Environ.* 56(1): 1-7.

NOVO-FERNÁNDEZ, A.; BARRIO-ANTA, M.; RECONDO, C.; CÁMARA-OBREGÓN, A.; LÓPEZ-SÁNCHEZ, C.A.; 2019. Integration of National Forest Inventory and nationwide Airborne Laser Scanning data to improve forest yield predictions in north-western Spain. *Remote Sens.* 11: 1693.

PACKALÉN, P.; PITKÄNEN, J.; MALTAMO, M.; 2008. Comparison of individual tree detection and canopy height distribution approaches: a case study in Finland. En HILL, R.; ROSSETTE, J.; SUÁREZ, J. (eds.): 8th International Conference on LiDAR Applications in Forest Assessment and Inventory. 22–29. Proceedings of SilviLaser. Edinburgh, UK.

PATENAUDE, G.; HILL, R.A.; MILNE R.; GAVEAU D.L.A.; BRIGGS, B.B.J.; DAWSON T.P.; 2004. Quantifying forest above ground carbon content using LiDAR remote sensing. *Remote Sens. Environ.* 93: 368-380.

PATIÑO, S.; SUÁREZ, L.N.; ANDRADE-CASTAÑEDA, H.J.; SEGURA-MADRIGAL, M.A.; 2018. Captura de carbono en biomasa en plantaciones forestales y sistemas agroforestales en Armero-Guayabal, Tolima, Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental.* 9(2):121–133.

PFA; 2002. Plan Forestal Español. Ministerio de Medio Ambiente. 9–17. Madrid, España.

PNIEC; 2020. Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030. Ministerio de Transición Ecológica y el Reto Demográfico. 37–59. Madrid, España.

SHOOT, C.; ANDERSEN, H. E.; MOSKAL, L. M.; BABCOCK, C.; COOK, B. D.; Morton, D. C.; 2021. Classifying Forest Type in the National Forest Inventory Context with Airborne Hyperspectral and Lidar Data. *Remote Sensing.* 13(10): 1863.

RAHMAN, M.Z.; GORTE, B.G.; 2009. Tree Crown delimitation from high resolution airborne LiDAR base on densities of high point. ISPRS workshop Laserscanning 2009. Paris, France.

TEIDE, D.; HOCHLEITNER G.; BLASCHKE, T.; Afull Gis-based form tree identification and tree crown delineation using laser scanning. STILLA, U.; ROTTENSTEINER, F.; HINZ, S. (eds): CMRT05. IAPRS, Vol. XXXVI, Part 3/W24.

TRASSIERRA, A.; ESTEBAN, J.; FERNÁNDEZ-LANDA, A.; SABÍN, P.; SÁNCHEZ PELLICER, T.; TOMÉ, J.L.; 2017. Modelos de estimación de carga de biomasa aérea de matorral a partir de diferentes fuentes de información: LiDAR y Landsat. 7CFE01-083. Gestión del monte: servicios ambientales y bioeconomía. 26-30 junio. Sociedad Española de Ciencias Forestales 1-11.

VÁSCONEZ, N.L.; SEVILLA, H.C.; 2018. Uso De Los Sensores Remotos En Mediciones Forestales. *European Scientific Journal*. 14(15): 58–77.

WANG, Y.; ZHANG, X.; GUO, Z.; 2021. Estimation of tree height and aboveground biomass of coniferous forests in North China using stereo ZY-3, multispectral Sentinel-2, and DEM data. *Ecological Indicators*. 126: 107645.

WAN MOHD JAAFAR, W.S.; WOODHOUSE, I.H.; SILVA, C.A.; OMAR, H.; ABDUL MAULUD, K.N.; HUDAK, A.T.; KLAUBERG, C.; CARDIL, A.; MOHAN, M.; 2018. Improving Individual Tree Crown Delineation and Attributes Estimation of Tropical Forests Using Airborne LiDAR Data. *Forests*. 9(12): 759