



Editores:
Luis Ángel Ruiz
Javier Estornell
Manuel Erena

TELEDETECCIÓN

NUEVAS PLATAFORMAS Y SENSORES

APLICADOS A LA GESTIÓN DEL AGUA, LA AGRICULTURA Y EL MEDIO AMBIENTE

Aplicaciones de LiDAR para inventario forestal exhaustivo y cartografía de la estructura 3D en una dehesa mediterránea

Martínez Prentice, R. ^(1,2), Vicente, C. ⁽²⁾, Ortega, S. ⁽²⁾, Burgos, T. ⁽²⁾, Montalvo, J. ^(1,2)

¹ Departamento de Ecología y Biología Animal, Edificio de Ciencias Experimentales, Universidad de Vigo. 36310, Vigo, España. martinez.prentice@gmail.com, jmontalvo@uvigo.es

² Fundación Matrix, Investigación y Desarrollo Sostenible, Plaza Miralles, Local A5, Campus Universidad de Vigo, 36310, Vigo, España. cesar.cartog@gmail.com, sortega.estad@gmail.com, tamaraburgos44@gmail.com

Resumen: La tecnología LiDAR es muy utilizada para el estudio de la vegetación forestal. Sin embargo, si la densidad de puntos LiDAR es baja, su aplicabilidad supone un desafío para caracterizar la arquitectura de árboles individuales. Los objetivos principales del presente trabajo son ensayar aplicaciones para describir la variabilidad de la arquitectura de árboles con copa relativamente pequeña y realizar un inventario exhaustivo en una dehesa, vegetación formada por árboles dispersos, usando datos LiDAR de baja densidad. Se estudia un área de dehesa de encinas y alcornoques (215 ha) del Parque Natural Sierra de Hornachuelos (Córdoba). Se usan datos de campo de altura y arquitectura de copa de árboles usando LiDAR del PNOA de 2014, y dos enfoques, árbol individual y áreas. Los resultados preliminares muestran a nivel de árbol individual una relación negativa entre la penetración de los pulsos LiDAR y la densidad de copa (concentración de biomasa foliar y leñosa) estimada desde datos LiDAR. A nivel de árbol, la altura dominante del dosel y el volumen de copa se estiman con una alta fiabilidad estadística, sin diferencias significativas entre especies. A nivel de área, los modelos predictivos satisfactorios obtenidos demuestran que los datos LiDAR de baja densidad son aplicables para estimar y cartografiar la cobertura arbórea total, la altura dominante del dosel y probablemente la densidad de individuos, permitiendo un inventario exhaustivo en territorios extensos de dehesa.

Palabras clave: altura de la vegetación, arquitectura de copa, dehesa, dosel arbóreo, LiDAR.

LiDAR applications for exhaustive forest inventory and 3D structure mapping in a Mediterranean dehesa

Abstract: LiDAR technology is highly used for forest vegetation studies. Nevertheless, the applicability of low point-density LiDAR data is a challenge for architecture characterization of individual trees. The main objectives of this work are to test low point-density LiDAR data applications to describe the variability of the architecture of individual trees with relatively small crown and to carry out a comprehensive inventory of tree vegetation in a dehesa, a vegetation formed of scattered trees. A dehesa of cork oaks and holm oaks (215 ha) in Parque Natural Sierra de Hornachuelos (Córdoba) was studied. Field data of tree height and crown architecture and LiDAR data from PNOA (2014), and two approaches, tree penetration and crown density (leaf and woody biomass concentration), that was estimated using LiDAR data. At tree-level, dominant canopy height and the crown volume were estimated with high statistical reliability, and there were no significant differences between species. At area-level, satisfactory predictive models were obtained which demonstrate that the low point-density LiDAR data are applicable for estimating and mapping total tree cover, dominant canopy height and probably tree density, allowing a wall-to-wall inventory in extensive lands of dehesa.

Keywords: vegetation height, crown architecture, dehesa, LIDAR, tree canopy.

1. INTRODUCCIÓN

La teledetección con LiDAR (*Light Detection And Ranging*) se ha convertido en una herramienta imprescindible para el estudio exhaustivo de la vegetación arbórea. Muchas publicaciones implementan esta tecnología para caracterizar la vegetación (p. ej. Vega *et al.*, 2016). La nube de puntos permite obtener interesantes variables de interés ecológico y forestal con aplicación a inventarios de ecosistemas forestales, especialmente si la densidad de la nube de puntos es elevada y si se dispone de modelos de calibración apropiados (Wulder *et al.*, 2012). Sin embargo, debido a los altos costes de obtención de datos LiDAR de alta densidad de puntos en territorios extensos y heterogéneos no es habitualmente aplicable esta tecnología. En el

presente trabajo se explora la viabilidad del uso de datos de baja densidad de puntos del PNOA para caracterizar y cartografiar la vegetación arbórea de dehesas. Este tipo de vegetación representa un reto especial por la distribución dispersa y con baja densidad de árboles con copas relativamente pequeñas que supone una incertidumbre en la calidad de las variables derivadas de datos LiDAR. Además, los árboles más importantes en dehesa, como encina y alcornoque, presentan una copa singular, semicerrada que limita parcialmente la capacidad de intercepción de los pulsos láser. El haz de energía emitido desde un sensor aerotransportado penetra la copa de los árboles devolviendo un único o varios retornos hasta llegar al suelo; o bien, es reflejado antes por la vegetación. Por esto, se forma una nube de

puntos discretos que se puede estratificar según alturas de vegetación, describiendo una estructura 3D (Ferraz *et al.*, 2012).

Los objetivos específicos son: (1) describir cuantitativamente la variabilidad de la arquitectura individual de la copa de árboles de dehesa y su relación con la penetración de los pulsos LiDAR; (2) ensayar aplicaciones de datos LiDAR para inventario exhaustivo de vegetación arbórea de dehesa, y (3) evaluar la utilidad de los datos del proyecto PNOA-LiDAR para conocer la estructura 3D de la vegetación leñosa de una forma fiable.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

Se estudia un área de dehesa de encinas y alcornoques de 214,6 ha de la finca Zahurdillas, ubicada en el Parque Natural Sierra de Hornachuelos, situado en el sector central de Sierra Morena en la provincia de Córdoba.

2.2. Variables medidas

Se ha realizado un muestreo de 150 árboles de encina, alcornoque y acebuche. Cada individuo ha sido georreferenciado mediante el uso de un receptor GPS R8 GNSS de Trimble de precisión centimétrica. En cada árbol se ha medido la altura dominante (Ht) y la altura de la base de la copa (Hc), medidos con un hipsómetro Vertex Laser VL5. La longitud de copa se estimó por diferencia entre estas variables ($Lc = Ht - Hc$). El área de copa (Ac) se ha calculado a partir de la digitalización de árboles individuales con herramientas SIG empleando ortofotografías con una resolución $0,5 \times 0,5$ m del PNOA cedidas por el Instituto Geográfico Nacional (IGN; junio de 2014). El volumen de copa (Vc) se ha estimado considerando las variables anteriores asimilándolo a la forma de un paraboloides. La Tabla 1 resume el rango de variación de las variables medidas.

También se ha realizado un muestreo aleatorio de 17 parcelas de 30×30 m. En cada parcela se han registrado los árboles presentes (N=número total de árboles) y obtenido las mismas variables descritas para los árboles, excepto la cobertura arbórea total (CAT) que se ha calculado del mismo modo descrito anteriormente para Ac. La altura dominante del dosel arbóreo (Htd) se ha estimado como el percentil 95 de los valores de Ht de todos los árboles dentro de cada parcela, de forma similar al indicador usado por otros autores (p. ej. Gopalakrishnan *et al.*, 2015).

2.3. Fuente y procesado de datos LiDAR

Mediante las ortofotografías del PNOA se ha delimitado el área de estudio, centrada en vegetación de dehesa de la finca estudiada. Se han usado datos LiDAR del PNOA en formato LAS cedidos por el IGN. Las nubes de puntos han sido capturadas mediante vuelo (realizado entre diciembre de 2014 y enero de 2015) empleando un sensor LiDAR con una densidad de $0,5$ puntos/m² y clasificación automática mediante TerraScan en ecos de suelo y de clases de altura de vegetación. Se ha empleado

el sistema geodésico de referencia ETRS89 y proyección UTM Huso 30.

La clasificación de ecos se ha verificado cuidadosamente y comprobado con ortofotografías digitales del PNOA y trabajo de campo, reclasificando o eliminando los puntos erróneamente clasificados.

Se ha elaborado un Modelo Digital del Terreno (MDT, 1×1 m) con puntos LiDAR clasificados como suelo mediante el método IDW (interpolación mediante distancia inversa ponderada). Se ha realizado un estudio a dos niveles: árboles individuales y área de vegetación (parcelas o celdas de 30×30 m). Se han extraído puntos de vegetación alta (ecos de copa, >3 m) del área de copas de árboles y de celdas en formato shape de punto, y se normalizaron según la altitud del MDT.

A partir de los puntos LiDAR contenidos en las copas individualizadas de los árboles y en el área de cobertura arbórea de las parcelas se han estimado diferentes variables mediante herramientas SIG. Para los árboles individuales: Ht_L (percentil 95 de la altura de los ecos de copa), Hc_L (diferencia entre percentil 80 y altura mínima de la altura de los ecos de copa), Lc_L (diferencia entre percentil 95 y el percentil 5 de la altura de los ecos de copa); Vc_L (calculado como Vc, desde Ac y Lc_L); índice de penetración de láser (IPL; similar al de Bouvier *et al.*, 2015), estimado como el porcentaje de ecos de suelo respecto al total de ecos; y densidad de copa (Dc), que es una medida de la concentración de biomasa foliar y leñosa, estimada como porcentaje de ecos de copa respecto al total. Para las parcelas, se ha obtenido la cobertura arbórea total (CAT_L), y altura dominante del dosel arbóreo (Htd_L). Los valores de CAT_L se han obtenido a partir de los ecos de copa mediante la generación de polígonos de agregación con geometría suavizada mediante el uso de herramientas SIG. Htd_L se ha obtenido como el percentil 85 de los ecos de copa.

Tabla 1. Rangos de variación de variables de los árboles.

Especie	Ht (m)	Hc (m)	Lc (m)	Ac (m ²)	Vc (m ³)
Encina	3,2-8,6	1,5-4,5	1,1-1,6	6,5-135	1,8-135
Alcornoque	4,1-9,4	1,7-4,9	1,2-5,2	20-130	4,2-113
Acebuche	3,3-8,3	1,2-4,3	1,4-5,7	4,6-58	1,6-53

Ht: altura dominante; Hc: altura de copa; Lc: longitud de copa; Ac: área de copa; Vc: volumen de copa.

2.4 Análisis estadístico y cartografía

Se ha obtenido el error típico de estimación (ETE, más conocido como RMSE) del MDT comparando la altitud de las celdas de 1×1 m con la altitud medida mediante GPS en una muestra de 149 puntos; así mismo, se ha calculado el coeficiente de correlación de Pearson. Se han usado modelos de regresión para expresar las relaciones entre las variables. En la muestra de árboles individuales, se ha utilizado el 80% para generar modelos de calibración (modelos estadísticos predictivos que expresan la relación entre la variable medida y la estimada mediante datos LiDAR) y el resto

para validación (evaluación del modelo predictivo). En el caso de parcelas, solo se ha hecho calibración. Las variables predictoras y los modelos de regresión se han seleccionado por su capacidad predictiva, según su AIC y ETE, tras verificar las hipótesis estadísticas, incluyendo los valores residuales. Las diferencias entre especies en los modelos de calibración se han analizado mediante ANCOVA.

Se ha estimado Htd en el área de dehesa con una resolución espacial de celdas de 30×30 m. Para la cartografía de la Htd se ha utilizado el modelo de calibración obtenido con los valores de Htd_L estimados en las parcelas de campo coincidentes con las dimensiones de las celdas.

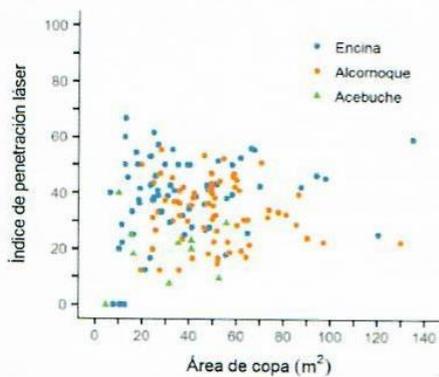


Figura 1. Relación entre el índice de penetración láser y el tamaño de copa de las especies estudiadas.

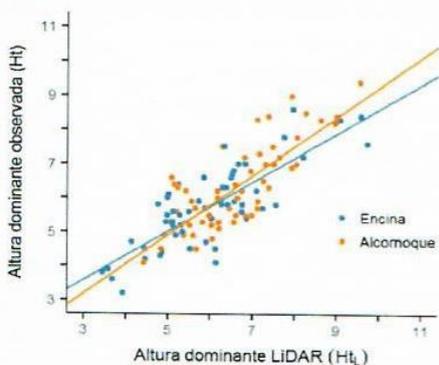


Figura 2. Relación entre la altura dominante observada y estimada desde datos LiDAR en la muestra de árboles individuales. Se indican los datos para las dos especies más importantes y las rectas de regresión respectivas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Penetración de pulsos LiDAR y estimación arquitectura de copas

Los resultados demuestran que la penetración de los pulsos LiDAR está inversamente relacionada con la densidad de copa ($r=-0,94$; $p<0,001$). Sin embargo, no observamos una relación clara entre el grado de penetración y el tamaño de la copa de los árboles individuales (Figura 1).

Existe una excelente estimación de la altura desde los datos LiDAR (MDT; $r=0,99$; $p<0,001$; ETE=0,49 m).

La Tabla 2 sintetiza los modelos de calibración obtenidos de parámetros asociados a la arquitectura de copas de los árboles individuales, así como su validación. Existe una elevada correspondencia entre la altura dominante estimada desde datos LiDAR y la observada a partir de los datos de campo (ETE<0,8 m), y sin diferencias destacables entre encina y alcornoque (Figura 2). Sin embargo, la fiabilidad de la estimación de la altura de copa es inferior, aunque significativa, siendo su ETE similar. Esto puede resultar de una menor penetración de los pulsos LiDAR a través de la copa de los árboles y, por tanto, menor información de los puntos de la altura inferior del dosel arbóreo. La longitud de copa de cada árbol se estima con precisión intermedia a la obtenida con las dos variables anteriores, y es bastante aceptable, con un ETE~0,8 m. Existe una relación potencial entre el volumen de copa observado y el estimado desde otras variables LiDAR. En ningún caso existen diferencias significativas entre especies para Lc, Hc y Vc. Por otra parte, la estimación del área de copa individual desde datos LiDAR, realizada con una muestra de 33 árboles por el mismo método usado para calcular CAT_L, es razonable ($r=0,67$; $p<0,001$).

Por tanto, es posible estimar la altura y arquitectura de copa de los árboles individuales de la dehesa (Tabla 1) de una manera fiable usando una baja densidad de puntos LiDAR, especialmente su área y volumen. La presencia de copas extendidas en dirección horizontal, característica de encina y alcornoque en dehesa, con más o menos volumen, permite una superficie de intercepción suficiente de los pulsos láser.

3.2. Inventario de vegetación arbórea

Los datos LiDAR permiten estimar la cobertura arbórea total por parcela con muy alta fiabilidad ($R^2=0,98$; $p<0,001$), ya que existe una relación lineal con la cobertura medida por digitalización, y un bajo ETE absoluto (51,7 m²) y relativo (14%). La cobertura arbórea estimada en toda la superficie de dehesa es el 39,6%.

Por otra parte, un modelo potencial entre el número de individuos y cobertura arbórea permite realizar un inventario exhaustivo del número total de árboles en la dehesa, así como estimar su variabilidad espacial, aunque con un ajuste limitado ($R^2=0,54$; $p<0,001$; ETE=4,3 m), probablemente por el bajo número de parcelas. El número total de árboles estimado en la dehesa es 19691. La densidad media es de 96,5 árboles/ha, teniendo el 71,3% de la superficie una densidad de 50-150 árboles/ha (CV=49%).

La altura dominante de la vegetación arbórea de dehesa puede estimarse con una fiabilidad razonable utilizando la variable estimada con datos LiDAR ($R^2=0,33$; $p<0,001$; ETE=0,54 m; ETE relativo=8,3%). Por tanto, los resultados preliminares demuestran que con baja densidad de puntos LiDAR es posible realizar un inventario exhaustivo de la altura de la vegetación arbórea en una superficie extensa de dehesa. La Figura 3 muestra

Tabla 2. Modelos de calibración para parámetros de la arquitectura de la copa de árboles. Se indican las ecuaciones predictivas y resultados de validación, conjuntamente para las tres especies estudiadas o para las dos más importantes.

Variable	Tipo de vegetación	N	Modelo de calibración			Validación		
			Ecuación	R ²	p	ETE*	N	ETE
Altura dominante (Ht)	Todas las especies	120		0,64	<0,001	0,79	30	0,78
	Encina	56		0,66	<0,001	0,70	14	0,86
	Alcornoque	56		0,65	<0,001	0,74	14	0,74
Altura de copa (Hc)	Encina	56		0,19	<0,001	0,67	14	0,58
	Alcornoque	56		0,13	0,005	0,66	14	0,63
Longitud de copa (Lc)	Encina	56		0,25	<0,001	0,83	14	0,94
	Alcornoque	56		0,39	<0,001	0,76	14	0,68
Volumen de copa (Vc)	Encina	56		0,82	<0,001	11,32	14	10,85
	Alcornoque	56		0,75	<0,001	7,90	14	7,32

Ht: altura dominante; Hc: altura de copa; Lc: longitud de copa; Vc: volumen de copa. El subíndice L indica que la variable se ha estimado desde datos LiDAR. Unidades de ETE: Ht, Hc y Lc: m; Vc: m³.

el mapa de la altura dominante de la vegetación arbórea, donde se aprecia una dominancia de la clase entre 6-7 m (74,6% de la superficie), una altura promedio de 6,6 m y una escasa variabilidad espacial (coeficiente de variación de 7,2%).

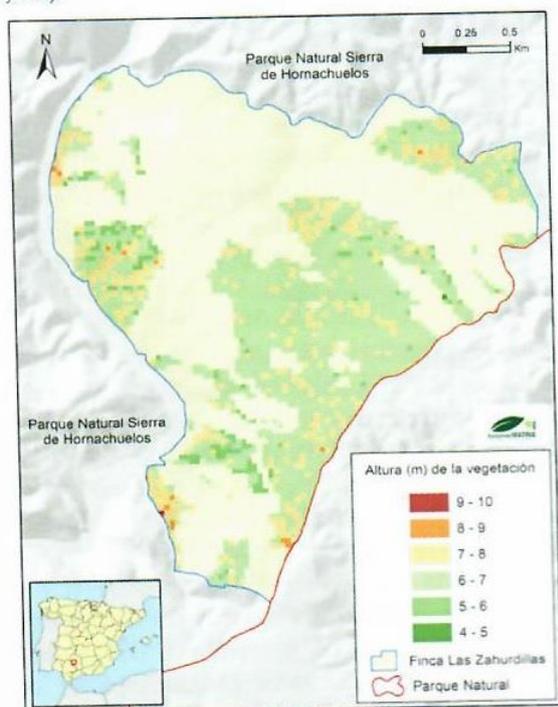


Figura 3. Mapa de alturas de la vegetación arbórea.

4. CONCLUSIONES

Los resultados preliminares evidencian que los datos LiDAR de baja densidad de puntos permiten interesantes aplicaciones en territorios extensos de dehesa:

- Estimar la altura de los árboles más típicos de la dehesa (encina y alcornoque), y caracterizar cuantitativamente la arquitectura de su copa de una manera fiable, en especial su área y volumen.
- Estimar la densidad de elementos en la copa de los árboles (concentración de biomasa foliar y leñosa),

inversamente relacionada con la penetración de los pulsos láser.

- Realizar un inventario exhaustivo de la altura de la vegetación arbórea y probablemente de la densidad de árboles.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es fruto del 'Programa de Investigación Ecológica y Territorial' de la Fundación Matrix, cofinanciado por el Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente. El IGN facilitó el acceso a datos LiDAR del PNOA. Agradecemos la colaboración de los propietarios de la finca Zahurdillas.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Bouvier, M., Durrieu, S., Fournier, R.A., Renaud, J.P. 2015. Generalizing predictive models of forest inventory attributes using an area-based approach with airborne LiDAR data. *Remote Sensing of Environment*, 156, 322-334.
- Ferraz, A., Bretar, F., Jaquemoud, S., Gonçalves, G., Pereira, L., Tomé, M., Soares, P. 2012. 3-D mapping of a multi-layered Mediterranean forest using ALS data. *Remote Sensing of Environment*, 121, 201-223.
- Gopalakrishnan, R., Thomas, V.A., Coulston, J.W., Wynne, R.H. 2015. Prediction of canopy heights over a large region using heterogeneous lidar datasets: efficacy and challenges. *Remote Sensing*, 7, 11036-11060.
- Véga, C., Renaud, J.P., Durrieu, S., Bouvier, M. 2016. On the interest of penetration depth, canopy area and volume metrics to improve Lidar-based models of forest parameters. *Remote Sensing of Environment*, 175, 32-42.
- Wulder, M.A., White, J.C., Nelson, R.F., Næsset, E., Ørka, H.O., Coops, N.C., Hilker, T., Bater, C.W., Gobakken, T. 2012. Lidar sampling for large-area forest characterization: A review. *Remote Sensing of Environment*, 121, 196-209.