

ESTIMACIÓN DE VARIABLES FORESTALES DE *PINUS SYLVESTRIS* L. EN EL CONTEXTO DE UN INVENTARIO FORESTAL APLICANDO TECNOLOGÍA LIDAR AEROPORTADA

JESÚS SÁNCHEZ ALBEROLA¹, PAULA OLIVER¹, JAVIER ESTORNELL², CARLOS DOPAZO³

¹ Fagus Foresta. C/ Alberola 9, 46013, Valencia, España

j.sanchez@fagusforesta.com, p.oliver@fagusforesta.com

²Depto. de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría. Grupo Cartografía GeoAmbiental y Teledetección – CGAT. Universitat Politècnica de València.

Camí de Vera s/n 46022, Valencia, España

jaescre@upv.es

³Instituto Universitario de Investigación de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA). Grupo de Ciencia y Tecnología Forestal Re-ForeST. Universitat Politècnica de València.

Camí de Vera s/n 46022, Valencia, España

cardogon@agf.upv.es

RESUMEN

El objetivo principal de este trabajo fue la realización de un inventario forestal a partir de datos LiDAR provenientes del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA; densidad nominal de puntos 0,5 m⁻²) para la estimación de las variables volumen de madera, densidad de árboles, área basimétrica, altura dominante, diámetro cuadrático medio y biomasa total aérea sobre una masa de *Pinus sylvestris* L. localizada en Nogueruelas (Teruel). La metodología empleada para la estimación de las variables se basó en el método ABA (*Area Based Approach*) que consiste en la estimación de variables forestales a nivel de parcela a partir de métricas de distribución de alturas extraídas de la información LiDAR. Los mejores resultados se obtuvieron para las variables volumen, área basimétrica, altura dominante y biomasa total aérea con coeficientes de determinación ajustados entre 0.88 y 0.92 lo que demuestra el potencial de estos datos en la realización de inventarios forestales.

Palabras clave: LiDAR, Inventario forestal, Ordenación forestal, Modelo Digital de Elevaciones, *Canopy Height Model*

Recibido: 19/09/2016

Aceptada versión definitiva: 18/06/2018

Editor al cargo: Dr. Martin Garbulsky

Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0)

© Los autores

www.geofocus.org

ESTIMATION OF FOREST VARIABLES OF PINUS SYLVESTRIS L. IN THE CONTEXT OF A FOREST INVENTORY APPLYING AIRBORNE LIDAR TECHNOLOGY

ABSTRACT

The aim of this study is to estimate a number of forest structure parameters by using airborne LiDAR data (nominal density of 0.5 points m⁻²) in the context of a forest inventory. The estimated variables are: volume, tree density, basal area, dominant height, mean square diameter and aboveground biomass for a stand of *Pinus sylvestris* L. located in Nogueruelas (Spain). The methodology used for the estimation of the variables is based on the ABA (Area Based Approach) method that involves deriving forest variables at the plot level from statistical distribution of heights extracted from LiDAR data. The best results were obtained for volume, basal area, dominant height, aboveground biomass and growth with adjusted R² values between 0.88 and 0.92. These results demonstrate the potential of LiDAR data for forest inventory applications.

Keywords: LiDAR, Forest inventory, Forest management, Digital Elevation Model, Canopy Height Model

1. Introducción

El inventario forestal es la base para la elaboración y redacción de los instrumentos de gestión forestal ya que supone la fase analítica en la ordenación de un monte (González *et al.*, 2006). Según Madrigal (1994) "la planificación de cualquier recurso requiere en primer lugar un conocimiento del mismo, de las restricciones posibles para su utilización y de los medios disponibles". El inventario comprende la recopilación de la información necesaria para desarrollar la gestión del monte (Delgado *et al.*, 2011). De esta forma el inventario forestal evalúa el monte de forma cuantitativa a través de la información proporcionada por variables forestales como el volumen de madera (de los troncos o fustes; medido con corteza), el área basimétrica (sumatorio de las superficies de las secciones de los troncos de los árboles de cada parcela medidas a 1,3 m sobre el nivel del suelo) o la altura dominante (altura media de los árboles dominantes, más gruesos, en la masa) y de manera cualitativa a partir de la recogida de cualidades del monte como su composición específica, salud o vigor. El inventario también calcula el volumen de madera que puede ser extraído anualmente en un monte y por lo tanto la planificación de la gestión sostenible de dicho recurso.

En términos generales los inventarios forestales son trabajos costosos que requieren de mucho tiempo para su realización y utilizan una gran cantidad de recursos. Los métodos de inventario forestal han variado enormemente con el transcurso de los años. A principios del siglo pasado los antiguos gestores forestales centraban sus esfuerzos en la determinación del volumen a través de inventarios de campo mediante la medición de todos los árboles de la masa forestal, lo cual suponía un trabajo tedioso e impracticable en algunas ocasiones. Más tarde con el desarrollo de los métodos de muestreo estadístico aparecieron las técnicas modernas de inventario forestal y tradicionalmente las más empleadas incluso en nuestros días (Corral y García, 2009). Las técnicas de muestreo están basadas principalmente en la estimación del coeficiente de variación del monte a través del estudio de un reducido número de parcelas de muestreo (muestreo piloto), para posteriormente calcular el número de parcelas necesarias para obtener una muestra significativa

Sánchez Alberola, J., 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 (Artículos)*, nº 21, p. 79-99. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.509>

según un margen de error acotado. Sin embargo, en muchas ocasiones, la limitación económica produce que el número de parcelas de inventario sea muy inferior al deseado, reduciéndose de esta manera la precisión de los resultados (Maltamo *et al.*, 2007). Por norma general en España la intensidad de muestreo está en torno a 1-4 parcelas por hectárea (Delgado *et al.*, 2011).

Hoy en día el desarrollo de la tecnología LiDAR (*Light Detection and Ranging*) ha puesto a disposición de los profesionales del sector forestal una herramienta con enorme potencial para la elaboración de inventarios forestales. La tecnología LiDAR aeroportada es un sistema de detección remota basado en un escáner laser anclado a un avión o helicóptero. Se trata de un sistema activo que emite un haz de energía electromagnética. El funcionamiento del sistema LiDAR consiste en la medición del tiempo que transcurre entre la emisión de un pulso laser y su llegada al sensor tras su reflexión de la superficie terrestre o de algún objeto elevado sobre ella, como puede ser la vegetación o los edificios. Dado que el sistema cuenta con un GPS y un sistema inercial (IMU), se pueden calcular con una elevada precisión las coordenadas de todos los pulsos de energía reflejados por la superficie terrestre. De este modo es posible convertir los datos registrados en puntos con coordenadas x, y, z, (donde x,y proporcionan la ubicación espacial del punto, y z su altura) y analizar la distribución de las alturas para conseguir datos sobre la cubierta forestal o la superficie topográfica (Dubayah y Drake, 2000; Peterson *et al.*, 2007; Maltamo *et al.*, 2007; González-Ferreiro *et al.*, 2012; Treitz *et al.*, 2012; Watt *et al.*, 2013).

La utilidad de la tecnología LiDAR aplicada al inventario forestal es una realidad creciente en el campo profesional. En la última década, numerosos trabajos de investigación desarrollados en el ámbito nacional e internacional han acreditado y testado su eficacia para el inventario de montes arbolados (Nelson *et al.*, 1988; Nilsson, 1996; Lefsky *et al.*, 1999; Drake *et al.*, 2002; Næsset, 2009; Hyypä *et al.*, 2012; Guerra *et al.*, 2016) y han obteniendo excelentes resultados en la estimación de variables forestales. La mayor ventaja de la utilización de la tecnología LiDAR es que permite la adquisición de datos con elevada precisión. En este sentido, atributos forestales como la biomasa, el volumen de madera, el área basimétrica, diámetro medio, altura media y altura dominante pueden ser estimados con mejor precisión que en los inventarios tradicionales (Naesset *et al.*, 2004). Si bien es cierto que la adquisición de datos LiDAR puede suponer un coste adicional, las investigaciones están dirigidas a optimizar el balance entre coste y precisión.

Desde hace pocos años, en España se puso a disposición de los usuarios la información de los vuelos LiDAR realizados en el marco del PNOA de baja densidad (densidad nominal de 0.5 puntos m²), que se ha convertido en un recurso de enorme valor para los profesionales del sector forestal por su potencial para la realización de inventarios forestales y la posibilidad de reducción de costes (Fabra, 2012). Para la aplicación de datos LiDAR en el ámbito forestal se pueden seguir dos enfoques: a) la extracción de copas de árboles individuales y la estimación posterior de sus parámetros principales; b) método de masa o *Area Based Approach, ABA*, (White,*et.al.*, 2013), basado en la relación estadística que se establece entre variables predictivas derivadas de la nube de puntos LiDAR y parámetros forestales en parcelas de inventario obtenidos a partir de las mediciones en campo. Estudios precedentes afirmaron que para aplicar el primer enfoque se requiere densidades superiores a las utilizadas en el presente estudio (Hyypä e Inkinen, 1999; Magnussen *et al.*, 1999). Una densidad baja de puntos LiDAR, como la utilizada en este trabajo (0.5 puntos m⁻²), indica que el número de puntos que pueden incidir sobre la copa de un árbol es insuficiente para su definición y extracción. Por este motivo se aplicó el enfoque *ABA* en este trabajo.

Sánchez Alberola, J., 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 (Artículos)*, nº 21, p. 79-99. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.509>

En el método *ABA* se calculan parámetros forestales a nivel de parcela a partir de las mediciones realizadas en campo. Estos parámetros representan las variables dependientes en los modelos de regresión. De esta manera, variables como el volumen de madera o el área basimétrica de las parcelas actúan como variables dependientes. Por otro lado, a partir de la información proporcionada por el sensor LiDAR, se calculan métricas de distribución de altura en la misma región que corresponde con el área de las parcelas y posteriormente se utilizan como variables independientes en el cálculo de los modelos predictivos. Una vez validados, los modelos son aplicados a toda la superficie del monte, aprovechando una de las principales ventajas de la tecnología LiDAR: la disponibilidad de datos para todo el territorio de estudio.

El objetivo general de este estudio es la estimación de parámetros forestales a nivel de parcela a partir de la información adquirida por un sensor LiDAR aerotransportado de baja densidad del PNOA en el contexto de un inventario forestal. En concreto se realizó una estimación de: densidad de árboles, área basimétrica, volumen de madera, altura dominante, biomasa total aérea y diámetro cuadrático medio de la masa de *Pinus sylvestris* L. perteneciente al monte de utilidad pública nº196 de Nogueruelas (Teruel).

2. Materiales y métodos

2.1. Zona de estudio

La zona de estudio abarca una superficie total de 1900 ha y se encuentra localizada al norte del municipio de Nogueruelas (Teruel) a unos 65 km de la ciudad (Figura 1). Su localización geográfica queda definida por el rectángulo de coordenadas UTM X máxima, Y máxima, X mínima, Y mínima (706903, 4466320, 696903, 4460320) en el huso 30 y sistema de referencia ETRS89. Se trata de una zona eminentemente forestal situada en plena Sierra de Gúdar. La altitud del área de estudio oscila entre los 600 y los 1800 m.s.n.m.. Las pendientes mayoritarias en el área de estudio son más suaves que en el entorno debido a que el monte se encuentra en zonas de altas plataformas, con la aparición de parameras de pendientes suaves típicas de algunas zonas de alta montaña. El clima se encuentra fuertemente condicionado por el relieve de la zona. Las precipitaciones son escasas, oscilando entre los 500 y algo más de 700 mm anuales en las cumbres, de los que buena parte cae en forma de copiosas tormentas estivales y otra parte en forma de nieve. En general las temperaturas medias están en torno a los 7 - 9 °C, con veranos cortos e inviernos largos, rigurosos y muy secos.

En cuanto a la vegetación, el área de trabajo se encuentra principalmente poblada por masas de *Pinus sylvestris* L. El pino albar es una especie cuya producción ha sido tradicionalmente muy valorada en España y en la comarca. Su importancia no solamente reside en su madera, ya que también cumple una importante función ecológica (González, 2006). Actualmente, las masas boscosas de pino albar del monte nº 196 se encuentran profundamente afectadas por la acción del muérdago (*Viscum album* L). El muérdago es una planta parásita que se desarrolla sobre las ramas o tronco de algunas especies arbóreas. Como parásito se nutre de la savia que fluye por los conductos del árbol, provocando como consecuencia la inmediata merma de su crecimiento y su vigor.

Sánchez Alberola, J., 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 (Artículos)*, nº 21, p. 79-99. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.509>

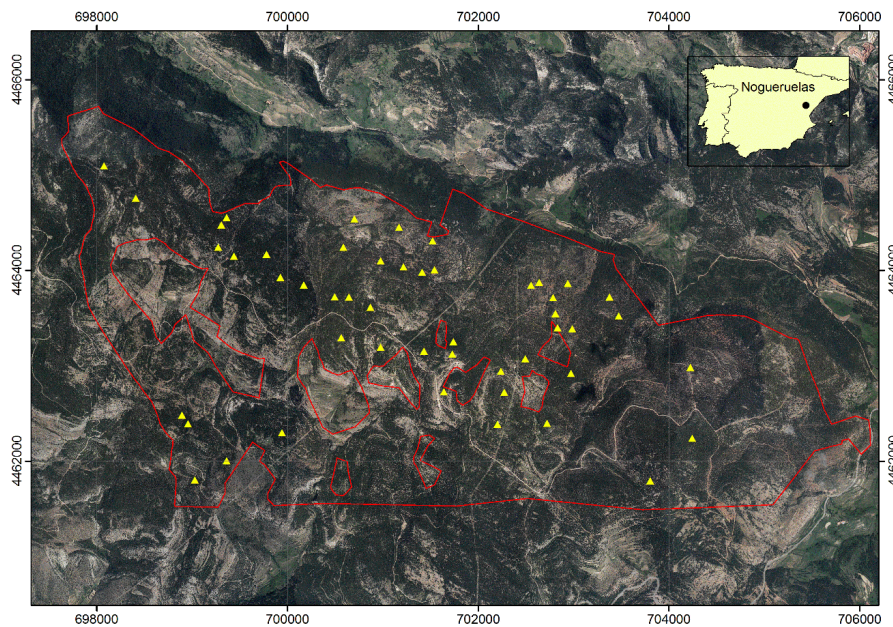


Figura 1. Localización de las parcelas de muestreo (color amarillo) en la zona de estudio (color rojo). Ortofoto correspondiente al PNOA cedida por © Instituto Geográfico Nacional)

2.2. Datos LiDAR

Los datos LiDAR fueron adquiridos a partir del vuelo del PNOA en 2010 en la comunidad de Aragón. Según las especificaciones técnicas del proyecto LIDAR-PNOA (LiDAR-PNOA cedido por © Instituto Geográfico Nacional), para los vuelos realizados a partir de 2009 se utilizó el sensor RIEGL LMS – Q680. Los parámetros técnicos de adquisición de los datos LiDAR fueron: frecuencia de pulso 70 kHz; frecuencia de escaneado 46 Hz; campo de visión (FOV) 60°; densidad nominal de puntos 0.5 m⁻². Los datos LiDAR originales se almacenaron en archivos con formato LAS en cuadrículas de 2 x 2 km incluyendo las coordenadas de los puntos (x, y, z) en la proyección UTM zona 30 y en el sistema de referencia ETRS89.

Los datos LiDAR se procesaron mediante el programa de acceso libre FUSION 3.42, del Servicio Forestal de los EEUU, (McGaughey, 2010). Se trata de una herramienta que permite procesar datos LiDAR de manera eficiente y generar diferentes productos que se detallan a continuación. La primera herramienta que se utilizó fue el comando *filterdata* para eliminar puntos anómalos. De esta manera se eliminaron puntos con coordenadas muy superiores o muy inferiores respecto a los valores observados en una malla de referencia. Se seleccionaron valores de ± 5 multiplicados por la desviación estándar y tamaños de ventana de 100 m. El siguiente paso consistió en seleccionar los puntos pertenecientes a la superficie terrestre. Esta operación es fundamental para obtener un Modelo Digital de Elevaciones (MDE), superficie de referencia para normalizar los

Sánchez Alberola, J., 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 (Artículos)*, n° 21, p. 79-99. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.509>

puntos LiDAR respecto al suelo y así obtener las alturas de los puntos respecto esta superficie. Para ello se utilizó el comando *GroundFilter* de FUSION. Con los puntos seleccionados se generó el MDE de la zona de estudio utilizando el comando *Gridsurfacecreate*. La precisión del MDE obtenido se analizó a partir de la medición en el terreno de la elevación en 63 puntos con un GPS diferencial (Javad Maxor) utilizando la técnica *Real Time Kinematic (RTK)* mediante la cual se estacionó el equipo GPS sobre una estación fija con coordenadas conocidas que provee correcciones en tiempo real para el equipo GPS que se utiliza en las mediciones de campo. Estas correcciones son enviadas vía GPRS (vía internet de telefonía móvil) al equipo móvil. A partir de estos puntos se obtuvo un RMSE de 0,29 m, precisión aceptable para los objetivos del trabajo teniendo en cuenta las dimensiones de los árboles.

El siguiente paso consistió en extraer los puntos LiDAR de cada parcela y normalizarlos respecto al suelo. Esta operación se llevó a cabo mediante el comando *Clipdata* de FUSION que permite recortar datos LiDAR y normalizarlos respecto a la superficie topográfica. Para ello se utilizaron las coordenadas del centro de cada parcela, el radio de las mismas y el MDE obtenido en el paso anterior. De esta manera se obtuvieron 49 ficheros, tantos como parcelas de muestreo utilizadas, cuyos puntos quedan incluidos en cada parcela y alturas referidas al suelo. Finalmente para cada parcela se calcularon las métricas de la distribución de las alturas de los puntos LiDAR aplicando el comando *Cloudmetrics*. De esta manera se obtuvo un conjunto de métricas que son las variables independientes potenciales a utilizar en los modelos de regresión para estimar los parámetros forestales. Las métricas de distribución de alturas son medidas descriptivas de los datos de altura de los puntos LiDAR. Estos parámetros se corresponden con medidas de posición (percentiles, cuantiles), medidas de centralización (media, mediana, moda) y medidas de dispersión (varianza, coeficiente de variación) que los programas de procesamiento de datos LiDAR permiten calcular de forma rápida. Todas las métricas se calcularon para cada parcela considerando las alturas de los puntos incluidos en las mismas. Para evitar las alturas del suelo y de la vegetación baja (sotobosque, vegetación arbustiva) en el cálculo de las métricas se introdujo un umbral de 2 m. Las métricas calculadas por el comando *Cloudmetrics* fueron: mínimo, máximo, media, mediana, moda, desviación estándar, varianza, coeficiente de variación, distancia intercuartílica, asimetría, curtosis, desviación absoluta promedio, mediana de las desviaciones respecto a la mediana, mediana de las desviaciones absolutas respecto la moda, momentos de elevación, percentiles de elevación (5, 10, 20, 25, 30, 40, 60, 70, 75, 80, 90, 95), *canopy relief ratio* ((media - mínimo) / (máximo - mínimo)), media cuadrática, media cúbica, estimador de la fracción de la cabida cubierta (LFCC), porcentaje de primeros retornos sobre la media, porcentaje de primeros retornos sobre la moda, porcentaje de todos los retornos sobre la altura especificada, porcentaje de todos los puntos sobre la media, porcentaje de todos los puntos sobre la moda, (número de puntos por encima de una altura especificada/todos los primeros)*100, (número de retornos por encima de la media/todos los primeros)*100, (número de retornos por encima de la moda/todos los primeros)*100.

2.3. Muestreo de campo

En total se seleccionaron 49 parcelas circulares de 625 m² de superficie y un radio de 14,1 m distribuidas de forma aleatoria por los diferentes estratos de la zona de estudio con el objetivo de que los modelos de regresión a calcular tuvieran en cuenta la variabilidad de la masa forestal. Los datos de campo fueron tomados durante los meses de octubre y noviembre de 2014. Para analizar los posibles efectos del desfase entre la fecha del vuelo LiDAR (mes y año) y la toma de datos en

Sánchez Alberola, J., 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 (Artículos)*, nº 21, p. 79-99. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.509>

campo, se comprobó que no hubiera habido actuaciones de tala de árboles durante esos años (2010 a 2014) en las parcelas circulares seleccionadas para la realización del inventario. Se consultó a los responsables de la gestión del monte y se comprobó en la fase de toma de datos en campo.

Los parámetros medidos en campo fueron:

- Composición específica del arbolado.
- Número de árboles en el interior de la parcela
- Diámetro normal utilizando una forcípula Nestle, a 1.30 metros de altura, de todos los árboles mayores de 7.5 cm de diámetro; se tomó el diámetro en dos direcciones perpendiculares y se calculó la media de las dos medidas para disminuir el error de deformación del tronco.
- Altura total de dos árboles dominantes; entendidos como los más gruesos y cercanos al centro de la parcela (en un radio inferior a 8 metros), cumpliendo con la definición propuesta por Assman (1961 y 1970).
- Altura total de cinco árboles tipo que ni estando dominados ni torcidos representarían la altura media de la parcela. Para la medición de las alturas se utilizó un hipsómetro trigonométrico de ultrasonidos Vertex IV.
- Composición específica del matorral y porcentaje de ocupación en la parcela.

2.4. Cálculo de parámetros forestales en las parcelas de inventario

A partir de los datos de campo se calcularon las siguientes variables forestales: densidad de árboles (N), área basimétrica (G), diámetro cuadrático medio (Dg), altura dominante (Ho), volumen de madera (Vcc) y biomasa total aérea (BTA). Posteriormente estas variables se utilizaron como variables dependientes en el cálculo de los modelos de regresión, objeto del presente estudio. A continuación se desarrolla el proceso de cálculo para la estimación de cada una de ellas:

A) Densidad de árboles de la parcela (N)

El número total de árboles encontrados en cada una de las parcelas.

B) Área basimétrica de la parcela (G)

El área basimétrica de la parcela, está expresada como el sumatorio de las secciones normales de los árboles. Aparece expresada en m^2 por parcela y se calculó a través de la ecuación 1.

$$G = \sum \left(\frac{\pi}{4} \times dn^2 \right) \quad (1)$$

Donde dn , es el diámetro normal de cada árbol inventariado.

C) Diámetro cuadrático medio de la parcela (Dg)

Sánchez Alberola, J., 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 (Artículos)*, nº 21, p. 79-99. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.509>

Diámetro representativo de la parcela que se expresa en cm y es calculado mediante la ecuación 2.

$$Dg = \sqrt{\frac{\sum (dn^2)}{N}} \quad (2)$$

Donde dn , es el diámetro normal de cada árbol inventariado y N el número de árboles en la parcela.

D) Altura dominante (H_o)

Corresponde con la media aritmética de la altura de los dos árboles de mayor diámetro normal (dominantes) medidos en una parcela concéntrica de 200 m².

E) Volumen de madera (V_{CC})

Para la determinación de los volúmenes de los árboles individuales se aplicó el modelo indicado en el tercer inventario forestal nacional de la provincia de Teruel (IFN3) para la especie *Pinus sylvestris*, que se corresponde con el denominado Modelo 11 (ecuación 3).

$$V_{cc} = \frac{p \times (dn^q) \times (Ht^r)}{1000} \quad (3)$$

Donde V_{cc} es el volumen maderable con corteza en m³, dn el diámetro normal en mm y Ht altura total en m. Los parámetros p , q y r son fijados para cada modelo y forma de cubicación en el IFN3 de la provincia de Teruel. Para esta especie (*Pinus sylvestris* L) y formas de cubicación (FC, formas 2 y 3) toman los valores 0,0005197, 1,94303 y 0,98798, respectivamente. Una vez establecidos estos valores, la tarifa de cubicación del IFN3 es de doble entrada, siendo las variables independientes la altura y el diámetro de los árboles.

Como se puede observar en la ecuación 3 es necesario obtener la altura total de los árboles para obtener el valor del volumen de madera. La altura, a diferencia del diámetro, es una variable más difícil y costosa de medir debido a la alta densidad de árboles presentes en las parcelas no pudiendo distinguir claramente el ápice de los mismos en el campo, por lo que no se mide en todos los árboles de la parcela. La altura de cada uno de ellos se estima a partir de una relación altura-diámetro de tronco calculada a partir de los datos de los árboles tipo medidos en las parcelas. De forma general, en estas relaciones la altura actúa como variable dependiente (y) y el diámetro de tronco como variable independiente (x) en una relación lineal simple del tipo $y=a+bx$. El principal inconveniente que se encontró en esta relación simple es que no se adaptó bien a todas las situaciones que se encontraron en el monte, ya que la altura no depende únicamente del diámetro del tronco sino que existen una serie de variables como pueden ser la calidad de estación, la densidad de árboles, la edad, la competencia y sobre todo los tratamientos silvícolas, que pueden estar influyendo en la altura (Gadow *et al.*, 2001; Diéguez-Aranda *et al.*, 2005). Por este motivo se decidió introducir otros parámetros forestales como se describe a continuación para mejorar la

Sánchez Alberola, J., 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 (Artículos)*, nº 21, p. 79-99. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.509>

estimación de la altura total de cada árbol (López *et al.*, 2003). Por tanto, para poder obtener el valor de esta variable y así aplicar la ecuación 3 para el cálculo del volumen de madera a partir de los datos de campo (esta variable se estimará posteriormente a partir de los datos LiDAR) se consideraron como variables dependientes la altura total (*HT*) de los cinco árboles tipo medidos en cada una de las parcelas y como variables independientes, el diámetro normal (*dn*) en centímetros para cada uno de los árboles tipo, el diámetro cuadrático medio de la parcela (*Dg*) y una altura representativa de cada parcela en metros (*Hm*), entendida como la media de los cinco árboles tipo más los dos árboles dominantes medidos en la parcela. El modelo de regresión fue construido únicamente con 120 datos, dejando 119 para su posterior validación (*split sample validation*). Para evaluar la bondad del ajuste se comprobó que el modelo construido cumplía con las hipótesis de normalidad de los residuos, homocedasticidad, ausencia de colinealidad y test Reset de no linealidad, y se calculó la raíz del error cuadrático medio, el sesgo y el coeficiente de determinación ajustado. Una vez evaluado el modelo, se aplicó al resto de los árboles de las parcelas y se procedió al cálculo del volumen de madera de los árboles siguiendo el modelo propuesto por el IFN3. Con la suma del volumen de madera de todos los árboles individuales de cada parcela, se obtuvieron los volúmenes en m³ por parcela.

F) Biomasa total aérea (BTA)

Para el cálculo de la biomasa total aérea se utilizaron las tarifas propuestas por Montero *et al.* (2005). Estos modelos están elaborados para el cálculo de distintos tipos de biomasa a nivel de árbol, como puede ser la biomasa total aérea, la biomasa de fuste y la biomasa de ramas. Están contruidos para las principales especies forestales de España y su aplicación es nacional (ecuación 4).

$$Y = e^{\frac{SEE^2}{2}} * e^a * dn^b \quad (4)$$

Donde *Y* es la biomasa total aérea en kg de materia seca por árbol; *SEE*, error estándar de la estimación (0,246887); *dn*, diámetro normal en centímetros; *a* y *b*, parámetros definidos para la especie y la variable de biomasa que se desee calcular siendo -2,50275 y 2,41194, respectivamente. La biomasa total aérea de la parcela se obtuvo como el sumatorio de la biomasa total aérea calculada para cada árbol. Posteriormente el cálculo se transformó en toneladas por parcela, para el cálculo de los modelos de regresión con datos LiDAR.

2.5. Ajuste y validación de los modelos de regresión a partir de datos LiDAR

En este apartado se describe la metodología seguida para el cálculo de los modelos de regresión considerando los parámetros forestales obtenidos en el paso anterior y las métricas LiDAR. La expresión general de los modelos predictivos se puede expresar a partir de la ecuación 5.

$$y = \beta_0 + \beta_1 * X_1 + \beta_2 * X_2 + \dots + \beta_n * X_n + \varepsilon \quad (5)$$

Sánchez Alberola, J., 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 (Artículos)*, nº 21, p. 79-99. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.509>

Donde:

y : Parámetros forestales a estimar (N , G , Dg , Ho , Vcc , BTA).

β_n : Coeficientes de cada modelo.

X_n : Métricas LiDAR calculadas para el área de la parcela.

\mathcal{E} : incertidumbre

Para cada una de las variables dependientes (N , G , Dg , Ho , Vcc , BTA) el proceso de ajuste de los modelos fue idéntico por ello se tratarán todas en su conjunto. En total se calcularon 6 modelos, tantos como variables forestales a estimar. Se consideraron como variables dependientes los parámetros forestales calculados a partir de los datos de campo aplicando las ecuaciones 1-4 y como variables independientes las métricas derivadas de los datos LiDAR en las 49 parcelas. Para la construcción de los modelos de predicción, se utilizó el método de pasos sucesivos con un nivel de significación de 0,05. Se utilizó el paquete estadístico R (R Core Team, 2014). Los modelos construidos se sometieron a un proceso de diagnóstico para determinar si cumplían las hipótesis básicas de estadística paramétrica. Para evaluar si los residuos de cada uno de los modelos seguían una distribución normal se utilizó el test de Shapiro-Wilk con un nivel de significación de 0.05 que compara las diferencias entre una distribución normal teórica y la distribución de los residuos de los modelos. Por otra parte se comprobó la homocedasticidad o igualdad de las varianzas de los residuos de cada uno de los modelos a partir del test de Breusch-Pagan con un nivel de significación de 0.05. La posible multicolinealidad o medida de la correlación entre las variables explicativas de cada modelo, se evaluó a partir del índice de condición (IC), descartando modelos que sobrepasaran el valor de 30. Por último con el test Reset de no linealidad se verificó para un nivel de significación 0.05 si las combinaciones no lineales de las variables explicativas mejoraban la respuesta de los modelos. Es importante indicar que no se seleccionaron modelos cuyo tamaño de la muestra fuera menor a 20 veces el número de variables independientes presentes en los modelos (Peña, 2002), es decir modelos de más de dos variables dependientes en nuestro caso. La variable dependiente diámetro cuadrático medio se transformó aplicando el logaritmo neperiano para que cumplieran con las hipótesis de normalidad de residuos, homocedasticidad, ausencia de colinealidad y test de no linealidad realizados. Para evaluar la bondad del ajuste de forma numérica se calcularon los siguientes estadísticos: sesgo (S), raíz del error cuadrático medio (RMSE) y coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj}). Para la validación de los modelos, se utilizó el método de validación cruzada (*leave one out cross-validation LOOCV*). Para evaluar la robustez de los modelos construidos, se dividió el RMSE obtenido con la validación y el RMSE de los modelos ajustados. Valores cercanos a uno indican que los errores de ambos modelos son similares indicando la robustez de los mismos para estimar los parámetros forestales.

Para las variables volumen de madera (Vcc) y biomasa total aérea (BTA) no se dispuso de valores tomados de forma directa en las parcelas, que se pudieran utilizar como datos de partida de la variable dependiente para su estimación a partir de los datos LiDAR, sino de valores estimados a partir de otras variables medidas en las parcelas. Este hecho supone una limitación a la hora de poder estimar el error real, pues se deberían integrar los errores de cada uno de los modelos. El error indicado en estos casos es el del modelo LiDAR, suponiendo que los datos de las parcelas se ajustan a la realidad, aspecto que no es cierto, pues también han sido estimados previamente.

Sánchez Alberola, J., 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 (Artículos)*, n° 21, p. 79-99. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.509>

2.6. Aplicación de los modelos

Una vez calculados y validados los modelos se aplicaron a toda la superficie de inventario dado que la cobertura de datos LiDAR abarca todo el ámbito del área de estudio. Para la aplicación de los modelos sobre toda la superficie de inventario se utilizó la malla cuadrada de 25 x 25 m generada durante la fase de estratificación del inventario, para que se correspondiera el tamaño de celda con el tamaño de las parcelas circulares de 14,1 m de radio. Siguiendo el mismo criterio, para la aplicación del modelo de altura dominante se empleó una malla de 14 x 14 m, cuya superficie coincide con la parcela concéntrica de 8 m de radio sobre la que se midió esta variable. Como se ha comentado en otros apartados, estas mallas contienen el cálculo de las mismas métricas de distribución de altura utilizadas para el ajuste de los modelos en cada una de sus celdas, por lo que permiten la aplicación de los modelos de regresión calculados a partir de los datos LiDAR sobre cada una de ellas. Para la aplicación de los modelos en los que se realizó una transformación logarítmica de las variables independientes, fue necesario deslinealizar previamente el modelo. Al deslinealizar el modelo es necesario introducir un factor de corrección debido al sesgo sistemático (subestimación) que se produce al aplicar logaritmos a las variables independientes (Baskerville, 1972). Este factor de corrección es calculado a partir del error estándar (*SEE*) de la estimación del modelo según la siguiente expresión (7). El modelo deslinealizado resultante se obtendría a partir de la ecuación 8.

$$CF = e^{\frac{SEE^2}{2}} \quad (7)$$

$$y = CF * e^{\beta_0} * e^{(\beta_1 * x_1)} * e^{(\beta_2 * x_2)} * \dots * e^{(\beta_n * x_n)} \quad (8)$$

Donde y es la variable dependiente, CF el factor de corrección del sesgo, x_n las variables independientes y β_n los coeficientes de las variables.

Como resultado de la aplicación de los modelos a toda la superficie de estudio, aplicando las métricas LiDAR seleccionadas como variables significativas, se generaron diferentes mapas para cada una de las variables estimadas que se editaron con ArcGis 10 (ESRI 2011. ArcGIS Desktop: Release 10. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute). Respecto a la precisión de los modelos se considera que el error se asimila a la bondad del ajuste de los modelos de regresión y su posterior validación. La importancia reside en que los modelos de regresión recojan la mayor parte de la variabilidad contenida en el monte, tratando de asegurar que cuando los modelos sean aplicados sobre el resto de superficie del monte, no se sobrepasen los límites para los cuales fue construido (Condés *et al.*, 2013). De esta manera y con el objetivo de representar de forma gráfica la validez de los modelos predictivos, en la representación cartográfica de los resultados de la aplicación de los modelos para toda la superficie, se marcarán en color rojo las celdas cuyos resultados excedan los límites de predicción, valorando de esta manera si existen grandes superficies que excedan los límites de los modelos ajustados.

3. Resultados

En este apartado se describen y analizan los resultados obtenidos en el ajuste de los modelos de regresión que permiten estimar las variables forestales objeto de este estudio utilizando como variables independientes métricas LiDAR. En total, se han ajustado seis modelos de regresión correspondientes a: densidad de árboles por parcela (árboles/parcela); área basimétrica de la parcela (m^2 /parcela); logaritmo neperiano del diámetro medio cuadrático de la parcela (cm); altura dominante en una parcela concéntrica de $200 m^2$ (metros); volumen de madera de la parcela (m^3 /parcela); biomasa total aérea de la parcela (toneladas/parcela)

Tabla 1. Resumen de resultados del ajuste de los modelos predictivos de las variables forestales estimadas

Modelo	Variables independientes	RECM	Sesgo (S)	R ² ajustado
N (árboles/parcela)	LFCC, Percentil 30	14,33	0,000	0,52
G (m^2 /parcela)	Todos los retornos > 2 m, n° total retornos, CRR	0,18	-0,004	0,90
Ln(Dg) (cm)	Percentil 30 + Elev.MAD.mode	0,13	-0,001	0,56
Ho (m)	Elevación máxima	0,83	0,009	0,88
Vcc (m^3 /parcela)	Todos los retornos > 2 m, n° total retornos, percentil 75	1,11	0,001	0,92
BTA (Tn/parcela)	Todos los retornos > 2 m, n° total de retornos, percentil 75	0,82	-0,016	0,89

N densidad de árboles por parcela; G, área basimétrica; Dg, diámetro cuadrático medio; Ho, altura dominante; Vcc, volumen de madera; BTA, biomasa total aérea; LFCC (Porcentaje de primeros retornos sobre 2 metros). Es un estimador de la fracción de cabida cubierta.; CRR (Canopy relief ratio) = $((\text{mean} - \text{min}) / (\text{max} - \text{min}))$; Elev.MAD.mode: Mediana de las desviaciones absolutas respecto de la moda

El resumen de resultados (Tabla 1) muestra que los mejores ajustes, de acuerdo al coeficiente de determinación, se obtuvieron para las variables forestales área basimétrica, volumen de madera, altura dominante y biomasa total aérea con valores de R² entre 0,88 y 0,92. Los modelos que presentaron coeficientes de determinación más bajos se correspondieron con las variables densidad de árboles y diámetro medio cuadrático con valores de 0,52 y 0,59 respectivamente. Cabe destacar la importancia de las variables número de retornos con altura mayor a 2 m y el n° total de retornos en la estimación de las variables respuesta G, Vcc y BTA. (Tabla 2). Las ecuaciones de los modelos se pueden observar en la Tabla 3.

Sánchez Alberola, J., 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 (Artículos)*, nº 21, p. 79-99. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.509>

Tabla 2. Resultados de las hipótesis que evalúan la calidad de los modelos predictivos de las variables forestales.

Modelo	Normalidad p-value test Shapiro- wilks	Homocedasticidad p-value test Breuch – Pagan	No Linealidad p-value test reset	Multicolinealidad Índice de condición
N	0,38	0,18	0,08	9,3
G	0,18	0,09	0,11	14,28
Ln(Dg)	0,12	0,11	0,11	11,71
Ho	0,20	0,01	0,57	-----
Vcc	0,48	0,14	0,10	10,73
BTA	0,10	0,16	0,07	11,71

Tabla 3. Modelos de regresión

Modelo	VARIABLES INDEPENDIENTES
N (árboles/parcela)	$N = (13,741) - (3,82 \cdot \text{Percentil } 30) + (1,04 \cdot \text{LFCC})$
G (m ² /parcela)	$G = (-1,01) + (0,03 \cdot ((\text{Todos los retornos sobre } 2,00) / (\text{n}^\circ \text{ total retornos}) \cdot 100)) + (1,51 \cdot \text{CRR})$
Ln(Dg) (cm)	$\text{Ln_Dg} = (2,36) + (0,07 \cdot \text{Percentil } 30) + (0,11 \cdot \text{Elev MAD mode})$
Ho (m)	$\text{Ho} = (1,40) + (0,89 \cdot \text{Elevación máxima})$
Vcc (m ³ /parcela)	$\text{VCC} = (-9,33) + (0,14 \cdot ((\text{Todos los retornos sobre } 2,00) / (\text{n}^\circ \text{ total de retornos}) \cdot 100)) + (0,907309 \cdot \text{Percentil } 75)$
BTA (Tn/parcela)	$\text{BTA} = (-4,35) + (0,11 \cdot (\text{Todos los retornos sobre } 2,00) / (\text{n}^\circ \text{ total de retornos}) \cdot 100) + (0,36 \cdot \text{Percentil } 75)$

N densidad de árboles por parcela; G, área basimétrica; Dg, diámetro cuadrático medio; Ho, altura dominante; Vcc, volumen de madera; BTA, biomasa total aérea; LFCC (Porcentaje de primeros retornos sobre 2 metros). Es un estimador de la fracción de cabida cubierta.; CRR (Canopy relief ratio) = (((mean - min) / (max - min))); Elev.MAD.mode: Mediana de las desviaciones absolutas respecto de la moda

Como resultado de la aplicación de los modelos predictivos a la totalidad de las celdas del ámbito del estudio se han obtenido mapas cartográficos con los valores de las variables analizadas. En las Figuras 2, 3 y 4 se representan los mapas con los resultados obtenidos para las variables que se han estimado con una mayor precisión: el área basimétrica (G), la biomasa total aérea (BTA) y del volumen de madera.(Vcc). Se puede apreciar en los tres mapas calculados que los valores

Sánchez Alberola, J., 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 (Artículos)*, nº 21, p. 79-99. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.509>

obtenidos se encuentran en su gran mayoría dentro de los rangos para los que los modelos han sido calculados, quedando fuera de estos límites únicamente una parte mínima de las parcelas: 1,34 % para el caso de G, 0,36 % para BTA y 1,0 % para Vcc (áreas de color rojo). Asimismo se ha comprobado que las zonas con mayor biomasa y volumen se corresponden con zonas forestales muy densas.

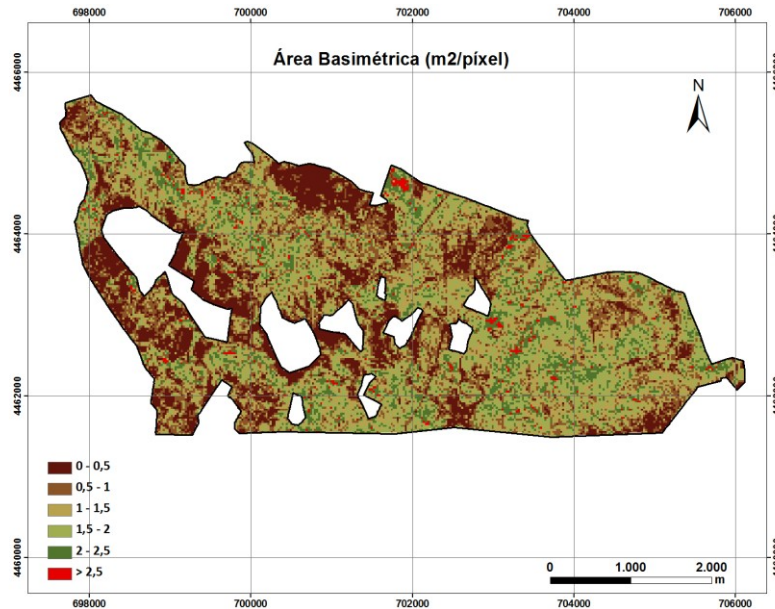


Figura 2. Distribución del área basimétrica ($m^2/píxel$) utilizando un tamaño de píxel de 25 m x 25 m

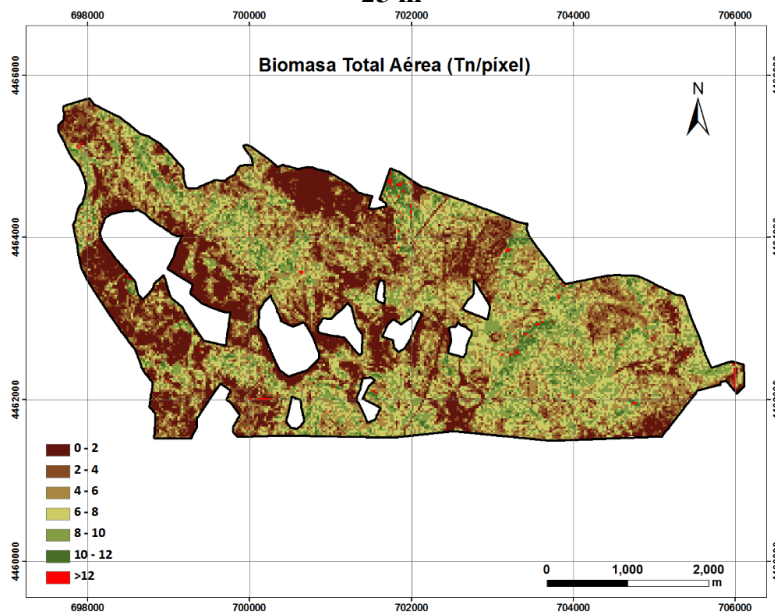


Figura 3. Distribución de la biomasa total aérea ($Tn/píxel$) utilizando un tamaño de píxel de 25 m x 25 m

Sánchez Alberola, J., 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 (Artículos)*, nº 21, p. 79-99. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.509>

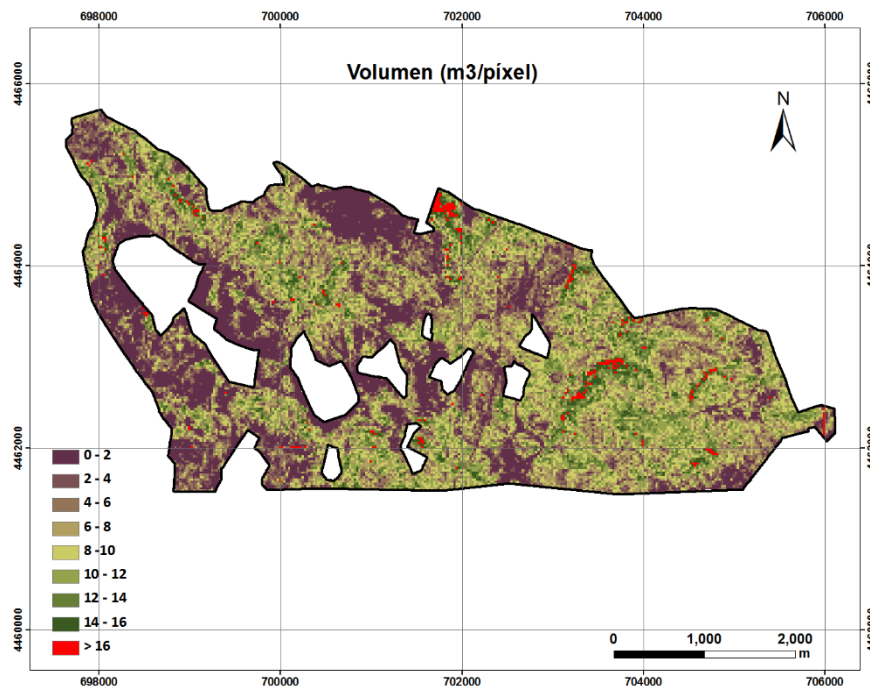


Figura 4. Distribución del volumen en la zona de estudio (m³) utilizando un tamaño de píxel de 25 m x 25 m.

Por otra parte, los resultados de la validación cruzada muestran que los modelos ajustados son bastante robustos. Para evaluar la robustez en términos numéricos, se ha comparado el valor del error cuadrático medio de los modelos ajustados con el error cuadrático medio de la validación (Tabla 4). Los resultados reflejan diferencias muy pequeñas en este estadístico para todos los modelos construidos (ratios entre RMSE, modelo-validación, superiores a 0,9 para todas las variables). También se ha analizado el valor de R² ajustado en los modelos y en la validación y se han observado valores similares.

Tabla 4. Resultados de las hipótesis que evalúan la calidad de los modelos predictivos de las variables forestales.

	Modelo			Validación		
	RMSE	Sesgo	R ²	RMSE	Sesgo	R ²
N	14.33	0,000	0,52	15,25	0,030	0,46
G	0.18	-0,004	0,90	0,20	0,005	0,88
Ln(Dg)	0.13	-0,001	0,56	0,14	-0,001	0,50
Ho	0.83	0,009	0,88	0,87	0,009	0,87
Vcc	1.11	0.001	0.92	1.19	0.002	0.91
BTA	0.82	-0.016	0.89	0.87	-0.017	0.88

4. Discusión

En términos generales, los resultados presentados en este trabajo coinciden con los resultados obtenidos en estudios similares (Naesset, 2002; Treitz *et al.*, 2012; Cabrera *et al.*, 2014). En la Tabla 5, se pueden observar los resultados obtenidos en diferentes estudios en comparación a los obtenidos en este trabajo. De los trabajos analizados, Naesset (2002) y Treitz *et al.*, (2012) utilizaron una densidad de puntos LiDAR superior a 3 puntos m², mientras que Cabrera *et al.* (2014) utilizaron la densidad utilizada en el presente trabajo. Observando la Tabla 5, se puede determinar que, independientemente de las densidades de puntos, el ajuste de los modelos para las variables área basimétrica, altura dominante, volumen de madera y biomasa total aérea presentan una bondad en el ajuste similar con valores de coeficiente de determinación que oscilan entre 0.76 y 0.94. En contraposición, los resultados para las variables diámetro cuadrático medio y densidad de árboles presentan mayores diferencias en los distintos estudios. Esta situación podría explicarse teniendo en cuenta la diversidad de estructuras naturales de *Pinus sylvestris* de la zona de nuestro estudio. Normalmente en los inventarios LiDAR las variables número de árboles y diámetro medio cuadrático son ajustadas con menor precisión en los modelos de regresión lo que podría explicarse teniendo en cuenta la dificultad de la tecnología LiDAR para detectar árboles de pequeño tamaño, los cuales pueden suponer un porcentaje importante del total de la parcela.

Tabla 5. Comparación de los resultados obtenidos para el coeficiente de determinación del presente trabajo frente a estudios similares.

Variable	Presente trabajo	Naesset (2002)	Treitz <i>et al.</i> , (2012)	Cabrera <i>et al.</i> , (2014)
N	0.52	0.84	0.22	0.85
G	0.90	0.86	0.81	0.85
Dg	0.56	-	0.83	-
Ho	0.88	-	0.94	-
Vcc	0.92	0.91	0.85	0.86
BTA	0.89	-	0.76	0.85

Más allá de la bondad del ajuste, y del porcentaje de variabilidad que es explicado por los modelos de regresión, existen determinados factores o errores que pueden estar influyendo en la calidad de los resultados obtenidos y que hay que tener en cuenta a la hora de evaluarlos. Estos pueden agruparse en las siguientes categorías: errores derivados de la aplicación de modelos para la obtención de valores de altura, volumen de madera y biomasa total aérea; errores derivados de las mediciones realizadas en campo; errores de posicionamiento de las parcelas; errores debidos a la falta de precisión del modelo digital de elevaciones (MDE) y desfase temporal entre el inventario y el vuelo LiDAR. Los dos primeros grupos de errores, se producen tanto en inventarios realizados de la forma tradicional como en inventarios elaborados con tecnología LiDAR. La falta de medios económicos, en muchos casos, no permite la realización de modelos de volumen de madera y biomasa total aérea específicos para un monte en particular, lo que implica la utilización de ecuaciones generalizadas para la especie que pueden disminuir la calidad de los resultados. Por otra parte, es lógico pensar que la precisión en la estimación de variables forestales a nivel de parcela depende en buena medida de los errores cometidos durante el proceso de medición en campo. De esta forma, la determinación de la altura supone uno de los inconvenientes más grandes en los

Sánchez Alberola, J., 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 (Artículos)*, nº 21, p. 79-99. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.509>

trabajos de inventario que es soslayado, en cierto modo, gracias a los avanzados sistemas de medición. Por otro lado, la altura de los árboles, además de ser complicada de medir en campo, en muchos casos es estimada a partir de modelos generalizados de altura – diámetro (López *et al.*, 2003), construidos a través de la medición de “árboles tipo”, pudiendo introducir errores en los cálculos de volumen tal y como se ha indicado en apartados anteriores. Es importante remarcar que de todas las variables estimadas en las parcelas, la determinación del número de árboles, el área basimétrica y el diámetro cuadrático medio de la parcela son los parámetros más exactos ya que su valor se extrae de mediciones directas realizadas sobre todos los árboles de la parcela, lo que supone que en caso de buenas correlaciones con las métricas LiDAR, estos parámetros sean los más oportunos para la planificación de actuaciones silvícolas con datos de inventarios LiDAR.

Respecto a los errores producidos al posicionar las parcelas en campo, en el presente estudio la técnica RTK de medición con GPS aseguró una exactitud muy elevada en la determinación del centro de las parcelas. De hecho la precisión en el replanteo de las parcelas fue inferior a 5 cm. No obstante, es importante indicar que la dificultad de realizar levantamientos topográficos debajo de la superficie forestal implica, en algunas ocasiones, la modificación del punto de posicionamiento original, introduciendo pequeños cambios en la localización prevista para una determinada parcela y por tanto en la distribución inicial por estratos. En este trabajo esta problemática no supuso cambios de localización relevantes. Este problema puede ser solucionado con la utilización de distanciómetros láser que permiten medir ángulos y distancias desde puntos en los que el GPS tiene cobertura pudiéndose replantear los centros de las parcelas. La falta de precisión del MDE ya ha sido comentada en apartados anteriores y podemos determinar que la precisión obtenida pueden considerarse asumible para la estimación de los parámetros propuestos. Por último, hay que indicar que el desfase temporal que se produce entre el vuelo LiDAR (2010) y los trabajos de campo (2014) podría producir cambios en la estimación de parámetros forestales. En este caso se podrían introducir errores relevantes si no se consideraran cambios de cierta magnitud, como pueden ser las cortas de arbolado. En este sentido se ha comprobado que no se ha producido eliminación de arbolado en las parcelas de inventario entre ambas tomas de datos (LiDAR y campo). El crecimiento de las masas en el periodo se considera un aspecto de menor incidencia, pues la incorporación de los datos del año 2014 para la estimación de los modelos hace que éstos puedan predecir con mayor precisión los valores correspondientes al estado de la masa en dicho año. Por otra parte son masas situadas en el extremo meridional de distribución de la especie a nivel mundial, donde las sequías de los últimos años y la abundancia de muérdago también han contribuido a unos bajos crecimientos (Sanguesa y Camarero, 2009) que hacen que los efectos de este factor se puedan considerar muy limitados.

5. Conclusión

A partir de datos LiDAR del Plan Nacional de Orotofotografía Aérea de baja densidad se han realizado estimaciones con buena precisión para la especie *Pinus sylvestris* L. de variables forestales en el contexto de un inventario forestal. Los resultados de este trabajo confirman que la tecnología LiDAR tiene un potencial enorme en la realización de inventarios forestales incluso utilizando datos de baja densidad. La metodología empleada permite reducir el número de parcelas de muestreo cubriendo la mayor parte de la variabilidad de la estructura forestal, lo que en definitiva supone una reducción del coste de inventario.

Sánchez Alberola, J., 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 (Artículos)*, nº 21, p. 79-99. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.509>

Agradecimientos

A la Dirección General de Gestión Forestal, Caza y Pesca (Gobierno de Aragón). Al Servicio provincial de Desarrollo Rural y Sostenibilidad (Teruel), en concreto a los Ingenieros de Montes José Fernando González Garzón e Isidro Holguera Barrera y al Agente Protector de la Naturaleza Fermín González Pereira. A Marcos Benajes y a Luis Suárez en representación del Excelentísimo Ayuntamiento de Noguera.

Referencias bibliográficas

Andersen, H.E., McGaughey, R.J., Reutebuch, S.E. (2005). Estimating forest canopy fuel parameters using LiDAR data. *Remote Sensing of Environment*, 94, 4, pp. 441-449.

Assman E. 1961. *Waldetragskunde*. München. 490 p.

Assman E. 1970. *The principles of forest yield study*. Pergamon Press. Oxford. 506 p.

Baskerville, G.L. (1972). Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass. *Canadian Journal of Forest Research*, 2, pp. 49-53.

Cabrera, J., Lamelas, M.T., Montealegre A.L., De La Riva. J. (2014). Estimación de variables dasométricas a partir de datos LiDAR del PNOA en masas regulares de *Pinus halepensis* Mill. Alicante. XVI Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica 25, 26 y 27 de Junio de 2014, Alicante, 124 – 129.

Condés, S., Fernandez-Landa, A., Rodriguez, F. (2013). Influencia del inventario de campo en el error de muestreo obtenido en un inventario con tecnología LiDAR. *Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 6CFE01-432.

Corral, D., García D. (2009). Estimación de recursos forestales con tecnología LiDAR aerotransportada: Aplicación práctica en varios montes de la provincia de Burgos. *Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 5CFE01-544.

Crespo-Peremarch, P., Ruiz, L., Balaguer-Beser, A. (2016). Estudio comparativo de métodos de regresión para la predicción de variables de estructura y combustibilidad a partir de datos LiDAR full-waveform. *Revista de Teledetección*, 0, 45, pp. 27-40.

Delgado, R., Gil, A., Galiana, F. (2011). *Inventario Forestal*. Editorial UPV. Valencia. 316 pp.

Diéguez-Aranda, U., Barrio, M., Castedo, F., Álvarez, J.G. (2005). Relación altura-diámetro generalizada para masas de *Pinus sylvestris* L. procedentes de repoblación en el noroeste de España. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 14, 2, pp. 229-241.

Dirección General de Conservación de la Naturaleza (2005). Tercer Inventario Forestal Nacional de Teruel. Disponible en <http://www.magrama.gob.es/es/biodiversidad/servicios/banco-datos-naturaleza/informacion-disponible/ifn3.aspx> (último acceso 13-julio-2016)

Drake, J.B., Dubayah, R.O., Clark, D.B., Knox, R.G., Blair, J.B., Hofton, M.A., Chazdon, R.L., Weishampel, J.F., Prince, S. (2002). Estimation of tropical forest structural characteristics using large-footprint LiDAR. *Remote Sensing of Environment*, 79, pp. 305–319

Sánchez Alberola, J., 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 (Artículos)*, nº 21, p. 79-99. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.509>

- Dubayah, R., Drake, J. (2000). LiDAR remote sensing for forestry. *Journal of Forestry*, 98, pp. 44-46.
- Fabra, M. (2012). Aplicaciones de la tecnología LiDAR al sector forestal y comparación de costes frente a metodologías tradicionales. *Revista Montes*, 110, pp. 33-37.
- Forcadell, R., Giménez, A. (2013). 1º Revisión del proyecto de ordenación del grupo de montes de Frías de Albarracín. Teruel. Dirección General de Gestión Forestal, Gobierno de Aragón. 288 pp.
- Gadow, K.V., Real, P., González, J.G. (2001). Modelización del crecimiento y la evolución de los bosques. Viena. IUFRO (International Union of Forest Research Organization) World Series, 11. 242 pp.
- González, J.M., Piqué, M., Vericat, P. (2006). Manual de ordenación por rodales: Gestión multifuncional de los espacios forestales. Centre Tecnològic Forestal de Catalunya. 210 pp.
- González, J.M. (2006). Manual de gestión de los hábitats de pino silvestre en Castilla y León. Junta de Castilla y León, Consejería de Medio Ambiente. 123 pp.
- 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*, 85, 2, pp. 281 – 292.
- Guerra-Hernández, J., Tomé, M., González-Ferreiro, E. (2016). Cartografía de variables dasométricas en bosques Mediterráneos mediante análisis de los umbrales de altura e inventario a nivel de masa con datos LiDAR de baja resolución. *Revista de Teledetección*, 0, 46, pp. 103-117.
- Hjorth, J.S.U. (1994). Computer intensive statistical methods: validation, model selection, and bootstrap. Chapman & Hall. 260 pp.
- Hyypä, J and Inkinen, M. 1999. Detecting and estimating attributes for single trees using laser scanner. *Photogramm. J. Finland*, 16(2): 27–42.
- Hyypä, J., Yu, X., Hyypä, H., Vastaranta, M., Holopainen, M., Kukko, A., Kaartinen, H., Jaakkola, A., Vaaja, M., Koskinen, J., Alho P. (2012). Advances in Forest Inventory Using Airborne Laser Scanning. *Remote Sensing*, 4, 5, pp. 1190-1207.
- Kraus, K., Pfeifer, N. (1998). Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. *Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 53, pp. 193-203.
- Lefsky, M.A., Harding, D., Cohen, W.B., Parker, G., Shugart, H.H. (1999). Surface LiDAR remote sensing of basal area and biomass in deciduous forests of eastern Maryland, USA. *Remote Sensing of Environment*, 67, 1, pp. 83-98.
- López, C.A., Gorgoso, J., Castedo, F., Rojo, A., Rodríguez, R., Álvarez, J.G., Sánchez, F. (2003). A height-diameter model for *Pinus radiata* d. don in Galicia (northwest Spain). *Annals of Forest Science*, 60, pp. 237-245.
- Lozano, M.V. (1993). Estudio geomorfológico de las Sierras de Gúdar (Provincia de Teruel). *Geographicalia*, 30, pp. 19 -30
- Madrigal, A. (1994). Ordenación de montes arbolados. ICONA Colección Técnica. Madrid. 375 pp.

Sánchez Alberola, J., 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 (Artículos)*, n° 21, p. 79-99. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.509>

Maltamo, M., Bollandsås, O., Næsset, E., Gobakken, T., Packalén, P. (2011). Different plot selection strategies for field training data in ALS-Assisted forest inventory. *Forestry*, 84, pp. 23-31.

Maltamo, M., Suvanto, A., Packalén, P. (2007). Comparison of basal area and stem frequency diameter distribution modelling using airborne laser scanner data and calibration estimation. *Forest Ecology and Management*, 247, pp. 26–34.

Magnussen, S., Eggermonth, P., La Riccia, V. (1999). Recovering tree heights from airborne laser scanner data. *Forest Science*, 45, pp. 407-422.

McGaughey, R.J. (2010). FUSION/LDV: Software for LIDAR data analysis and visualization version 3.42 .

McGaughey, R.J. (2015). Manual of FUSION/LDV: Software for LIDAR Data Analysis and Visualization, Disponible en http://forsys.cfr.washington.edu/fusion/FUSION_manual.pdf [último acceso 14-07-2016].

Montero, G., Ruíz-Peinado, R., Muñoz, M. (2005). Producción de biomasa y fijación de CO2 por los bosques españoles. Madrid: Monografías INIA: Serie forestal, 13. MMAINIA.

Muñoz, C., Pérez, V., Cobos, P., Hernández, R., Sánchez, G. (2011). Sanidad Forestal: Guía en imágenes de plagas, enfermedades y otros agentes presentes en los bosques. Ediciones Mundi-Prensa. 575 pp.

Næsset, E. (2002). Predicting forest stand characteristics with airborne scanner laser using a practical two-stage procedure and field data. *Remote Sensing of Environment*, 80, pp. 88 – 99.

Næsset, E. (2009). Effects of different sensors, flying altitudes, and pulse repetition frequencies on forest canopy metrics and biophysical stand properties derived from small-footprint airborne laser data. *Remote Sensing of Environment*, 113, 1, pp. 148-159.

Næsset, E., Gobakken, T. (2005). Estimating forest growth using canopy metrics derived from airborne laser scanner data. *Remote Sensing of Environment*, 96, 3-4, pp. 453-465.

Næsset, E., Gobakken, T., Holmgren, J., Hyypä, H., Hyypä, J., Maltamo, M., Nilsson, M., Olsson, H. (2004). Laser Scanning of Forest Resources: The Nordic Experience. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 19, pp. 482-499.

Nelson, R., Krabill, W., Tonelli J. (1988). Estimating forest biomass and volume using airborne LiDAR data. *Remote Sensing of Environment*, 24, pp. 247-267.

Nilsson, M. (1996). Estimation of tree heights and stand volume using an airborne LiDAR system. *Remote Sensing of Environment*, 56, 1, pp. 1–7.

Peña, D. (2002). Regresión y diseño de experimentos. Alianza, Madrid.

Persson, Å., Holmgren, J., Söderman, U. (2002). Detecting and measuring individual trees using an airborne laser scanner. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 68, 9, pp. 925–932.

Peterson, B., Dubayah, R., Hyde, P., Hofton, M., Blair, J.B., Fites-Kaufman, J.A. (2007). Use of LIDAR for forest inventory and forest management application. Proceedings of the "Seventh annual forest inventory and analysis symposium". Portland, ME (McRoberts RE, Reams GA, Van Deusen PC, McWilliams WH eds). Gen. Tech. Rep. WO-77, USDA, Forest Service, Washington, DC, USA, pp. 193-202.

Sánchez Alberola, J., 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 (Artículos)*, n° 21, p. 79-99. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.509>

Servicio Provincial de Agricultura, Ganadería y Medio Ambiente, Gobierno de Aragón (2013). Plan de Ordenación de los recursos forestales de la comarca Gúdar-Javalambre. Teruel. 477 pp.

R Core Team. 2014. R: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing

Raber, G.T., Jensen, J.R., Schill, S.R., Schuckman, K. (2002). Creation of digital terrain models using an adaptive LiDAR vegetation point removal process. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 68, 12, pp. 1307-1315.

Sanguesa, G., Camarero, J.J. (2009). Efectos del muérdago y el clima sobre el crecimiento secundario del pino silvestre. En: S.E.C.F. Actas del 5º Congreso Forestal Español. Ávila. España. Disponible en: <http://secforestales.org/publicaciones/index.php/congresos/article/view/8097/8020> [último acceso 23-03-2017]

Shao, J. (1993). Linear model selection by cross-validation. *Journal of the American Statistical Association*, 88, pp. 486-494.

Solberg, S., Næsset, E., Bollandsås, O.M. (2006). Single tree segmentation using airborne laser scanner data in a heterogeneous spruce forest. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 72, 12, pp. 1369-1378.

Treitz, P., Lim, K., Woods, M., Pitt, D., Nesbitt, D., Etheridge, D. (2012). LiDAR sampling density for forest resource inventories in Ontario (Canada). *Remote Sensing of Environment*, 4, 4, pp. 830-848.

Vastaranta, M., Kankare, V., Holopainen, M., Yu, X., Hyypä, J., Hyypä, H. (2012). Combination of individual tree detection and area-based approach in imputation of forest variables using airborne laser data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 67, pp. 73-79.

Watt, S., Adams, T., González, S., Aracil, A., Marshall, H., Watt, P. (2013). The influence of LiDAR pulse density and plot size on the accuracy of New Zealand plantation stand volume equations. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 43, 15.

White, C., Wulder, A., Varhola, A., Vastaranta, M., Coops, N., Cook, B., Pitt, D., Woods, M. (2013). A best practices guide for generating forest inventory attributes from airborne laser scanning data using an area-based approach. Canadian Forest Service. Canadian Wood Fibre Centre Information Report fi-x-010. 39 pp.

