

Lekuona Zuazo I., Montealegre Gracia A. L. y Lamelas Gracia 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* (Artículos), nº 20, p. 87-107. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.539>

CARTOGRAFÍA DE LA BIOMASA AÉREA TOTAL EN MASAS DE *PINUS RADIATA* D. DON A PARTIR DE DATOS PÚBLICOS LiDAR-PNOA E INVENTARIO FORESTAL NACIONAL

IRATI LEKUONA ZUAZO¹, ANTONIO LUIS MONTEALEGRE GRACIA² y MARÍA TERESA LAMELAS GRACIA^{2,3}

¹ Departamento de Geografía, Universidad de Zaragoza. C/ Pedro Cerbuna, 12, 50009 Zaragoza (España). irati.lekuona@gmail.com

² Grupo GEOFOREST-IUCA, Universidad de Zaragoza. C/ Pedro Cerbuna, 12, 50009 Zaragoza (España). monteale@unizar.es

³ Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza. Academia General Militar, Ctra. de Huesca s/n, 50090, Zaragoza (España). tlamelas@unizar.es

RESUMEN

La estimación de la biomasa total aérea (en adelante biomasa) es fundamental para conocer la estructura y dinámica de los ecosistemas forestales. El objetivo principal de este trabajo ha sido estimar y cartografiar la biomasa de las masas de *Pinus radiata* D. Don de la comarca Arratia-Nerbioi (Bizkaia, España), a partir de los datos de teledetección LiDAR (*Light Detection And Ranging*) del PNOA (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea) y los datos de campo del IFN4 (Cuarto Inventario Forestal Nacional). La biomasa fue calculada en 51 parcelas de campo del IFN4 aplicando la ecuación alométrica de Montero *et al.* (2005). Mediante un análisis multivariante de regresión lineal se generó un modelo predictivo de la biomasa, que fue validado mediante la técnica de validación cruzada dejando un dato fuera. Se obtuvo un coeficiente de determinación de 0,67. Para seleccionar la resolución de la cartografía final, se realizó un análisis de correlación entre los valores de biomasa de las parcelas y los valores predichos por el modelo aplicando dos tamaños de pixel.

Palabras clave: Biomasa, regresión lineal múltiple, *Pinus radiata* D. Don, LiDAR-PNOA, IFN

Lekuona Zuazo I., Montealegre Gracia A. L. y Lamelas Gracia 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* (Artículos), nº 20, p. 87-107. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.539>

TOTAL ABOVEGROUND BIOMASS MAPPING OF *PINUS RADIATA* D. DON STANDS BASED ON PUBLIC LiDAR-PNOA DATA AND NATIONAL FOREST INVENTORY

ABSTRACT

The estimation of total aboveground biomass (hereinafter referred as biomass) is required to understand the structure and dynamics of forest ecosystems. The main objective of this study is to estimate and map the biomass of *Pinus radiata* D. Don forest stands located in the Arratia-Nerbioi region (Bizkaia, Spain). LiDAR remote sensing data from the National Plan for Aerial Orthophotography (PNOA) and the information obtained by the Fourth National Forest Inventory (IFN4) have been used. The biomass was calculated in 51 IFN4 field plots applying the allometric equation from Montero *et al.* (2005). Finally, a multivariate linear regression analysis allowed the generation of a biomass predictive model, which was validated using the leave one-out cross-validation technique. The coefficient of determination of the model was 0.67. A correlation analysis between the values of biomass at plot-level and the values predicted by different pixel sizes, allowed the selection of the best resolution for mapping.

Keywords: Biomass; multivariate linear regression; *Pinus radiata* D. Don; LiDAR-PNOA; IFN4

1. Introducción

Los ecosistemas forestales juegan un papel muy importante en el ciclo global del carbono, ya que dicho gas se intercambia naturalmente entre los bosques y la atmósfera a través de la actividad fotosintética, la descomposición de la materia orgánica y la combustión causada por el fuego (García *et al.*, 2010). Cada vez son más necesarias las estimaciones precisas y espacialmente explícitas de la biomasa forestal por las razones que se enumeran a continuación: 1) para conocer mejor la función de los bosques en el ciclo del carbono; 2) para apoyar políticas nacionales y locales centradas en preservar el *stock* de carbono y reducir las emisiones de dióxido de carbono debidas a incendios forestales (Muukkonen y Heiskanen, 2007; Mieville *et al.*, 2010; Vermote *et al.*, 2009); 3) para desarrollar tratamientos silvícolas sostenibles; 4) para estimar la carga de combustible y; 5) para evaluar los recursos disponibles para la producción de bioenergía (García, *et al.*, 2005; Montero *et al.*, 2010).

Los inventarios forestales tradicionales, como el Inventario Forestal Nacional (IFN) español, con los que se conoce el estado de las masas y la evolución de las superficies forestales, consisten en mediciones manuales por muestreo que tienen un alto coste económico y de tiempo, por lo que no se realizan con la frecuencia e intensidad necesaria para una correcta gestión forestal (Hazi, 2013). En estos inventarios solo se muestrea entre el 0,5 % y el 5 % de la superficie total, y los datos se deben extrapolar después a valores medios por hectárea (Valbuena, 2014). Afortunadamente, aunque el IFN se inició a mediados de 1960 y se viene realizando cada diez años, el IFN4 de 2011 en el País Vasco marcó el inicio de la periodicidad quinquenal con la que se realizarán, a partir de entonces, los próximos IFN en las zonas productivas de clima atlántico.

Por otro lado, las técnicas de teledetección parecen ser la alternativa más adecuada a los costosos inventarios tradicionales, ya que permiten obtener datos continuos para grandes áreas, a un menor coste económico y con mayor periodicidad (Rosette *et al.*, 2012). Numerosos estudios han

Lekuona Zuazo I., Montealegre Gracia A. L. y Lamelas Gracia 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* (Artículos), nº 20, p. 87-107. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.539>

correlacionado la biomasa y la respuesta espectral de la vegetación utilizando sensores ópticos pasivos (Foody *et al.*, 2003; Leboeuf *et al.*, 2007; Meng *et al.*, 2007; Muukkonen y Heiskanen, 2007). Sin embargo, los resultados pueden verse afectados por problemas de saturación en áreas donde la biomasa excede las 100 tn/ha, disminuyendo la sensibilidad para estimar la biomasa aérea por encima de este umbral (García *et al.*, 2010). En este sentido, las aproximaciones utilizando sensores activos SAR (*Synthetic Aperture Radar*) han mostrado que éstos son más sensibles a niveles de biomasa más altos, aunque los resultados son variables dependiendo de la banda seleccionada y de las condiciones ambientales del área de estudio (Tanase *et al.*, 2014). Más recientemente, la utilización de la tecnología LiDAR (*Light Detection And Ranging*) se está convirtiendo en una herramienta con gran potencial para estimar diversas variables dasométricas, como la altura media, el volumen maderable, el área basimétrica, la densidad de pies, la biomasa, etc., en diferentes ecosistemas (Means *et al.*, 2000; Naesset, 2002; Montealegre *et al.*, 2016) y con una precisión mayor a la alcanzada con otras técnicas de inventario tradicional (Vosselman y Maas, 2010). Esto se debe a la capacidad de los sensores LiDAR para proporcionar de forma directa información tridimensional de la estructura vegetal en forma de nubes de puntos con un error centimétrico (González *et al.*, 2012; Maltamo *et al.*, 2014), derivadas del registro de los múltiples ecos o retornos reflejados por cada pulso láser emitido por el sensor (Kraus y Pfeifer, 1998; Vosselman y Maas, 2010).

Actualmente, los sistemas LiDAR más comúnmente utilizados son aeroportados, de pulsos discretos y huella pequeña, también conocidos como ALS (*Airborne Laser Scanning*), los cuales son útiles para estimar la biomasa, tanto a nivel de árbol individual, como a nivel de masa forestal (Lim y Treitz, 2004; Popescu, 2007; Næsset y Gobakken, 2008; Zolkos *et al.*, 2013; Maltamo *et al.*, 2014). En general, la estimación de la biomasa arbórea total aérea se basa en ecuaciones de regresión que relacionan la biomasa de la vegetación con un conjunto de variables independientes derivadas de los datos LiDAR (Bouvier *et al.*, 2015). Cabe destacar que varios países europeos, como Holanda, Noruega, Austria, Suiza, Finlandia y España, han llevado a cabo campañas de vuelo usando esta tecnología para realizar coberturas nacionales o parciales de sus territorios (Rosette *et al.*, 2012). Habitualmente se trata de nubes de puntos que presentan una baja densidad (igual o inferior a 1 punto/m²) con el fin de abaratar costes. Más concretamente, el Instituto Geográfico Nacional de España inició en el período 2008-2009 la captura de datos LiDAR de baja resolución espacial (densidad nominal de 0,5 puntos/m²) en el marco del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA), surgiendo la necesidad de evaluar la idoneidad de esta nueva fuente de información, que no está destinada específicamente a aplicaciones forestales, para el estudio de la biomasa arbórea a escala regional.

El *Pinus radiata* D. Don es una especie de crecimiento rápido con turno de 30-35 años y originaria de la costa pacífica de Norteamérica. Ha sido introducida con fines productivos en Chile, Nueva Zelanda, Australia y Sudáfrica, principalmente, así como en España, donde 263.271 ha están dedicadas a esta especie, de las cuales, el 48 % se encuentran en el País Vasco (MAGRAMA, 2015). Dichas plantaciones, que se introdujeron en el País Vasco a finales del siglo XIX, abastecieron durante años a la demanda de la industria maderera vasca, alcanzándose precios muy atractivos. Sin embargo, aunque continúa siendo la especie principal en el sector forestal del País Vasco por su importancia económica y extensión, aportando el 90% de las cortas anuales (Otaola-Urrutxi y Errandonea, 2012; Azpitarte, 2013), en la última década el ritmo de explotación y el precio de la madera han descendido. En este contexto, y como alternativa a la crisis que atraviesa el

Lekuona Zuazo I., Montealegre Gracia A. L. y Lamelas Gracia 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* (Artículos), nº 20, p. 87-107. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.539>

sector de la madera, las amplias superficies de *Pinus radiata* existentes, la mayoría en estado extra maduro y cada vez más envejecidas (Albizu, 2012), podrían aprovecharse con fines bioenergéticos.

Por consiguiente, el objetivo principal de este trabajo es establecer un modelo para estimar la biomasa presente en las masas de *Pinus radiata* de la comarca Arratia-Nerbioi (Bizkaia, País Vasco), a partir de los datos del vuelo LiDAR del PNOA, capturados en el año 2012, y los datos del IFN4 del año 2011. Los objetivos específicos que se derivan del anterior son: 1) evaluar el error posicional de las coordenadas de los centroides de las parcelas del IFN4; 2) analizar las correlaciones entre la variable biomasa, calculada a partir de los datos de campo del IFN4, y los datos del vuelo LiDAR-PNOA, para seleccionar el tamaño de parcela óptimo a utilizar; y 3) determinar el tamaño de pixel idóneo para elaborar una cartografía lo más precisa posible de la distribución de la biomasa en el área de estudio.

2. Materiales y métodos

La metodología empleada se fundamenta en una aproximación en "dos fases" para obtener el modelo de estimación de la biomasa. En primer lugar, se realiza un inventario de campo en una serie de parcelas circulares, en las que se miden diversos parámetros estructurales, como el diámetro normal o la altura de los árboles, y a partir de éstos se calcula la variable de masa de interés, como es la biomasa. En segundo lugar, se obtiene una plétora de variables relacionadas con la altura y la distribución de los retornos LiDAR, que se relacionan con la variable de masa de la parcela de campo para obtener un modelo de regresión lineal que permita extrapolar los resultados al resto del área de estudio (García *et al.*, 2012; Cabrera *et al.*, 2014; Montealegre *et al.*, 2016).

2.1. Área de estudio

El área de estudio corresponde a las plantaciones de *Pinus radiata* de la comarca Arratia-Nerbioi, situadas en Bizkaia (Figuras 1 y 2). Ocupan 16.270 ha, el 40,63 % de la superficie total comarcal (40.063 ha), según el Mapa Forestal Español (MFE) a escala 1:25.000 de 2010 a partir del cual se planificó el IFN4. Esta misma cartografía pone de manifiesto que se trata de una comarca en la que el 53 % de su superficie está destinada a plantaciones forestales productivas, la mayoría dedicadas a *Pinus radiata* (el 77 %), mientras que el resto de plantaciones se dedican a especies como *Pinus nigra*, *Chamaecyparis lawsoniana* o *Pseudotsuga menziesii*, entre otras. El 47 % restante de la superficie comarcal está cubierto principalmente por bosques naturales (17 %), prados y pastizales (15 %), matorrales (9 %) y otros terrenos artificiales, zonas agrestes sin vegetación (2 %), o infraestructuras y otras coberturas (4 %).

Según el MFE de 2010, el 42 % de las plantaciones de *Pinus radiata* se encuentran en estado de fustal, el 23 % en estado de latizal, el 18 % en estado de monte bravo, el 12 % en estado de repoblado y el 5 % son terrenos talados donde no se ha vuelto a plantar. A pesar de su carácter artificial, en estas plantaciones conviven otras especies arbóreas, mientras que su umbroso sotobosque no permite la existencia de un rico estrato de matorral.

La comarca objeto de estudio, situada al norte de la Península Ibérica, presenta un clima atlántico oceánico, propicio para el crecimiento del *Pinus radiata* gracias a las abundantes

Lekuona Zuazo I., Montealegre Gracia A. L. y Lamelas Gracia 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* (Artículos), nº 20, p. 87-107. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.539>

precipitaciones y a la ausencia de sequía. Las plantaciones se sitúan, por lo general, en laderas por debajo de los 600-700 m de altitud (Figura 3).

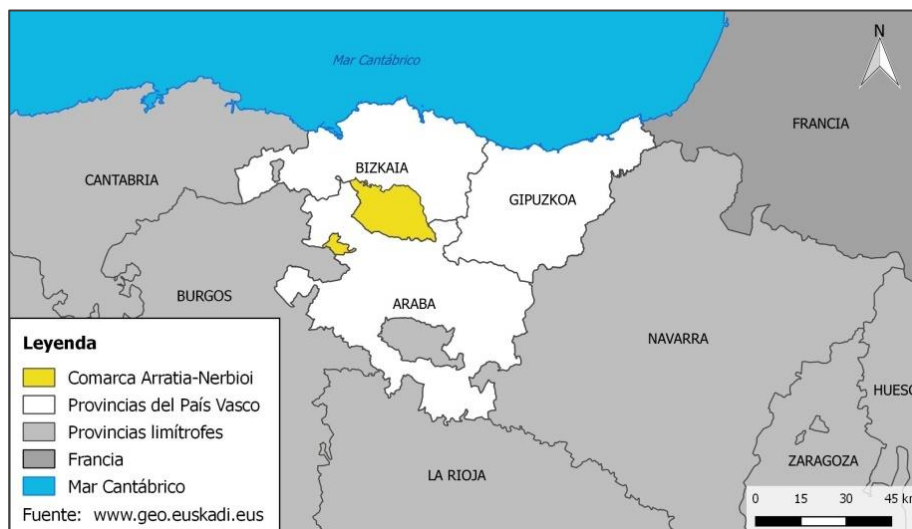


Figura 1: Situación de la comarca Arratia-Nerbioi en la comunidad autónoma del País Vasco.

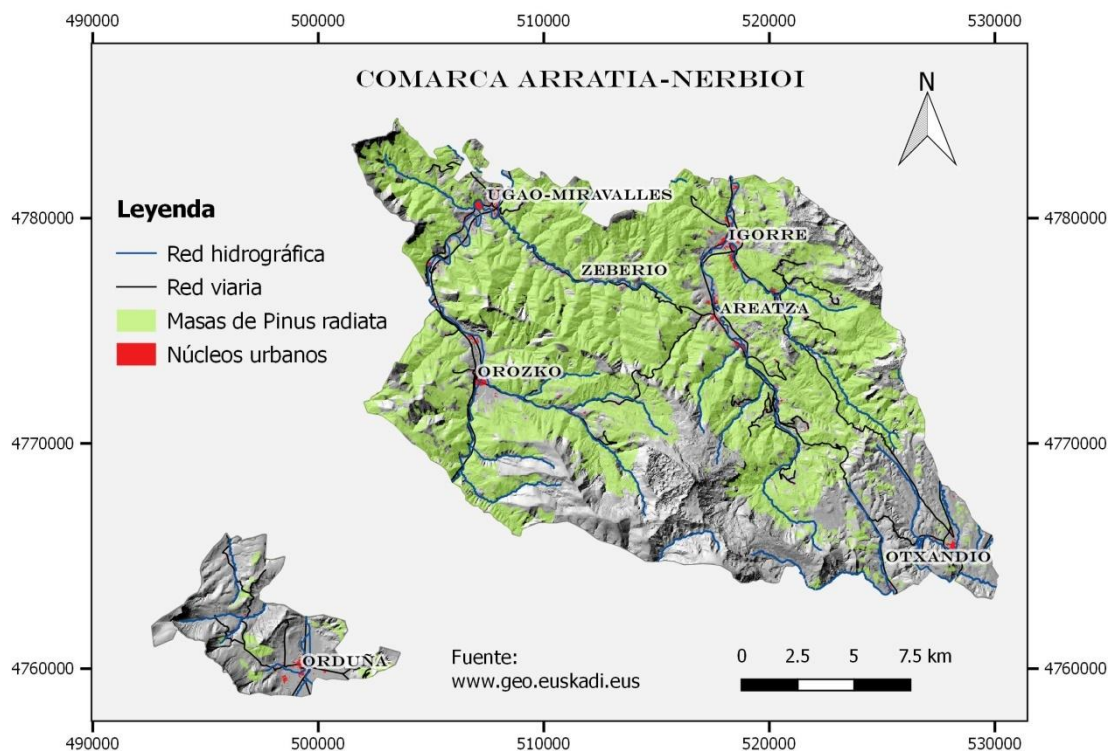


Figura 2. Área de estudio donde se muestra la localización de las masas de *Pinus radiata* en la comarca Arratia-Nerbioi.

Lekuona Zuazo I., Montealegre Gracia A. L. y Lamelas Gracia 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 (Artículos)*, nº 20, p. 87-107. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.539>

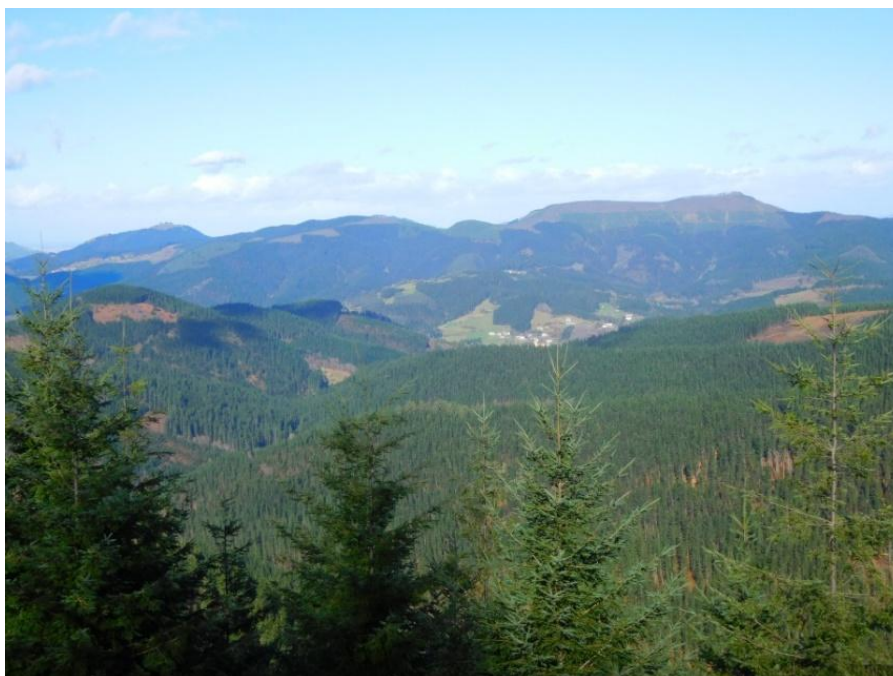


Figura 3. Plantaciones forestales de *Pinus radiata* en las laderas del valle de Zeberio.
Fotografía: I. Lekuona

2.2. Datos de campo

Para este estudio se han seleccionado 51 parcelas del IFN4 que se sitúan en las masas de *Pinus radiata* de la comarca (Figura 4) y se han empleado los datos de campo medidos en las mismas en el año 2011. Para la selección de las parcelas se han tenido en cuenta los siguientes criterios: 1) encontrarse sobre masas homogéneas y de origen artificial, establecidas por plantación y con tratamiento de monte alto; 2) ser coetáneas (al menos el 90 % de los pies tienen la misma edad individual) o regulares (al menos el 90 % pertenecen a la misma clase artificial de edad) y tener más del 80 % de ocupación de *Pinus radiata*; y 3) presentar una distribución espacial uniforme (el estrato arbóreo es continuo en el espacio).

La selección se apoyó complementariamente en la observación sobre ortofotografía aérea de la situación de las parcelas, y fueron descartadas las que, teniendo en cuenta un margen de error de 10 m alrededor de las coordenadas que indica el IFN4, presentasen un cambio brusco en el uso del suelo o en el estado de la masa. Esto se realizó con el objetivo de evitar posibles errores en la localización de las parcelas debidos a la toma de coordenadas en campo con un GPS de precisión métrica, habitualmente utilizado para llevar a cabo las tareas del IFN. Adicionalmente, se buscaron los rejonés de 10 parcelas del IFN4 en masas de *Pinus radiata* de los valles cantábricos de Álava y Bizkaia, y se tomaron en campo sus coordenadas con un GPS diferencial de alta precisión. Tras comprobar que entre las coordenadas del IFN4 y las coordenadas de los centroides de las parcelas podía existir una diferencia de hasta 9 m, quedó justificada la definición de un margen de error de 10 m para la selección de las 51 parcelas de campo utilizadas en este trabajo.

Lekuona Zuazo I., Montealegre Gracia A. L. y Lamelas Gracia 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 (Artículos)*, nº 20, p. 87-107. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.539>

El cálculo de la biomasa de cada pie de pino se realizó utilizando la ecuación alométrica de Montero *et al.* (2005), que relaciona la biomasa seca total del árbol con su diámetro normal (Ecuación 1). La biomasa de cada pie se ponderó por el factor de expansión –que determina el número de árboles que representa en una hectárea cada árbol medido en la parcela en función de su rango diamétrico-, y con la suma de la biomasa de todos los pies de pino ponderados se obtuvo la biomasa en kg/ha. De esta manera, aunque las parcelas de campo tengan distinto radio, -el IFN utiliza el muestreo por radio variable-, los valores que se obtienen al ponderar cada árbol se refieren a la hectárea.

$$Biomasa (kg) = CF \times e^{-2,61} \times Dn^{2,49} \quad (1)$$

Donde CF es el factor de corrección ($CF = e^{SEE^2/2}$), SEE es el error estándar de la estimación, e es el número de Euler y Dn es el diámetro a la altura del pecho medido en cm.

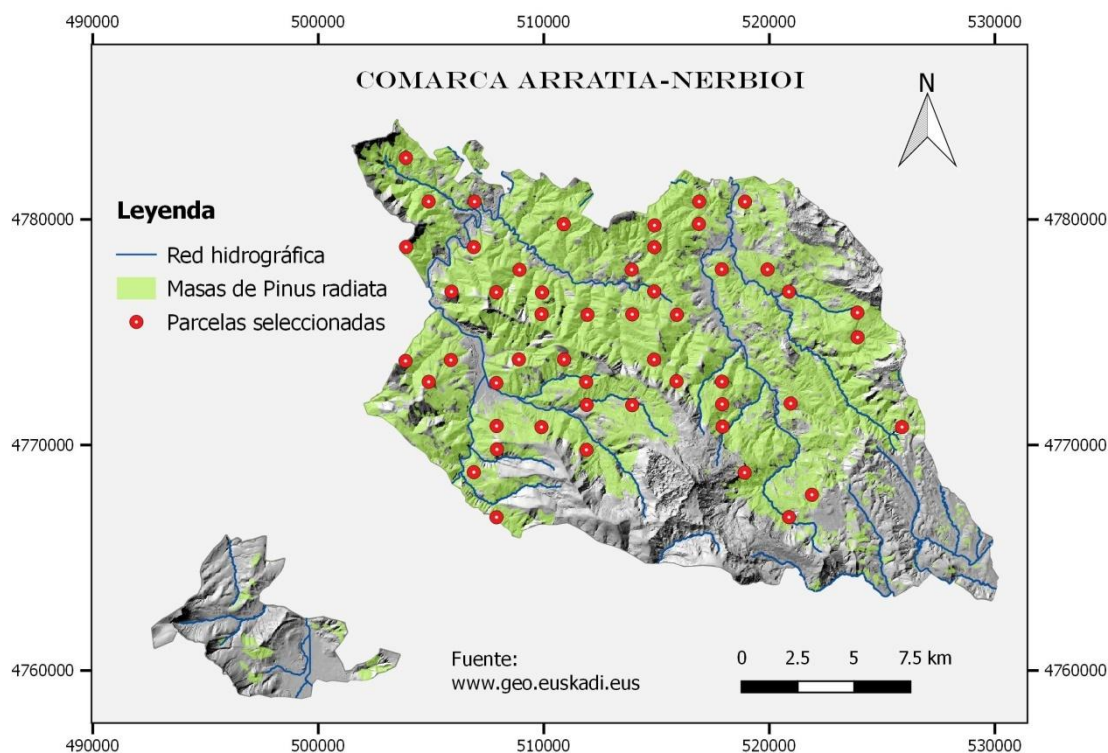


Figura 4. Localización de las 51 parcelas de campo del IFN4.

2.3. Datos LiDAR

Los datos LiDAR-PNOA fueron capturados entre los meses de julio y agosto de 2012 mediante un sensor aeroportado de pulsos discretos LMS-Q680 con una densidad nominal de 0,5 puntos/m², cuyas especificaciones técnicas se detallan en la Tabla 1.

Lekuona Zuazo I., Montealegre Gracia A. L. y Lamelas Gracia 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* (Artículos), nº 20, p. 87-107. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.539>

Tabla 1. Especificaciones técnicas de los datos LiDAR utilizados.

Característica	Descripción
Sensor LiDAR	LMS-Q680
Campo de visión transversal	60°
Frecuencia de escaneado	70.000 Hz
Frecuencia de pulso	100.000 Hz
Densidad nominal	0,5 puntos/m ²
Número máximo de retornos por pulso	4
Velocidad del avión	130 km/ha
Altura media de vuelo	1100 m

Los datos fueron proporcionados por Eusko Jaurlaritz-Gobierno Vasco en ficheros de 4 km² de extensión, con sistema de referencia ETRS89, proyección UTM y huso 30N, y cotas ortométricas referidas al modelo de geoide EGM08-REDNAP. Los puntos LiDAR se encontraban clasificados de acuerdo con la nomenclatura del formato binario LAS de la *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing* (ASPRS) en las siguientes clases: suelo; vegetación baja, media, y alta; construcciones; ruido; solape; y no clasificado.

Los puntos identificados como suelo fueron utilizados para crear un modelo digital de elevaciones (MDE) con un paso de malla de 1 m, empleando el comando "GridSurfaceCreate" del software FUSION (McGaughey, 2009). Este MDE fue necesario para normalizar la altura de las nubes de puntos LiDAR, las cuales fueron recortadas utilizando radios de 15 y 25 m a partir de las coordenadas de los centroides de las parcelas del IFN4. A su vez, se extrajeron un conjunto de variables independientes relacionadas con la altura y la distribución de los retornos LiDAR (Tabla 2), despreciando aquellos pertenecientes al sotobosque (por debajo de 3 m). Para ello se hizo uso de los comandos "ClipData" y "CloudMetrics" de FUSION (McGaughey, 2009).

Tabla 2. Variables LiDAR, donde x_i es el valor de la observación (altura del retorno), N es el número total de observaciones, r_i es el retorno, y pl_i es el pulso.

Variable	Descripción
Percentiles 1 %, 5 %, 10 %, 20 %, 25 %, 30 %, 40 %, 50 %, 60 %, 70 %, 75 %, 80 %, 90 %, 95 % y 99 % (P_{01} , P_{05} , P_{10} , etc.)	Los diferentes valores de percentiles fueron calculados utilizando la siguiente metodología: $(N - 1)P = I + d \begin{cases} I \text{ es la parte entera de } (N - 1)P \\ d \text{ es la parte decimal de } (N - 1)P \end{cases}$ Donde P es el percentil dividido por 100. Si $d = 0$ entonces Percentil = x_{i+1} Si $d > 0$ entonces Percentil = $x_{i+1} + d(x_{i+2} - x_{i+1})$
Altura mínima	x_i mínima

Lekuona Zuazo I., Montealegre Gracia A. L. y Lamelas Gracia 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* (Artículos), nº 20, p. 87-107. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.539>

Altura máxima	$x_i \text{ máxima}$
Rango	$x_i \text{ máxima} - x_i \text{ mínima}$
Altura media (μ)	$\frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}$
Moda de las alturas	Valor x_i más frecuente en la parcela
Ratio de apertura del dosel (<i>canopy relief ratio</i>)	$\frac{\mu - x_i \text{ mínima}}{x_i \text{ máxima} - x_i \text{ mínima}}$
Desviación típica (σ)	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}{N}}$
Varianza (σ^2)	$\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}{N}$
Coefficiente de variación	$\frac{\sigma}{\mu} 100$
Desviación absoluta media	$\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)}{N}$
Rango intercuartil	$[P_{75}(x) - P_{25}(x)]$
Asimetría	$\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^3}{(N - 1)\sigma^3}$
Curtosis	$\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^4}{(N - 1)\sigma^4}$
Porcentaje de retornos que son primeros, segundos, terceros y cuartos	$\frac{\sum_{i=1}^N r_{i \text{ primeros}}}{N} 100; \frac{\sum_{i=1}^N r_{i \text{ segundos}}}{N} 100; \text{ etc.}$
Porcentaje de primeros retornos por encima de un umbral de altura determinado, de la altura media o de la moda	$\frac{\sum_{i=1}^N r_{i \text{ primeros}} > \text{umbral}}{\sum_{i=1}^N r_{i \text{ primeros}}} 100$
Porcentaje de retornos total por encima de un umbral de altura determinado, de la altura media o de la moda	$\frac{\sum_{i=1}^N r_i > \text{umbral}}{N} 100$
Porcentaje de retornos total por encima de un umbral de altura determinado, de la altura media o de la moda, sobre el total de primeros retornos	$\frac{\sum_{i=1}^N r_i > \text{umbral}}{\sum_{i=1}^N r_{i \text{ primeros}}} 100$

Lekuona Zuazo I., Montealegre Gracia A. L. y Lamelas Gracia 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* (Artículos), nº 20, p. 87-107. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.539>

Las variables LiDAR utilizadas están relacionadas con la estructura de la vegetación, por cuanto los percentiles, la altura máxima y mínima, la media y la moda de los retornos láser se relacionan con la altura del dosel arbóreo. Otras variables como la desviación típica, el coeficiente de variación, el rango intercuartil, la asimetría y la curtosis de la distribución de las alturas de los retornos se refieren a la variabilidad vertical que presenta el dosel, mientras que los porcentajes de retornos por encima de un umbral de altura se relacionan con la densidad y la cobertura del estrato arbóreo.

El propósito de recortar la nube de puntos y extraer las variables para dos tamaños de parcela diferentes, fue analizar el radio con el cual las estadísticas de la nube de puntos se ajustan mejor a los datos de biomasa obtenidos en las parcelas del IFN4. Como se ha comentado anteriormente, los valores de biomasa que se obtienen a partir de los datos de campo para cada parcela se refieren a la hectárea, independientemente del radio de la misma, pero los estadísticos de la nube de puntos sí que varían en función del radio con el que se recorta.

2.4. Construcción del modelo de estimación de la biomasa

En primer lugar, se realizó un análisis de correlación de Spearman entre los valores de biomasa y las variables LiDAR (Watt *et al.*, 2013), empleando los recortes para parcelas de radio de 15 y 25 m. A partir de estas correlaciones, y tras aplicar una prueba no paramétrica de contraste entre muestras independientes para determinar si las diferencias son significativas, se eligió el radio más adecuado y se llevó a cabo un análisis multivariante de regresión lineal utilizando un proceso de selección por pasos hacia delante (Means *et al.*, 2000; Naesset, 2002), comprobando en todo momento el cumplimiento de las hipótesis básicas de este tipo de modelos (normalidad de los residuos, homocedasticidad, linealidad entre la variable dependiente y las independientes, independencia de los residuos, no-colinealidad entre variables independientes y valores atípicos). Aparte de estos seis supuestos, se tuvo en cuenta la influencia del tamaño de la muestra en la generalización de los resultados. Así, con el fin de que el modelo no estuviera sobre-ajustado a la muestra y fuera extrapolable, se siguió a Hair *et al.* (1999), que recomiendan entre 15 y 20 observaciones por cada variable independiente incluida en el modelo de regresión.

Por otro lado, además de utilizar las variables originales, y sobre todo si se incumple alguno de los principios anteriores –especialmente el de normalidad, homocedasticidad y linealidad–, la transformación logarítmica de las variables, tanto de la dependiente como de las predictoras, fue considerada para resolver dichos inconvenientes y para mejorar la significancia y los estadísticos que indican la bondad del ajuste (Means *et al.* 2000, Naesset 2002).

Para cuantificar la proporción de varianza de la variable dependiente que es explicada por las independientes se utilizó el coeficiente de determinación, que es el cociente entre la suma de los cuadrados de la regresión y la suma total de cuadrados (Ecuación 2).

Lekuona Zuazo I., Montealegre Gracia A. L. y Lamelas Gracia 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* (Artículos), nº 20, p. 87-107. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.539>

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (Y'_i - \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2} 100 \quad (2)$$

Donde R^2 es el coeficiente de determinación, Y_i es el valor real para la observación i , $\bar{Y}$ es la media de los valores reales, e Y'_i es el valor pronosticado para la observación i . El valor de R^2 varía entre 0 y 1, siendo mayor el poder explicativo del modelo de regresión cuanto más alto sea (Hair *et al.* 1999).

Asimismo, se seleccionó el Error Cuadrático Medio (ECM) por ser muy utilizado en los trabajos de estimación de variables dasométricas y porque su interpretación es sencilla: cuanto menor es el valor obtenido de ECM, mejor es el modelo de regresión (Ecuación 3).

$$ECM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - Y'_i)^2}{N}} \quad (3)$$

Donde Y_i es el valor real para la observación i , Y'_i es el valor pronosticado para la observación i y N es el número de casos u observaciones.

Por último, se consideró el sesgo reportado por el modelo, definido como la media aritmética de los residuos (Ecuación 4).

$$Sesgo = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - Y'_i)}{N} \quad (4)$$

Una vez seleccionado el modelo de regresión más adecuado, teniendo en cuenta los tres estadísticos de bondad del ajuste anteriormente mencionados, se realizó un proceso de validación. Dado que la muestra era reducida, la mejor opción es utilizar la técnica de validación cruzada dejando un dato fuera (LOOCV - *Leave one-out cross-validation*). Se basa en eliminar un caso de la muestra –una parcela– en cada interacción y estimar su valor mediante el modelo especificado utilizando el resto de los casos de la muestra (Andersen *et al.*, 2005; Bouvier *et al.*, 2015; Montealegre *et al.*, 2016). De esta forma se realizan tantas iteraciones como casos tenga el conjunto de datos, a partir de las cuales se pueden calcular los valores de R^2 , ECM y sesgo cada vez, así como los coeficientes obtenidos en cada iteración. Realizando un promedio de estos valores se obtiene el R^2 , el ECM y el sesgo tras la validación, que se comparan con los del modelo inicial. Si los resultados son similares entre los estadísticos de bondad del ajuste pre- y post-validación, el modelo es aceptado y puede ser aplicado a toda el área de estudio (Bouvier *et al.* 2015).

2.5. Representación cartográfica de la biomasa

El modelo de regresión seleccionado se utilizó para generar la cartografía de biomasa de las masas de *Pinus radiata* de la comarca Arratia-Nerbioi. Las variables incluidas en la ecuación del modelo se transformaron en capas ráster utilizando los comandos "GridMetrics" y "CSV2Grid" implementados en FUSION (McGaughey, 2009) y, mediante operaciones de álgebra de mapas en

Lekuona Zuazo I., Montealegre Gracia A. L. y Lamelas Gracia 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 (Artículos)*, n° 20, p. 87-107. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.539>

ArcGIS 10.2, se aplicaron los coeficientes de la ecuación del modelo para obtener el mapa de biomasa.

Se probaron dos resoluciones de píxel (45 y 50 m de lado), ambas con un tamaño similar a la superficie que ocupa la parcela circular de campo seleccionada anteriormente, siguiendo el método basado en áreas (Gutiérrez *et al.*, 2013). Mediante un análisis de correlación entre la biomasa calculada en cada parcela y la predicha por cada píxel, según su resolución, se determinó cuál era el paso de malla más apropiado para generar la cartografía final.

3. Resultados

La biomasa media calculada en las parcelas fue de 158,08 tn/ha. Las correlaciones entre la biomasa y las variables LiDAR en parcelas de 15 y 25 m de radio resultaron ser muy similares, siendo ligeramente mejores las obtenidas con 25 m, aunque no existen diferencias estadísticas significativas, tal como se puede observar en la Tabla 3.

Tabla 3. Coeficientes de correlación de Spearman entre la biomasa y las variables LiDAR en parcelas de 15 y 25 m de radio. Únicamente se muestran las correlaciones significativas () al nivel 0,01 (bilateral).**

Variables LiDAR	Parcela IFN de 15 m de radio	Parcela IFN de 25 m de radio
Altura máxima	0,82**	0,80**
Altura media	0,80**	0,80**
Varianza	0,70**	0,73**
Asimetría	-0,62**	-0,71**
P ₄₀	0,80**	0,80**
P ₆₀	0,81**	0,82**
P ₇₅	0,83**	0,84**
Porcentaje de primeros retornos sobre la altura media	0,47**	0,50**
Porcentaje de retornos por encima de 3 m	0,36**	0,39**

El modelo de regresión lineal obtenido incluyó dos variables LiDAR: la altura máxima y la asimetría de la distribución de las alturas de los retornos (Ecuación 5). La primera de las variables independientes tiene una relación directa con la biomasa, ya que ésta es mayor en parcelas con pies más altos, en estado de fustal, mientras que la asimetría tiene una relación inversa, dado que los valores más altos de biomasa implican una concentración de los retornos láser en la parte alta del dosel arbóreo, dando como resultado una distribución de las alturas claramente asimétrica.

$$\text{Biomasa} \left(\frac{\text{kg}}{\text{ha}} \right) = 1,063 \times 31984,29 \times e^{(0,050 \times \text{Elev.máxima})} \times e^{(-0,370 \times \text{Asimetría})} \quad (5)$$

Lekuona Zuazo I., Montealegre Gracia A. L. y Lamelas Gracia 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 (Artículos)*, nº 20, p. 87-107. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.539>

Cabe señalar que al modelo se le aplicó una transformación logarítmica inversa, puesto que fue construido con la variable dependiente transformada con objeto de cumplir las hipótesis estadísticas básicas propias de un modelo de regresión lineal. En cuanto a los estadísticos de bondad del ajuste, el modelo presentó un R^2 de 0,67, un ECM de 51,63 tn/ha -lo que supone un ECM relativo del 32,66 %- y un sesgo de 0,08.

En la Figura 5 se representa la confrontación de los valores de biomasa predichos por el modelo y la biomasa observada, que fue calculada a partir de los datos del IFN4.

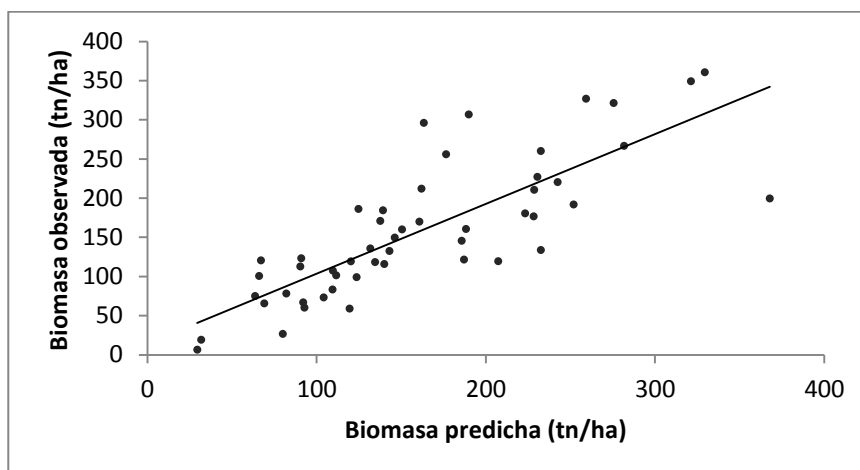


Figura 5: Comparación de la biomasa observada y predicha por el modelo.

Por otro lado, este modelo fue espacializado utilizando dos resoluciones de píxel diferentes: 45 y 50 m de lado. El resultado del análisis de correlación entre la biomasa de cada parcela y la predicha para los dos tamaños de píxel, 0,81 y 0,75, respectivamente, determinó como más adecuado el píxel de 45 m para realizar la cartografía final (Figura 6).

Lekuona Zuazo I., Montealegre Gracia A. L. y Lamelas Gracia 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* (Artículos), nº 20, p. 87-107. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.539>

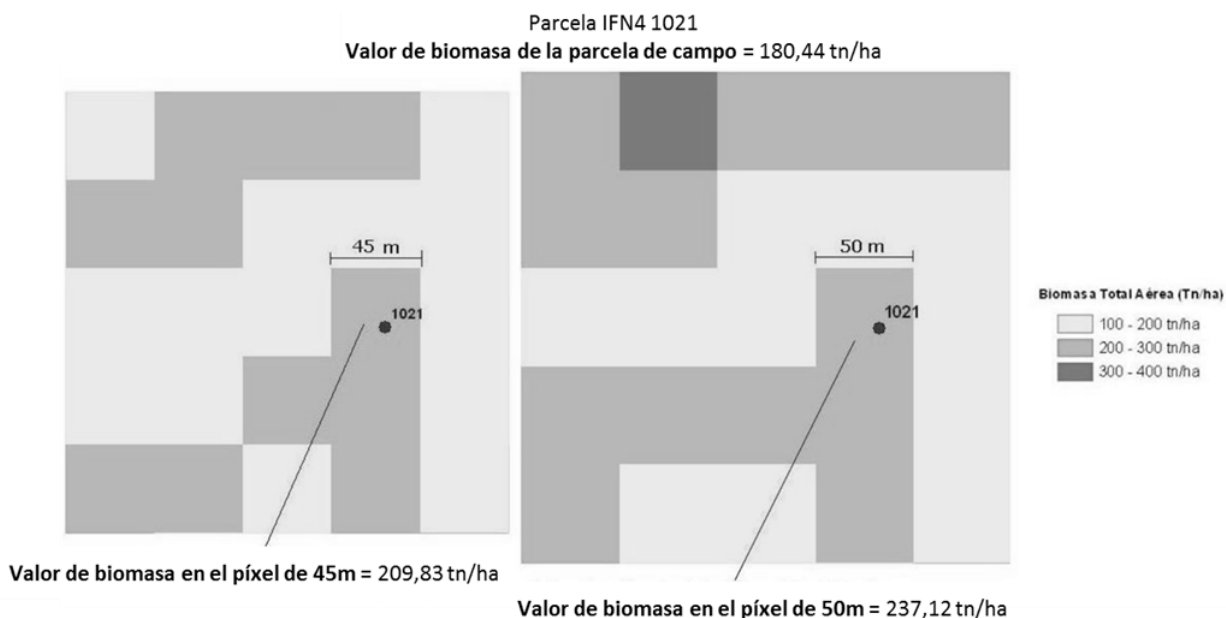


Figura 6. Ejemplo sobre las diferencias en el valor de biomasa estimado para cada resolución de píxel (45 y 50 m). El valor de biomasa de la parcela del IFN4 es el mismo, pero el del píxel sobre el que se sitúa es diferente dependiendo de su tamaño.

Los resultados obtenidos para el conjunto de la comarca Arratia-Nerbioi muestran un valor medio de biomasa de 134,04 tn/ha y un valor máximo de 656,82 tn/ha. Como se puede observar en la Figura 7, destacan varias zonas con valores altos de biomasa en las laderas expuestas al norte de los valles de Zeberio y Arratia. Sin embargo, la discontinuidad espacial que presentan estas zonas responde principalmente a la alternancia de masas de *Pinus radiata* en distinto estado de crecimiento, lo cual es debido a la explotación maderera que se ha realizado a lo largo del tiempo, y al tamaño de las repoblaciones, que generalmente se dan en pequeñas propiedades privadas.

Las zonas de mayor biomasa coinciden con las masas de más edad, volumen y altura dominante, es decir, repoblaciones que se efectuaron en torno a los años 70 del siglo XX. En esa época, el *Pinus radiata* era considerado clave para compensar el déficit de madera para la industria papelera y del tablero, que entonces estaba en auge. Además, subieron los precios de la madera, y la repoblación forestal fue una alternativa rentable de inversión. Por tanto, conviene remarcar que muchas de estas masas de mayor biomasa pueden ser repoblaciones que no han sido cortadas en turno. La extracción de la madera depende en gran medida de los precios de la materia prima y de los costes de efectuar la saca, que pueden incrementarse hasta el punto de no hacerla rentable, sobre todo por la falta de infraestructuras (pistas, vías de saca, etc.) y por la complejidad de la topografía del terreno, que condicionarán el tipo de maquinaria a utilizar.

Lekuona Zuazo I., Montealegre Gracia A. L. y Lamelas Gracia 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 (Artículos)*, nº 20, p. 87-107. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.539>

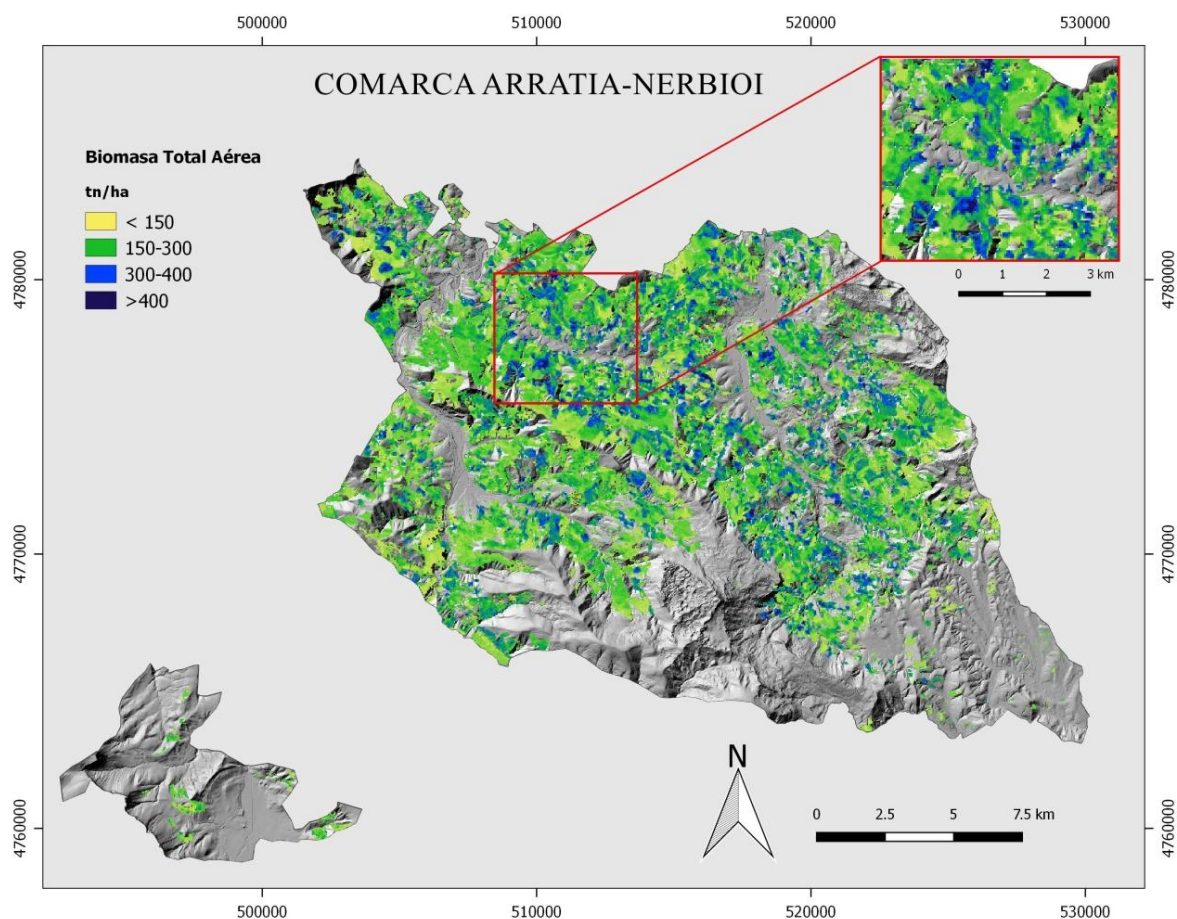


Figura 7: Mapa de la biomasa de *Pinus radiata* en la comarca Arratia-Nerbioi (Bizkaia) y detalle del valle de Zeberio.

4. Discusión

Las nubes de puntos derivadas de los sistemas de teledetección LiDAR aeroportados han sido probados para estimar biomasa en diferentes tipos de masas forestales (Lefsky *et al.*, 2002; Asner *et al.*, 2008; Boudreau *et al.*, 2008; Næsset, 2011; Ene *et al.*, 2012), mostrando mejoras significativas en la precisión con respecto a los inventarios convencionales para áreas entre 20 y 2.000 km². A pesar de la amplia aceptación de la tecnología LiDAR, un reducido número de investigaciones se ha centrado en el *Pinus radiata*, una de las especies más importantes de la región atlántica por su valor económico.

El presente trabajo muestra una aproximación a escala comarcal de la relación entre el IFN4 (2011) y los datos LiDAR-PNOA (2012) que confirma la utilidad conjunta de los mismos. A tenor de los resultados obtenidos, se puede afirmar que el uso de sensores LiDAR aeroportados de huella pequeña y baja densidad de puntos, proporciona resultados aceptables a la hora de estimar de forma

Lekuona Zuazo I., Montealegre Gracia A. L. y Lamelas Gracia 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* (Artículos), nº 20, p. 87-107. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.539>

indirecta la biomasa arbórea (Bortolot y Wynne, 2005), la cual constituye uno de los sumideros de carbono atmosférico más grande y dinámico de los ecosistemas forestales (Ene *et al.*, 2012).

El buen ajuste del modelo lineal revela la idoneidad de la metodología adoptada. Aunque el ECM alrededor de 50 tn/ha puede parecer alto, debe tenerse en cuenta que los datos de inventario cubrían un amplio rango de valores, evidenciado por una desviación típica de 86,50 tn/ha.

Por otro lado, también debe tenerse en cuenta que una de las fases más importantes en la realización de los inventarios forestales con LiDAR es la localización precisa de las parcelas de campo. En este sentido, el desconocimiento de las coordenadas precisas de los centros de parcela del IFN hace que la correspondencia entre los datos de campo y las nubes de puntos recortadas con las dimensiones de las parcelas no sea totalmente fiable, y es por ello que la combinación de datos IFN y LiDAR no se ha utilizado frecuentemente. Los datos de campo utilizados presentan cierto error posicional y de medida, y aunque en la selección de parcelas se tomaron aquellas que, pese al margen de error, inequívocamente se situaran sobre masas de *Pinus radiata*, no se conocían las coordenadas exactas del centro de las parcelas. Debido a esta circunstancia, la muestra inicial de 66 parcelas del IFN situadas en masas de *Pinus radiata* en el área de estudio, tuvo que ser analizada exhaustivamente, disminuyendo así a 51 el número de parcelas disponibles para ser utilizadas, y obteniendo una fracción de muestreo de 0,05 %. Aunque Gutiérrez *et al.* (2003) sugieren una intensidad de muestreo del 10 % para inventarios forestales con LiDAR, se considera que el modelo obtenido es aceptable, similar al que González *et al.* (2012) obtuvieron en el modelo de estimación de biomasa para masas de *Pinus radiata* en Galicia (R^2 de 0,68), con una fracción de muestreo del 33,75 %, y en el que también se refleja la relación inversa de la asimetría de la distribución de los retornos con la biomasa. Con esta misma incertidumbre sobre la localización precisa de las parcelas, García (2010) obtuvo un R^2 de 0,88 en masas de *Pinus nigra* en Cuenca, en un modelo que incluye, además de la asimetría, los percentiles 30 y 95, y el porcentaje de retornos por encima de 2 m de altura.

A pesar de la baja densidad de puntos de los datos del PNOA, se encontraron correlaciones altas y significativas entre la biomasa y las variables LiDAR. Teniendo en cuenta que la densidad de puntos repercute directamente sobre los costes de adquisición de datos LiDAR (Maltamo *et al.*, 2014), los resultados de este trabajo reafirman los presentados por Gonzalez *et al.* (2012). En su estudio señalaban que es viable estimar variables forestales a nivel de masa con baja densidad de puntos (hasta 0,5 puntos/m²). Por consiguiente, los datos de LiDAR-PNOA se convierten en una excelente fuente de información para la gestión forestal, reduciendo los costes de inventario y mejorando las estimaciones de biomasa para diversos fines.

La extrapolación del modelo obtenido a otras áreas de similares características puede considerarse como un inconveniente común cuando se emplean datos LiDAR, ya que está calibrado para un área relativamente reducida. Sin embargo, la transferibilidad de las ecuaciones o modelos es también un problema que afecta a los datos derivados de sensores de teledetección óptica, como demuestra Foody *et al.* (2003). El enfoque adoptado en el presente trabajo se utiliza comúnmente debido a la dificultad de desarrollar ecuaciones específicas que requieren un muestreo destructivo para un gran número de parcelas (García *et al.*, 2010).

Lekuona Zuazo I., Montealegre Gracia A. L. y Lamelas Gracia 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* (Artículos), nº 20, p. 87-107. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.539>

Finalmente, con el objetivo de mejorar los resultados, se deben considerar diferentes líneas de investigación futura. En primer lugar, los modelos de regresión no paramétricos deberían explorarse, ya que se han utilizado con éxito en la estimación de fracciones de biomasa forestal (Maltamo *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2014). En segundo lugar, tal y como sugieren Isaev *et al.* (2002), Koch (2010) y García *et al.* (2010), la integración de los datos LiDAR con datos ópticos multiespectrales, hiperespectrales y SAR podría ser una alternativa metodológica. Además, la utilización conjunta de las variables derivadas de la intensidad del pulso láser, que consideran las variaciones en la respuesta espectral de la materia vegetal que compone el dosel arbóreo en la región del infrarrojo cercano, y de las variables relacionadas con la altura de los retornos, podría mejorar la precisión según García *et al.* (2010). Sin embargo, hay que tener en cuenta que no se puede realizar una calibración adecuada de los datos de intensidad. En tercer lugar, se deben centrar los esfuerzos en la evaluación de la biomasa del sotobosque, ya que también ejerce un papel relevante como sumidero de carbono y es de interés para analizar la carga de combustible. Por último, esta investigación proporciona la motivación necesaria para evaluar la idoneidad de los datos LiDAR-PNOA en otras especies forestales de la región atlántica, como el *Pinus pinaster* o el *Eucalyptus sp.* que suelen acompañar a las formaciones de *Pinus radiata*.

En definitiva, la cuantificación y la cartografía de la biomasa arbórea aérea desde una perspectiva dinámica para conocer los cambios a lo largo del tiempo debidos a las actividades antrópicas, al crecimiento natural del bosque o a los incendios forestales, serán posibles si España finaliza su segunda cobertura de datos LiDAR en el marco del PNOA, que se prevé con una densidad nominal de 1 punto/m², superior a la actual.

5. Conclusiones

Los resultados obtenidos ponen de manifiesto la utilidad de los datos del IFN4 combinados con los datos LiDAR-PNOA de baja densidad para la construcción de un modelo de estimación de la biomasa aérea forestal. La disponibilidad de datos capturados con esta tecnología LiDAR de manera continua para todo el territorio ha permitido realizar, mediante la aplicación de este modelo de regresión lineal, una cartografía de la distribución de la biomasa en las plantaciones forestales de *Pinus radiata* de la zona de estudio.

La utilización de los datos del IFN, ya disponibles, podría contribuir a planificar mejor el trabajo de campo y a conocer "desde gabinete" la distribución de la biomasa y de otras variables estructurales útiles para la gestión forestal de estas plantaciones, cuya vocación es claramente productiva. Además, se prevé que el próximo IFN georreferencie las parcelas con precisión submétrica (Alberdi *et al.*, 2016).

Sería deseable la aplicación de la metodología presentada en este trabajo a zonas más amplias e incluso sobre otras especies forestales y variables. Dado que, tanto el IFN como las coberturas LiDAR del PNOA son productos periódicos, la disponibilidad en los próximos años de nuevos datos constituye un aspecto relevante para desarrollar nuevas experiencias para el inventario forestal y la gestión sostenible del bosque.

Lekuona Zuazo I., Montealegre Gracia A. L. y Lamelas Gracia 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 (Artículos)*, nº 20, p. 87-107. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.539>

Agradecimientos

Los autores agradecen a Alejandro Cantero de Hazi Fundazioa su apoyo durante el trabajo de campo llevado a cabo para determinar los centros de algunas de las parcelas del IFN4.

Referencias bibliográficas

- Alberdi, I., Sandoval, V., Condés, S., Cañellas, I., Vallejo, R. (2016). El Inventario Forestal Nacional español, una herramienta para el conocimiento, la gestión y la conservación de los ecosistemas forestales arbolados. *Ecosistemas*, 25, pp. 88-97.
- Albizu, P. (2013). "Aprovisionamiento de madera de coníferas a la industria de Euskadi". *Rev. Montes*, 113, pp.25-27.
- Andersen, H.-E., McGaughey, R.J., Reutebuch, S.E. (2005). "Estimating forest canopy fuel parameters using LIDAR data". *Remote Sens. Environ*, 94, pp. 441-449.
- Asner, G.P., Hughes, R.F., Varga, T.A., Knapp, D.E., Kennedy-Bowdoin, T. (2008). "Environmental and Biotic Controls over Aboveground Biomass Throughout a Tropical Rain Forest". *Ecosystems*, 12, pp. 261-278.
- Azpitarte, J. (2013). "Evolución del macizo y del asociacionismo forestal vasco". *Rev. Montes*, 113, pp.15-17.
- Bortolot, Z.J y Wynne, R.H. (2005). "Estimating forest biomass using small footprint LiDAR data: An individual tree-based approach that incorporates training data". *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 59, pp. 342-360.
- Boudreau, J., Nelson, R.F., Margolis, H.A., Beaudoin, A., Guindon, L., Kimes, D.S. (2008). "Regional aboveground forest biomass using airborne and spaceborne LiDAR in Québec". *Remote Sens. Environ*, 112, pp. 3876-3890.
- 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 Sens. Environ*, 156, pp. 322-334.
- Cabrera, J., Lamelas, M.T., Montealegre, A.L., de la Riva, J. (2014). "Estimación de variables dasométricas a partir de datos LiDAR PNOA en masas regulares de *Pinus halepensis* Mill", en XVI Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica. Alicante.
- Ene, L.T., Næsset, E., Gobakken, T., Gregoire, T.G., Ståhl, G., Nelson, R. (2012). "Assessing the accuracy of regional LiDAR-based biomass estimation using a simulation approach". *Remote Sens. Environ*, 123, pp. 579-592.
- Footy, G.M., Boyd, D.S., Cutler, M.E.J. (2003). "Predictive relations of tropical forest biomass from Landsat TM data and their transferability between regions". *Remote Sens. Environ*, 85, pp. 463-474.
- García, D. (2010). *Estimación de variables de interés forestal basada en datos lidar en el monte número 117 del C.U.P. Término municipal de Cuenca*. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Forestal-Universidad politécnica de Madrid.

Lekuona Zuazo I., Montealegre Gracia A. L. y Lamelas Gracia 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* (Artículos), nº 20, p. 87-107. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.539>

García, M., Riaño, 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 Sensing of Environment*, 114, 4, pp. 816-830.

González, E., Diéguez, 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.

Gutiérrez, M., García, D., García, A., Martín, S., Núñez, M.V., González, C., Ayuga, E. (2013). Reducción del número de parcelas de muestreo al incorporar información auxiliar LiDAR en la estimación de variables dasométricas. En 6º Congreso Forestal Español (6CFE01-482). Sociedad Española de Ciencias Forestales.

Hair, J.F., Anderson, R.E., Tatham, R.L., Black, W.C. (1999). *Análisis multivariante*. Prentice Hall Iberia, Madrid.

Hazi Fundazioa (2013). *Medir el bosque, comprender el paisaje*. Araba, Fundación Hazi Fundazioa.

Isaev, A.S., Korovin, G.N., Bartalev, S.A., Ershov, D.V., Janetos, A., Kasischke, E.S., Shugart, H.H., French, N.H.F., Orlick, B.E., Murphy, T.L. (2002). "Using Remote Sensing to Assess Russian Forest Fire Carbon Emissions". *Clim. Change*, 55, pp. 235-249.

Koch, B. (2010). "Status and future of laser scanning, synthetic aperture radar and hyperspectral remote sensing data for forest biomass assessment". *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens*, 65, pp. 581-590.

Kraus, K., Pfeifer, N. (1998). "Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data". *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens*, 53, pp. 193-203.

Leboeuf, A., Beaudoin, A., Fournier, R.A., Guindon, L., Luther, J.E., Lambert, M.C. (2007). "A shadow fraction method for mapping biomass of northern boreal black spruce forests using QuickBird imagery". *Remote Sens. Environ*, 110, pp. 488-500.

Lefsky, M.A., Cohen, W.B., Parker, G.G., Harding, D.J. (2002). "Lidar Remote Sensing for Ecosystem Studies". *BioScience*, 52, pp. 19-30.

Lim, K.S., Treitz, P.M. (2004). "Estimation of above ground forest biomass from airborne discrete return laser scanner data using canopy-based quantile estimators". *Scand. J. For. Res.*, 19, pp. 558-570.

MAGRAMA, Departamento de Desarrollo Económico y Competitividad del Gobierno Vasco (2011). *Datos e informes del 4º Inventario Forestal Nacional en la Comunidad Autónoma de Euskadi*. [Consulta 05-09-2017]. Disponible en: http://www.nasdap.ejgv.euskadi.eus/r50-774/es/contenidos/informacion/inventario_forestal_2011/es_agripes/inventario_forestal_2011.html

MAGRAMA (2015). *El Inventario Forestal Nacional. Cincuenta años conociendo el Bosque*. Madrid, MAGRAMA. [Consulta: 23-05-2016]. Disponible en: http://www.magrama.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/politica-forestal/inventario-cartografia/inventario-forestal-nacional/50_anios_IFN.aspx.

Maltamo, M., Næsset, E., Vauhkonen, J. (2014). *Forestry Applications of Airborne Laser Scanning: Concepts and Case Studies*. Springer Netherlands.

Lekuona Zuazo I., Montealegre Gracia A. L. y Lamelas Gracia 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 (Artículos)*, n° 20, p. 87-107. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.539>

McGaughey, R. (2009). *FUSION/LDV: Software for LIDAR Data Analysis and Visualization*. US Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, Seattle, WA.

Means, J., Acker, S., Fitt, B., Renslow, M., Emerson, L., Hendrix, C. (2000). "Predicting forest stand characteristics with airborne scanning LiDAR". *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 66, pp. 1367–1371.

Meng, Q., Cieszewski, C.J., Madden, M., Borders, B. (2007). "A linear mixed-effects model of biomass and volume of trees using Landsat ETM+ images". *For. Ecol. Manag.*, 244, pp. 93–101.

Mieville, A., Granier, C., Liousse, C., Guillaume, B., Mouillot, F., Lamarque, J.F., Grégoire, J.M., Pétron, G. (2010). "Emissions of gases and particles from biomass burning during the 20th century using satellite data and an historical reconstruction". *Atmos. Environ.*, 44, pp. 1469–1477.

Montealegre, A.L., Lamelas, M.T., de la Riva, J., García-Martín, A., Escribano, F. (2016). "Use of low point density ALS data to estimate stand-level structural variables in Mediterranean Aleppo pine forest", *Forestry*, 0, pp.1-10.

Montero, G., Ruiz-Peinado, R., Muñoz, M. (2005). Producción de Biomasa y fijación de CO₂ por los bosques españoles. *Monografías INIA: Serie Forestal n°13*. Madrid. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. Ministerio de Educación y Ciencia.

Muukkonen, P., Heiskanen, J. (2007). "Biomass estimation over a large area based on standwise forest inventory data and ASTER and MODIS satellite data: A possibility to verify carbon inventories". *Remote Sens. Environ.*, 107, pp. 617–624.

Naesset, E. (2002). "Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data", *Remote Sensing of Environment*, 80, 1, pp.88-99.

Næsset, E., Gobakken, T. (2008). "Estimation of above- and below-ground biomass across regions of the boreal forest zone using airborne laser". *Remote Sens. Environ.*, 112, pp. 3079–3090.

Næsset, E. (2011). "Estimating above-ground biomass in young forests with airborne laser scanning". *Int. J. Remote Sens.*, 32, pp. 473–501.

Otaola-Urrutxi, M., Errandonea, E. (2012). "Primeros datos de crecimiento y tablas de producción de *Pinus radiata* D. Don en Balmaseda, para un régimen de claras fuerte y turno de 25 años", *Foresta*, 55 pp.129-133

Popescu, S.C. (2007). "Estimating biomass of individual pine trees using airborne lidar". *Biomass Bioenergy*, 31, pp. 646–655.

Rosette, J., Suárez, J., Nelson, R., Los, S., Cook, B., North, P. (2012). "Lidar Remote Sensing for Biomass Assessment", en: Fatoyinbo, T. (Ed.), *Remote Sensing of Biomass: Principles and Applications*. InTech, Rijeka, Croatia, pp. 3–26.

Tanase, M.A., Panciera, R., Lowell, K., Tian, S., García-Martín, A., Walker, J.P. (2014). "Sensitivity of L-Band Radar Backscatter to Forest Biomass in Semiarid Environments: A Comparative Analysis of Parametric and Nonparametric Models", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52, 8, pp. 4671-4685.

Valbuena, M. (2014). *Determinación de variables de forestales de masa y de árboles individuales mediante delineación de copas a partir de datos LiDAR aerotransportado. Aplicación a las masas*

Lekuona Zuazo I., Montealegre Gracia A. L. y Lamelas Gracia 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 (Artículos)*, nº 20, p. 87-107. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.539>

de *Pinus sylvestris* L. en Álava. Tesis doctoral. Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad de la Rioja.

Vermote, E., Elliot, E., Dubovik, O., Lapyonok, T., Chin, M., Giglio, L., Roberts, G.J. (2009). "An approach to estimate global biomass burning emissions of organic and black carbon from MODIS fire radiative power", *Journal of Geophysical Research*, 114, D18, pp. 205-227.

Vosselman, G., Maas, H-G. (2010). *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*. Dunbeath, Whittles Publishing.

Watt, M., Adams, T., Marshall, H., Pont, D., Lee, J., Crawley, D., Watt, P. (2013). "Modelling variation in *Pinus radiata* stem volume and outerwood stress-wave velocity from LiDAR metrics". *N. Z. J. For. Sci.* 43.

Zhang, J., Huang, S., Hogg, E.H., Lieffers, V., Qin, Y., He, F. (2014). "Estimating spatial variation in Alberta forest biomass from a combination of forest inventory and remote sensing data". *Biogeosciences*, 11, pp. 2793–2808.

Zolkos, S.G., Goetz, S.J., Dubayah, R. (2013). "A meta-analysis of terrestrial aboveground biomass estimation using lidar remote sensing". *Remote Sens. Environ.* 128, pp. 289–298.

