

TRABAJO FIN DE MÁSTER

CARTOGRAFÍA DE LA BIOMASA AÉREA TOTAL EN MASAS DE *Pinus radiata* (D.Don) EN LA COMARCA DE ARRATIA-NERBIOI (BIZKAIA) A PARTIR DE DATOS LIDAR-PNOA Y DATOS DEL IFN4

IRATI LEKUONA ZUAZO

Directores: M^a Teresa Lamelas Gracia y Antonio Luis Montealegre Gracia

Máster Universitario en

Tecnologías de la información geográfica para la ordenación del territorio: sistemas de información geográfica y teledetección

Febrero de 2016



**Universidad
Zaragoza**

**Departamento de Geografía
y Ordenación del Territorio**



Resumen

La estimación de la biomasa aérea total (BT) es fundamental para conocer la estructura, el funcionamiento y la dinámica de los ecosistemas forestales, así como para la determinación de la fijación de carbono en la vegetación y para su evaluación como recurso. La disponibilidad de información LiDAR (Light Detection And Ranging) de baja resolución espacial (0,5 puntos/m²), en el marco del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA), junto con la existencia de los datos del Cuarto Inventario Forestal Nacional (IFN4), ha marcado el objetivo principal de este trabajo, consistente en estimar y cartografiar la BT de las masas de *Pinus radiata* (D. Don) de la comarca de Arratia-Nerbioi (Bizkaia).

La BT fue calculada en 51 parcelas de campo del IFN4 aplicando la ecuación alométrica de Montero et al. (2005). Para convertir los valores de BT de la parcela a valores por hectárea, se utilizaron los factores de expansión para cada rango diamétrico de tronco que establece el IFN4. Mediante un análisis de correlación entre estos valores de biomasa y las variables independientes extraídas de las nubes de puntos con los dos tamaños de parcela, se seleccionó el radio óptimo de 25m. Finalmente, un análisis multivariante de regresión lineal permitió generar un modelo predictivo de la BT. Este modelo fue validado mediante la técnica de validación cruzada dejando un dato fuera.

Las variables derivadas de los datos LiDAR incluidas en el modelo ajustado fueron la elevación máxima de los retornos y la asimetría en la distribución de las alturas de los puntos. El coeficiente de determinación del modelo fue 0,67. Para realizar la cartografía final de la BT del área de estudio se analizaron dos tamaños de píxeles (45 y 50m) similares a la superficie de las parcelas circulares de 25m de radio. Mediante un análisis de correlación entre los valores de BT de las parcelas y los valores de predichos según el tamaño de pixel, se determinó como resolución más precisa un tamaño de pixel de 45m.

Los resultados demuestran que, a pesar de la baja densidad de puntos de los datos LiDAR-PNOA, el modelo final puede ser adecuado para ser utilizado en la gestión forestal.

Palabras Clave: Biomasa, inventario forestal, *Pinus radiata* D. Don, LiDAR-PNOA, IFN4.

Abstract

The total aboveground tree biomass (TB) is an environmental variable required to understand the structure, function and dynamics of forest ecosystems, as well as for the determination of carbon sequestration in vegetation and for its evaluation as a resource. The availability of LiDAR (Light Detection And Ranging) information captured at low spatial resolution (0.5 points/m²) by the National Plan for Aerial Orthophotography, together with the fourth National Forest Inventory (IFN4) data, have determined the main objective of this work, consisting of estimating and mapping the TB of *Pinus radiata* (D. Don) of the Arratia-Nerbioi region (Bizkaia).

The TB was calculated in 51 IFN4 field plots applying the allometric equation of Montero et al. (2005). Expansion factors for each diameter range established by the IFN4 were used to estimate the TB values per hectare. A correlation analysis was performed between the TB values and the independent variables extracted from the point cloud, clipped with the optimal radius of 25 m selected. Finally, a multivariate linear regression analysis allowed the generation of a predictive model of the TB. This model was validated using the leave one-out cross-validation technique.

The variables derived from LiDAR data included in the adjusted model were the maximum elevation of returns and the asymmetry in the distribution of the heights. The coefficient of determination of the model was 0.67. For the mapping of the TB of the study area, two pixels sizes (45 and 50 m) similar to the area of the circular plots of 25 m radius were analysed. A correlation analysis between the values of TB at plot-level and the values predicted by the size of pixel, allowed to select the resolution of 45 m.

The results show that despite the LiDAR-PNOA low point density, the final model may be suitable for forest management.

Key Words: Biomass, forest inventory, *Pinus radiata* D. Don, LiDAR-PNOA, IFN4.

Índice general

1. INTRODUCCIÓN	5
1.1 El pino radiata (<i>Pinus radiata</i>) en el País Vasco	6
1.2 Hipótesis y objetivos	9
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	9
2.1 Área de estudio	9
2.2 Datos de campo.....	15
2.2.1 El Cuarto Inventario Forestal Nacional (IFN4) en el País Vasco.....	15
2.2.2 Metodología del Inventario Forestal Nacional y datos utilizados.....	15
2.2.3 Estimación del error en las coordenadas del centro de parcela	17
2.2.4 Selección de parcelas en el área de estudio	17
2.2.5 Obtención de la BT	18
2.3 Datos LiDAR	19
2.3.1 Introducción a la tecnología LiDAR	19
2.3.2 Características del vuelo y de los datos	20
2.3.3 Pretratamiento de los datos LiDAR	21
2.4 Construcción de un modelo de estimación de la BT	24
2.5 Representación cartográfica de la BT	26
3. RESULTADOS	
3.1 Datos de campo.....	27
3.1.1 Estimación del error en las coordenadas del centro de parcela	27
3.1.2 Selección de parcelas del IFN4 en la comarca de Arratia-Nerbioi.....	27
3.1.3 Obtención de la BT	28
3.2 Datos LiDAR	30
3.2.1 Extracción de estadísticos de las nubes de puntos LiDAR	30
3.2.2 Análisis de correlación entre valores de biomasa y estadísticos LiDAR	30
3.3 Modelo de estimación de la BT.....	31
3.3.1 Obtención del modelo	31
3.3.2 Validación del modelo	33
3.3.3 Transformación logarítmica inversa	34
3.4 Representación cartográfica de la BT	34
4. DISCUSIÓN	36
5. CONCLUSIONES.....	37
6. AGRADECIMIENTOS	37
7. BIBLIOGRAFÍA.....	38
8. ANEXOS.....	40
Anexo 1: Tablas complementarias	40
Anexo 2: Fotografías.....	47

Índice de figuras

Figura 1: Ciclo productivo de <i>Pinus radiata</i>	7
Figura 2: Distribución de <i>Pinus radiata</i> en el País Vasco	8
Figura 3: Contribución de las masas de <i>Pinus radiata</i> de distintas Comunidades Autónomas a la superficie total ocupada por la especie en España.....	8
Figura 4: Masas de <i>Pinus radiata</i> en distintos estados de crecimiento en el municipio de Zeberio.....	10
Figura 5: Distribución del estado de las masas de la comarca Arratia-Nerbioi en 2010.....	10
Figura 6: Plantaciones de <i>Pinus radiata</i> en la cabecera del valle de Larragoiti (Zeberio)	11
Figura 7: Localización de la comarca Arratia-Nerbioi en el País Vasco y de las masas de <i>Pinus radiata</i> de la Comarca.....	12
Figura 8: Elevaciones de la comarca Arratia-Nerbioi.....	13
Figura 9: Pendientes topográficas de la comarca de Arratia-Nerbioi.	14
Figura 10: Parcela de radio variable del IFN.....	16
Figura 11: Toma de coordenadas con GPS centimétrico en el centro de la parcela nº175 del IFN4 en Álava.....	17
Figura 12: Sistemas de posicionamiento de un ALS.	19
Figura 13: Retornos de un mismo pulso LiDAR en la vegetación registrados por un sistema de pulsos discretos.	20
Figura 14: Hojas LAS de 2x2km que cubren el territorio del área de estudio.	22
Figura 15: Normalización de la nube de puntos en la parcela 1171 con radio de 15m y 25m.	23
Figura 16: Normalización de la nube de puntos.	23
Figura 17: Recorte de la nube de puntos LiDAR para distintos radios	24
Figura 18: Diagrama de flujo para el pretratamiento de los datos LiDAR.....	24
Figura 19: Diferencias en el valor de BT estimado para cada resolución	26
Figura 20: Ejemplo de parcelas descartadas y seleccionadas.....	28
Figura 21: Características de las parcelas seleccionadas.....	28
Figura 22: Localización de las parcelas del IFN4 seleccionadas en las masas de <i>Pinus radiata</i> del área de estudio.	29
Figura 23: Gráficas básicas de diagnóstico del modelo de estimación de BT.	33
Figura 24: Distribución la biomasa total aérea en la comarca de Arratia Nerbioi.	35

Índice de tablas

Tabla 1: Estado de las masas de <i>Pinus radiata</i> presentes en la comarca Arratia-Nerbioi.	10
Tabla 2: Factor de expansión del Inventario Forestal Nacional.....	16
Tabla 3: Parámetros de la función y SEE para el cálculo de la BT de <i>Pinus radiata</i> según Montero et al (2005)	18
Tabla 4: Coordenadas tomadas con GPS diferencial y coordenadas dadas por el IFN4 en las parcelas en las que se encontró el rejón.	27
Tabla 5: Resumen del error en el posicionamiento de las parcelas del IFN4 encontradas.....	27
Tabla 6: Resumen de los valores de BT obtenidos	28
Tabla 7: Resumen de los estadísticos LiDAR utilizados en el modelo predictivo de la biomasa.....	30
Tabla 8: Coeficientes de correlación de Spearman (Rho) entre la BT y los estadísticos LiDAR en parcelas de 15m y 25m de radio.	31
Tabla 9: Principales estadísticas del modelo de estimación de la biomasa total aérea (BT)	32
Tabla 10: Diagnóstico del modelo de estimación de BT.....	32
Tabla 11: Coeficientes del modelo original y final (corregidos mediante la validación cruzada).	33
Tabla 12: Validación del modelo de estimación de la biomasa aérea total.....	34
Tabla 13: Coeficientes de correlación de Spearman entre la biomasa calculada para cada parcela y la calculada para ese pixel.....	34
Tabla 14: Resumen de los valores BT (tn/ha) obtenidos por el modelo predictivo en la cartografía final.	34

1. INTRODUCCIÓN

El conocimiento del estado de las masas forestales y su evolución es esencial para la gestión de las mismas. Los inventarios forestales, que se repiten en el tiempo, dan a conocer la evolución de las superficies arboladas, así como su estado cuantitativo y cualitativo, ya que están destinados a estimar y localizar los recursos forestales de un territorio. Aunque tradicionalmente los inventarios consistían en medir los diámetros y alturas de los árboles para estimar las existencias maderables o crecimientos anuales del arbolado, actualmente se toman también medidas de otros parámetros, como la existencia de daños, presencia de especies indicadoras, características de la parcela, etc. (Ministerio de Medio Ambiente, 2014).

En el ámbito forestal, uno de los parámetros que recaba más atención en la actualidad es la biomasa, que se define como el peso de materia orgánica que existe en un ecosistema forestal por encima y por debajo de la superficie del suelo, y que normalmente se cuantifica en toneladas por hectárea de peso verde o seco, o a través de valores modulares por clases diamétricas (Montero *et al.*, 2005). Su interés no solo se debe a su potencial como fuente de energía renovable, sino que, además, la biomasa se puede traducir en cantidad de carbono retenido por la vegetación y en dióxido de carbono (CO₂) emitido a la atmósfera como consecuencia de un fuego forestal (Andreae y Merlet, 2001; Palacios-Orueta *et al.*, 2001; Bortolot y Wynne, 2005; Condes y Riaño, 2005; Mateos *et al.*, 2012; Montero *et al.*, 2005; Vermote *et al.*, 2009).

Los inventarios forestales pueden realizarse pie a pie o por muestreo. Los primeros tienen un coste muy elevado, ya que se deben medir todos los árboles de la masa objeto de estudio, por lo que se reservan para ocasiones en las que exista, por ejemplo, un interés comercial o maderista, o el arbolado sea muy valioso ecológica o económicamente. En los inventarios por muestreo, como es el caso del Inventario Forestal Nacional (IFN), el inventario se realiza en una muestra de la población total a inventariar (fracción de muestreo), teniendo un error de muestreo asociado. Normalmente, se inventaría entre un 0,5% y un 5% de la superficie total (Valbuena, 2014). Posteriormente, mediante tratamientos estadísticos, los datos de los árboles muestreados se extrapolan a nivel de rodal o valores medios por hectárea, y, con otras herramientas como ecuaciones de cubicación, se calculan variables dasométricas como volúmenes, crecimientos, área basimétrica, biomasa, etc. La calidad de las estimaciones depende de que exista un número de parcelas muestreadas suficiente para capturar la variabilidad existente (González *et al.*, 2012). Como la toma de datos es totalmente manual, que exige un alto coste temporal y económico, la frecuencia e intensidad con la que se pueden realizar no se ajusta adecuadamente a las necesarias para una correcta gestión forestal (Hazi, 2013).

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. Entre ellas, los sensores activos LiDAR (Light Detection And Ranging) aerotransportados, que generan información tridimensional, son de gran utilidad y tienen un alto potencial de uso en el ámbito forestal.

La tecnología LiDAR consiste en realizar un barrido de la superficie con un escáner que emite pulsos de luz láser y registra la recepción de sus rebotes, lo que en terminología específica se denominan retornos o ecos. El sensor mide el tiempo que la luz láser emitida tarda en ir y volver desde un objeto en el cual rebota. Como las coordenadas y la dirección exacta de emisión de cada pulso de luz son conocidas (el sistema cuenta con un GPS y un distanciómetro láser), el sensor calcula el espacio recorrido por cada pulso y la tripleta de coordenadas de cada rebote, obteniendo así una información tridimensional. Además, si el sensor tiene una capacidad multiretorno, puede registrar varios retornos dentro de la misma huella del pulso láser. Dependiendo de la permeabilidad de las superficies, el pulso tiene un único retorno (si rebota contra el suelo o una superficie compacta), puede ir retornando sucesivas veces (en la vegetación, por ejemplo) o puede absorberse por completo y no retornar (en el caso del agua).

En las cubiertas vegetales, los múltiples retornos de los pulsos láser que van penetrando en la cubierta y rebotan en los ápices de las copas, ramas, troncos, sotobosque o en el suelo, permiten describir con precisión la estructura de la vegetación y sus estratos, que es fundamental para

cuantificar los recursos forestales. Así, la nube de puntos que corresponde a los rebotes de los pulsos en la vegetación, se puede utilizar para calcular distintos parámetros de interés forestal (Valbuena, 2014; Hazi, 2013). Además, los pulsos que rebotan en el suelo se utilizan para generar Modelos Digitales de Elevaciones (MDE) de gran precisión.

El carácter tridimensional y la estructura de la vegetación que recogen los sensores LiDAR se traducen en unas variables que tienen una alta correlación con las variables dasométricas. Esto permite que se puedan utilizar las variables LiDAR para estimar diferentes variables forestales (Gutiérrez *et al.*, 2013). Para ello, se ajustan regresiones que relacionan los estadísticos que describen la nube de puntos LiDAR con las variables de masa a estimar (Valbuena, 2014).

El proceso para conseguir estas regresiones, y el que se ha seguido en el presente trabajo, es el siguiente (Cabrera *et al.*, 2014; Domingo, 2015; Montealegre *et al.*, 2015):

- Inicialmente, se deben inventariar en campo una serie de parcelas en las que se miden, principalmente, altura (Ht) y diámetro normal (Dn) de los árboles. A partir de estos datos se calculan las variables de masa (variables dependientes) de interés, como pueden ser, volumen, biomasa, área basimétrica, etc. En el presente trabajo, como datos de inventario de campo se han utilizado los relativos al Cuarto Inventario Forestal Nacional (IFN4).
- Posteriormente se extraen las métricas o estadísticos de las nubes de puntos de estas parcelas. Estos parámetros estadísticos son las variables independientes que se ponen en relación con las variables de masa calculadas para las parcelas de campo, con el objetivo de obtener los modelos de regresión lineal que las relacionen.
- Finalmente, mediante estos modelos de regresión obtenidos pueden calcularse estas variables de masa para el conjunto de la nube de puntos en un área, y generar así una cartografía continua de su distribución.

1.1. El pino radiata (*Pinus radiata*) en el País Vasco

El pino radiata, *Pinus radiata* D.Don, conocido también como pino insigne o pino de Monterrey, es una especie originaria de la costa Pacífica de Norte América. Tiene un porte cónico que puede superar los 30 m de altura, y presenta acículas de 10-15 cm, agrupadas de tres en tres. Las piñas, que son serótinas y persistentes, son grandes, se agrupan en racimos y son subsésiles. Requiere abundantes precipitaciones (más de 900 mm/año) y ausencia de sequía estival. Es indiferente al tipo de suelo, aunque se desarrolla mejor en los suelos franco-arenosos y no encharcados que se sitúen principalmente en laderas y por debajo de los 700 m sobre el nivel del mar (Rodríguez *et al.*, 2006).

En su área de distribución natural, la especie *Pinus radiata* no tiene ninguna relevancia forestal, ocupa unas 6.000 ha, y se encuentra en retroceso (Michel, 2005). Pero, su rápido crecimiento y la periodicidad con la que alcanza los máximos de producción en volumen (unos 30-35 años y con crecimientos de 25-30 m³/año en las masas mejoradas genéticamente), han favorecido que se introduzca en muchos países del mundo, principalmente del hemisferio sur, donde ocupa varios millones de hectáreas. Chile, Nueva Zelanda, Australia y Sudáfrica son los países que mayor superficie dedican a esta especie. En España está presente en la Cornisa Cantábrica y Canarias (Michel y Gil, 2013). En todos estos lugares, la vocación de esta especie es la producción maderera, para lo cual se le aplica una silvicultura intensiva.

Su silvicultura es sencilla: se plantan a una densidad de 1500 pies/ha y durante los primeros 4 años se les realiza un desbroce anual que reduce la competencia con el sotobosque. A partir de los 9 años se efectúan 3 claras con las que se reduce la densidad de la plantación, hasta dejar, a los 25 años, la densidad final de corta, unos 240 pies/ha, que se extraerán al finalizar el turno, a los 30-35 años (Figura 1). Los destinos principales de la madera de *Pinus radiata* en el País Vasco son la industria del aserrado, para las maderas de mayor calidad y con diámetro superior a 20 cm, y el desenrollo o la fabricación de pasta de papel para las maderas más delgadas, nudosas o no válidas para el aserrado (Albizu, 2012).

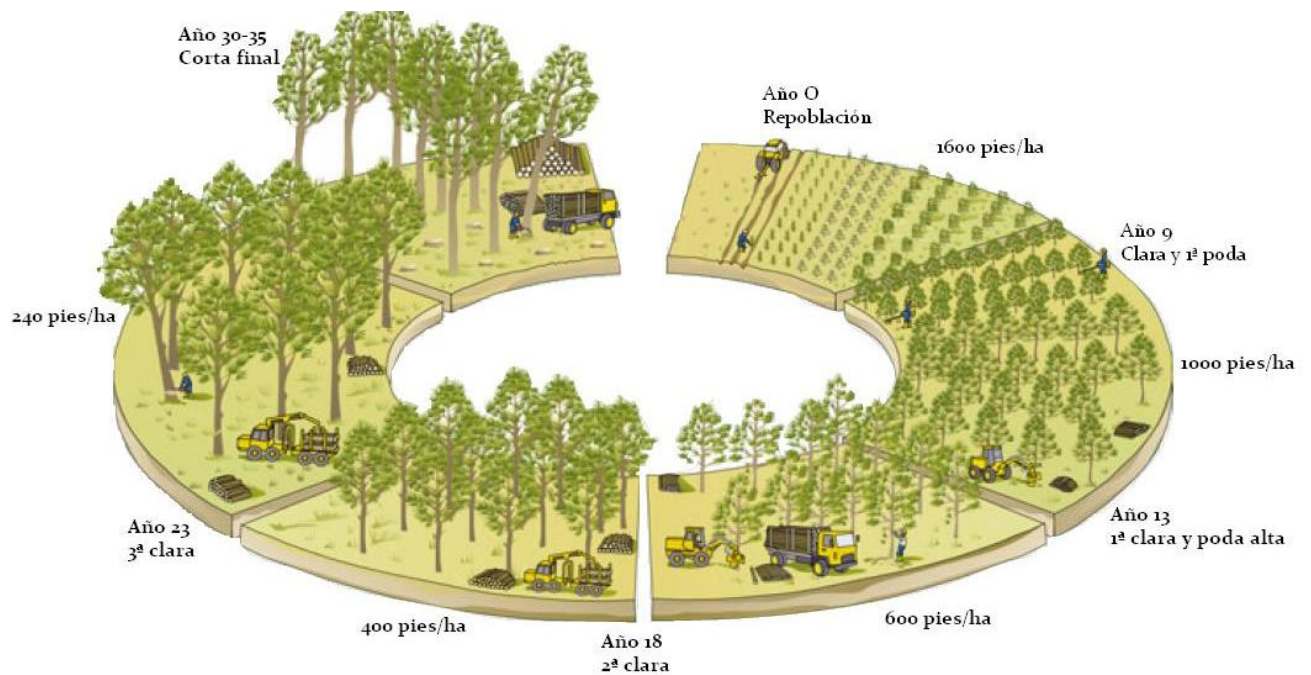


Figura 1: Ciclo productivo de *Pinus radiata*. Fuente: Elaboración propia a partir de Bravo y Ortuzar (2012).

El impulsor de la introducción del *Pinus radiata* en el País Vasco fue Mario Adán de Yarza, a finales del siglo XIX. Adán de Yarza consiguió extraordinarias rentabilidades en los montes y recomendó sustituir los robledales trasmochos y castaños por especies resinosas de crecimiento rápido. Los propietarios de los montes siguieron sus recomendaciones y las repoblaciones con *Pinus radiata* se fueron extendiendo e intensificando (Michel y Gil, 2013). Con los años se fue abordando su silvicultura, y en 1943, Ignacio Echevarría, del Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias, tras haber creado una red de parcelas experimentales con la finalidad de conocer las posibilidades productivas de la especie, definió el tratamiento, turno y régimen de claras de la misma. También preparó las primeras tablas de producción, utilizadas hasta los años 70, y reajustadas en 1975 por Madrigal, en base a las cuales se elaboraron las ecuaciones de cubicación preparadas para el Inventario Forestal del País Vasco en 1996 (Michel, 2005).

En la posguerra, las plantaciones de *Pinus radiata* respondieron a la gran demanda de la industria papelera, de apeas de mina y tableros y se alcanzaron precios de la madera muy atractivos. Tanto que se denominó “oro verde”. Con una mínima inversión de plantación, los beneficios procedían no solo de la corta final, sino también de las podas, claros y entresacas. La superficie ocupada por esta especie pasó de las 22.000 ha en 1938 a 163.000 ha en 1980, en su mayor parte sobre propiedades privadas (Michel, 2005).

En la actualidad, los pinares de *Pinus radiata* del País Vasco se sitúan en la vertiente cantábrica, en las provincias de Gipuzkoa y Bizkaia, y en el extremo noroccidental de Álava (Figura 2). Las plantaciones de esta especie tienen una especial importancia en el sector forestal de la comunidad autónoma, ya que es la primera especie tanto en importancia económica como en extensión (Otaola-Urrutxi y Errandonea, 2012). Según los resultados del IFN4 para el País Vasco, las plantaciones de *Pinus radiata*, con una ocupación de unas 125.000 ha, suponen el 32,04 % de la superficie forestal total, aportando el 44 % del volumen con corteza de la comunidad autónoma y el 90 % de las cortas anuales (Azpitarte, 2013). Estos pinares de *Pinus radiata* suponen el 48 % de la superficie total ocupada por esta especie a nivel estatal (263.271 ha) (Figura 3).

Sin embargo, según los inventarios forestales de 1996, 2005 y 2010, la superficie ocupada por estos pinares está disminuyendo, apreciándose un envejecimiento de las masas, en las que el estado de fustal predomina sobre los estados más jóvenes (Otaola-Urrutxi y Errandonea, 2012). Incluso han

proliferado las masas extra-maduras que no han sido taladas en turno (Albizu, 2012), principalmente debido al descenso de los precios de la madera.

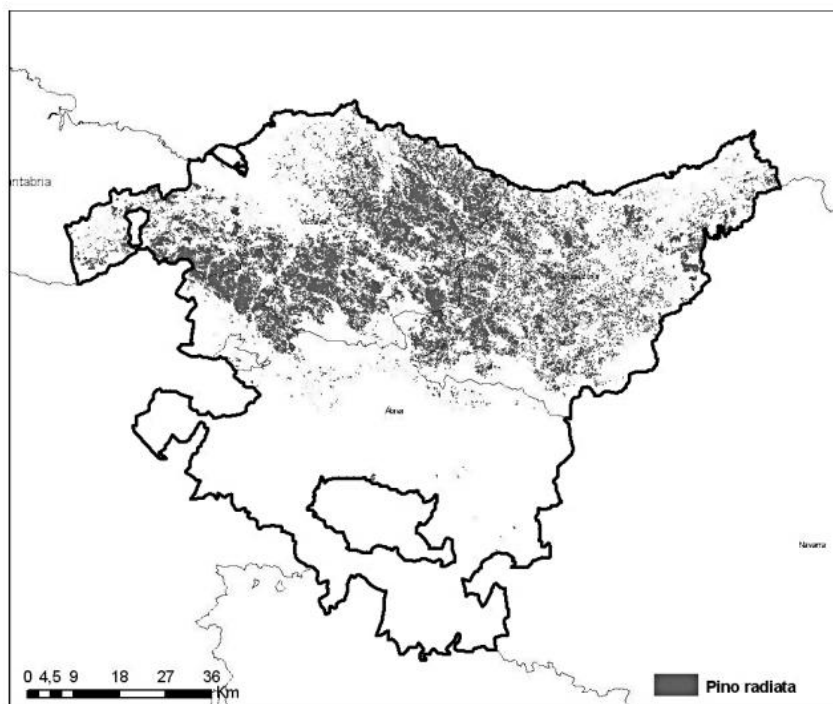


Figura 2: Distribución de *Pinus radiata* en el País Vasco. Fuente: Ainz, 2008.

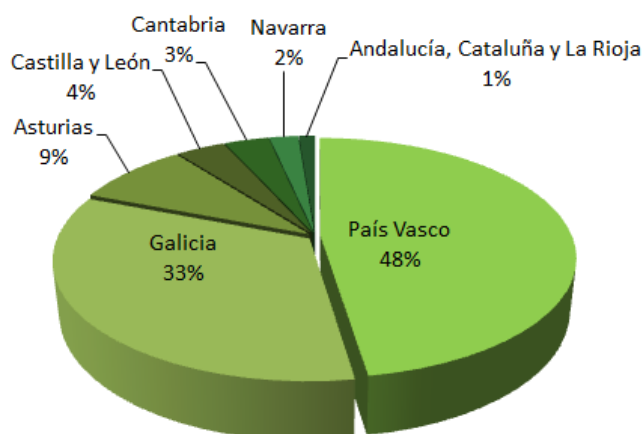


Figura 3: Contribución de las masas de *Pinus radiata* de distintas Comunidades Autónomas a la superficie total ocupada por la especie en España. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de la exposición del 50 aniversario del IFN¹.

En los últimos 10 años, el descenso de las extracciones y del precio de la madera de *Pinus radiata* de los montes de Euskadi ha sido acusado. Esto ha sido debido tanto a la caída del mercado del mueble y la construcción, como a la sobreoferta de madera ocasionada en el macizo de Aquitania, donde la ciclogénesis Klaus derribó 45 millones de metros cúbicos en 2009. No obstante, las asociaciones de forestalistas del País Vasco defienden que existen mercados complementarios a los aprovechamientos habituales, y que la madera de *Pinus radiata* puede competir en mercados de calidad (Azpitarte, 2013).

¹ Los póster y paneles de la exposición se pueden consultar en: http://www.magrama.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/politica-forestal/inventario-cartografia/inventario-forestal-nacional/50_anios_IFN.aspx

Como alternativa a la mala situación de los precios en el sector de la madera, el hecho de que existan amplias superficies de *Pinus radiata* en el País Vasco podría enfocarse en otros términos: su aprovechamiento como biomasa, además de abordarse como una solución energética, podría ayudar a cumplir los objetivos energéticos y las limitaciones de emisión de gases de efecto invernadero establecidos en el Protocolo de Kioto. Además de su papel como sumideros de carbono, el aprovechamiento energético de los residuos forestales fruto de su silvicultura tiene un balance neutro de emisiones de CO₂ a la atmósfera. Sin embargo, la biomasa residual (procedente de claras, podas, apertura de vías de saca, desbroces, etc.) es cara de extraer debido a que se encuentra dispersa y su extracción es de difícil mecanización, por lo que hoy en día, la mayor parte de la biomasa forestal producida en el País Vasco proviene de cortas finales (Mateos *et al.*, 2012).

1.2. Hipótesis y objetivos

Se parte de la hipótesis de que los datos derivados de sensores activos LiDAR permiten estimar la biomasa total aérea (BT) presente en las masas de *Pinus radiata*. Así mismo, se considera que los datos de campo del IFN deben ser útiles en el proceso de construcción de los modelos de estimación de la BT.

El objetivo principal del trabajo es establecer un modelo para estimar la BT presente en las masas de *Pinus radiata* de la comarca Arratia-Nerbioi (País Vasco), a partir de los datos del vuelo LiDAR del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA), de baja densidad de puntos (0,5 puntos/m²), del año 2012 y los datos del IFN4 del año 2011.

Asimismo, se persiguen los siguientes objetivos específicos:

- Localizar en campo un número de parcelas del IFN4 para analizar el error entre las coordenadas del centro de parcela que se indican en los datos de campo (medidos con GPS de mano) y las coordenadas exactas del centro de la parcela (medidas con GPS diferencial).
- Evaluar la idoneidad del uso de los datos de campo del IFN4 para estimar la biomasa a partir de los datos LiDAR del PNOA.
- Analizar las correlaciones entre la variable BT calculada a partir de los datos de campo de las parcelas del IFN4 y los datos del vuelo LiDAR para seleccionar el tamaño de parcela óptimo a utilizar.
- Generar un modelo estadísticamente significativo a partir de los datos LiDAR que permita calcular y espacializar la BT presente en el conjunto del área de estudio.
- Analizar cuál es el tamaño de píxel óptimo para elaborar una cartografía de la distribución de BT en la comarca que es objeto de estudio, teniendo en cuenta el tamaño de parcela óptimo.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

El área de estudio corresponde a los pinares de *Pinus radiata* de la comarca Arratia-Nerbioi, situada en la provincia de Bizkaia, (País Vasco) (Figura 7).

La comarca tiene una superficie de 400,63 km² y engloba 15 municipios (Arakaldo, Arantzazu, Areatza, Arrankudiaga, Artea, Bedia, Dima, Igorre, Lemoa, Orozko, Ubide, Ugao, Orduña, Zeanuri y Zeberio), con un total de 22.892 habitantes². El 3,6 % de la población y el 4,4% de las empresas de la comarca se dedican al sector agroforestal, en el que, el 60,50 % de la superficie destinada al sector está cubierta por plantaciones forestales.

² Cifra oficial de población resultante de la revisión del Padrón municipal a 1 de enero de 2014. Fuente: INE

Tal y como se indica en la Tabla 1, según el Mapa Forestal Español 1:25000 (MFE25) de 2010, el 42 % de las plantaciones forestales de *Pinus radiata* de la comarca Arratia-Nerbioi se encontraban 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% eran terrenos en los que se había talado la masa y no habían vuelto a ser repoblados (Figuras 4 y 5). En total, las masas de *Pinus radiata* cubren una extensión dentro de la comarca de casi 17.700 ha, lo que supone que el 44% del total de la superficie de esta comarca esté cubierta por plantaciones de ésta especie.

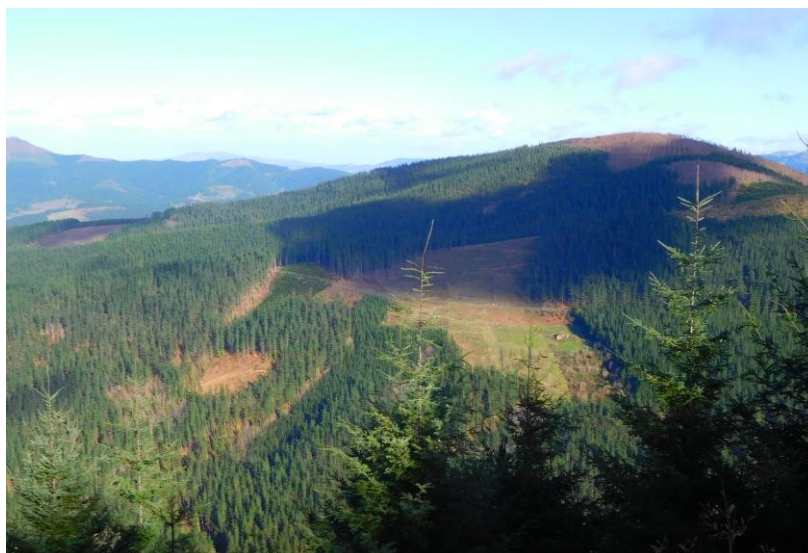


Figura 4: Masas de *Pinus radiata* en distintos estados de crecimiento en el municipio de Zeberio. Fuente: elaboración propia.

Tabla 1: Estado de las masas de *Pinus radiata* presentes en la comarca Arratia-Nerbioi según el MEF25.

Estado de la masa	Número de masas	Porcentaje representado	Superficie (ha)
Fustal	1438	42,28	9043,40
Latizal	791	23,26	3947,86
Monte bravo	617	18,14	2534,75
Repoblado	401	11,79	1589,77
Terrenos talados	154	4,53	541,12

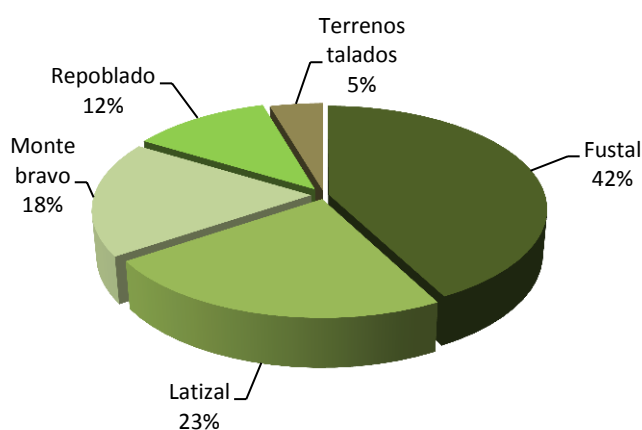


Figura 5: Distribución del estado de las masas de la comarca Arratia-Nerbioi en 2010. Fuente: elaboración propia a partir de los datos del MFE25.

La comarca tiene un clima de carácter atlántico y con influencia oceánica, con lluvias repartidas a lo largo de todo el año (1200 mm al año, con mínimos en julio pero con ausencia de sequía) y con una oscilación térmica leve (5,5 °C de media en enero y 18 °C de media en agosto). Los inviernos son suaves y las heladas raras. Tiene por tanto, el clima idóneo para las plantaciones productivas de *Pinus radiata*.

En cuanto al relieve, la comarca está articulada por los valles de Orozko, Altube, Arratia y Zeberio, donde se dan las mínimas altitudes, por debajo de los 200 m sobre el nivel del mar. Las divisorias entre los valles se sitúan entre los 600-800 m, y las alturas máximas, por encima de los 1000 m, se dan en el límite meridional de la comarca, donde se encuentran los macizos montañosos de Itxina y Gorbea (1.475m) (Figura 8). Las pendientes oscilan entre los 0° en los fondos de valle, y los 45° en las zonas más escarpadas. Por lo general, las masas de *Pinus radiata* se sitúan en las laderas por debajo de los 600 m, sin llegar a los fondos de valle, donde se localizan las infraestructuras y pastos. Las laderas en las que se encuentran las plantaciones, tienen pendientes de más del 30%, que pueden superar el 60% en las cabeceras de los valles, lo que condiciona fuertemente la maquinaria que en ellas se puede utilizar (Figuras 6 y 9).

En cuanto a la litología de la comarca, dominan las calizas, margas, areniscas y limolitas.



Figura 6: Plantaciones de *Pinus radiata* en la cabecera del valle de Larragoiti (Zeberio). Fuente: elaboración propia

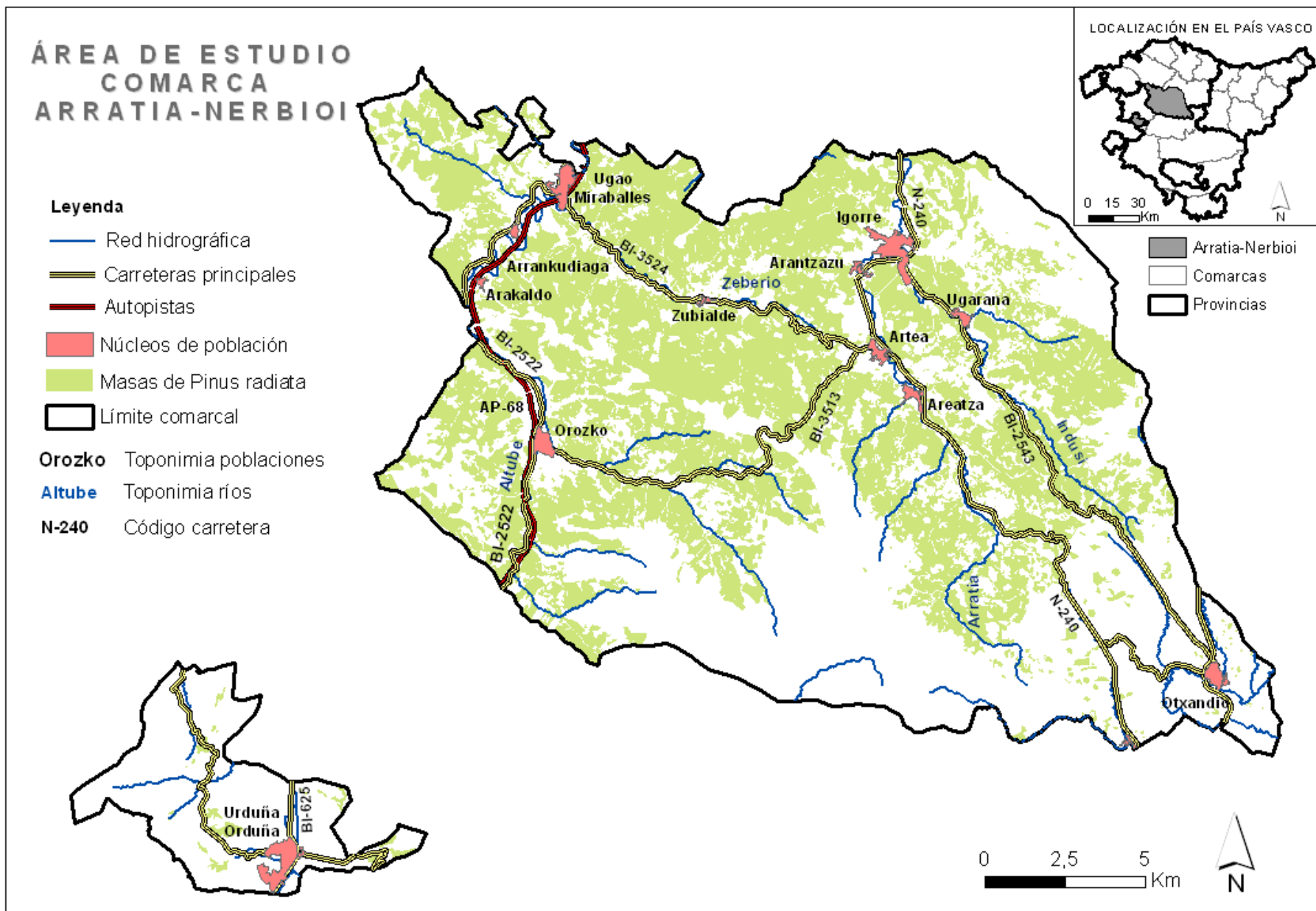


Figura 7: Localización de la comarca Arratia-Nerbioi en el País Vasco y de las masas de *Pinus radiata* de la Comarca.

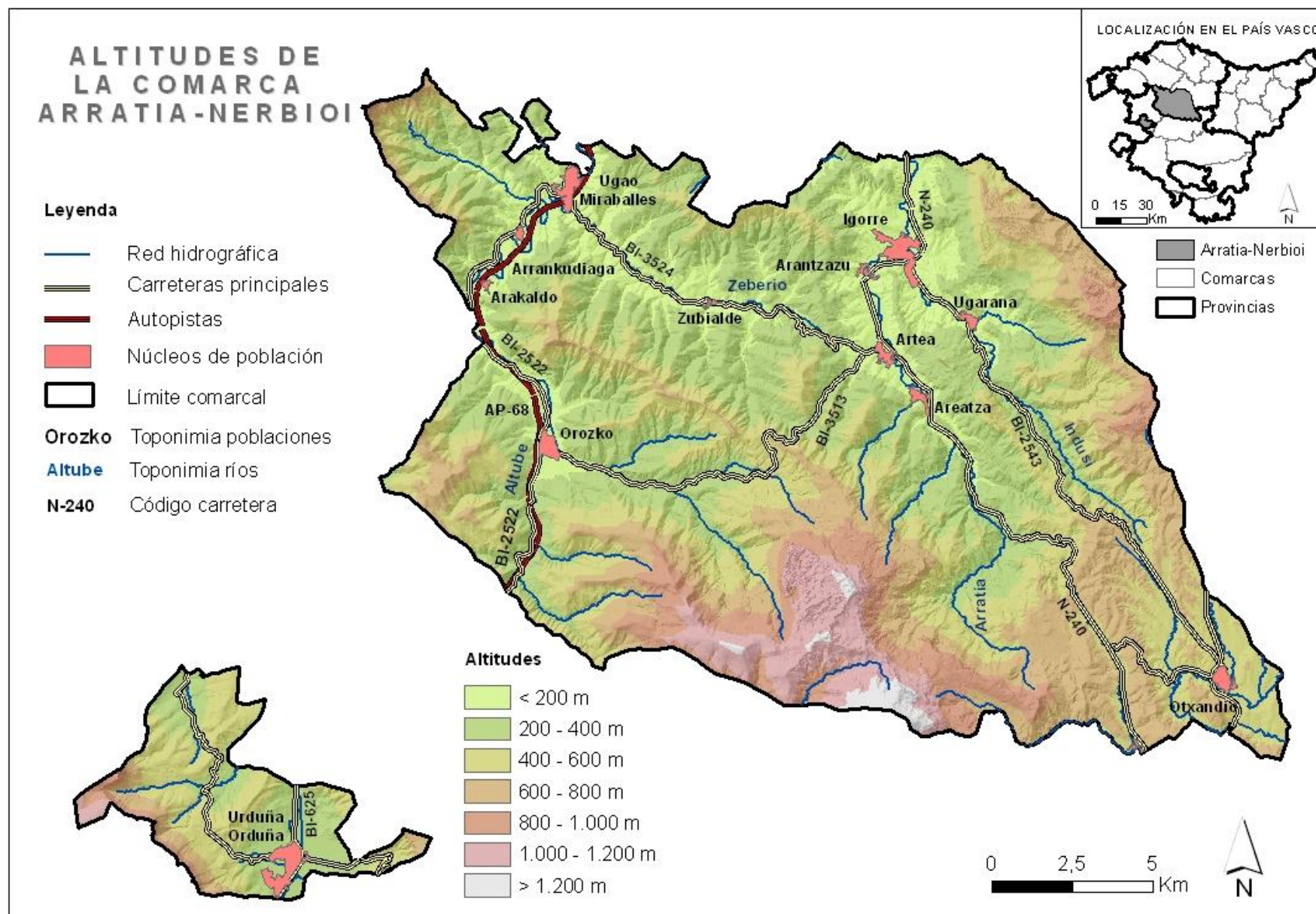


Figura 8: Elevaciones de la comarca Arratia-Nerbioi.

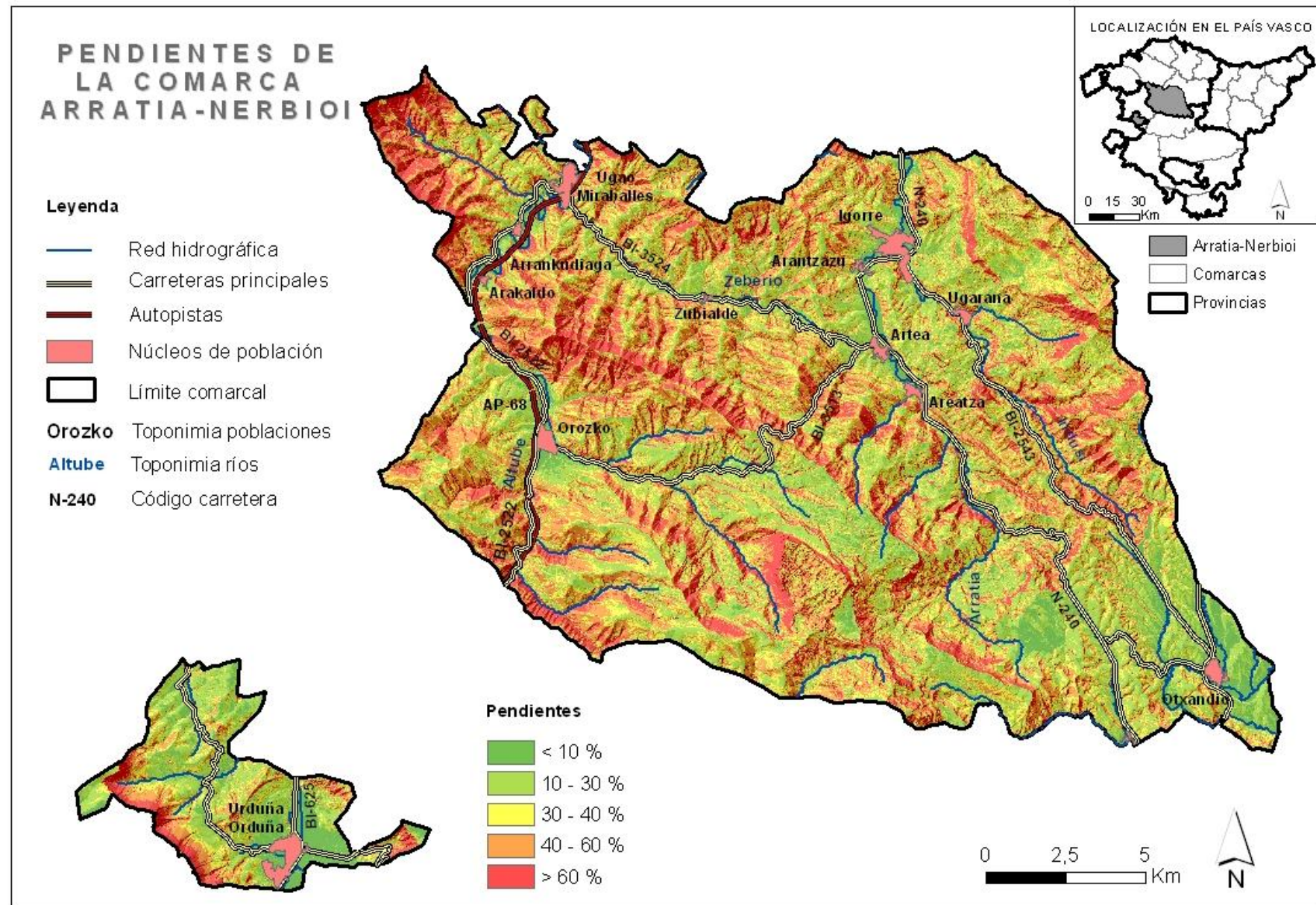


Figura 9: Pendientes topográficas de la comarca de Arratia-Nerbioi.

2.2 Datos de campo

Los datos de campo que se han utilizado corresponden a los parámetros forestales medidos en 51 parcelas del IFN4, del año 2011, situadas en los pinares de *Pinus radiata* de la comarca área de estudio. Para seleccionar estas 51 parcelas se ha llevado a cabo el proceso descrito en los apartados 2.3 y 2.4.

El Inventario Forestal Nacional (IFN) es un proyecto que informa sobre la evolución dasonómica y ecológica de los bosques nacionales. El proyecto se inició a mediados de los años 60 con el Primer Inventario Forestal Nacional (IFN1), que por primera vez cuantificó la superficie, estructura, dasometría y dendrometría de los bosques y las especies (Vallejo y Sandoval, 2013).

En 1986 se inició el Segundo Inventario Forestal Nacional (IFN2), en el que se estableció la metodología a utilizar, que se ha mantenido durante los siguientes inventarios. Se fijaron las parcelas permanentes, enterrando en el centro de cada parcela un rejón metálico, para que se pudiera localizar en los siguientes inventarios y poder medir así los mismos árboles y parámetros. Asimismo, en esta época se comenzaron a utilizar los sistemas de información geográfica (SIG), que posibilitaron que el IFN proporcionara, además de los datos numéricos medidos en campo, una base cartográfica de temática forestal.

En 1996 se inició el Tercer Inventario Forestal Nacional (IFN3), que incluyó, además del estudio de la estructura de los bosques, otra información estadística de interés para el sector forestal: comparaciones respecto a los inventarios anteriores, estudios de biodiversidad forestal y valoraciones económicas de los montes. Incorporó además el Mapa Forestal de España a escala 1:50.000 (MFE50³).

En 2008 se inicia el Cuarto Inventario Forestal Nacional (IFN4) con una cartografía a escala 1:25.000 (MFE25), que permite mejorar la definición de estratos y la precisión geométrica y temática de las formaciones. Con el IFN4 aumenta, además, la periodicidad del inventario en las zonas productivas de clima atlántico, que hasta entonces, y como en el resto de lugares, era de 10 años. En estas CCAA se realizará a partir de entonces un inventario de baja intensidad cada 5 años (Vallejo y Sandoval, 2013).

2.2.1 El Cuarto Inventario Forestal Nacional en el País Vasco

El País Vasco ha sido la primera comunidad en la que se ha realizado un inventario de baja intensidad cada 5 años. En 2005 se llevó a cabo el trabajo de campo del IFN3, y durante el 2010 y 2011 se realizaron los trabajos del IFN4. En el IFN4 se muestrearon aproximadamente la mitad de las parcelas inventariadas en 2005, debido a problemas de presupuesto para inventariar la totalidad de las parcelas. La estratificación y selección de parcelas se realizó en base a la clasificación de las formaciones arboladas del MFE25, que se elaboró previamente a la ejecución del inventario y en base a una ortofotografía de 2009, con un tamaño mínimo de tesela cartografiable de 0,2 ha (MAGRAMA, 2013).

2.2.2 Metodología del Inventario Forestal Nacional y datos utilizados

A cada parcela de campo del IFN se le asigna un estrato según el MFE25, que están definidos por la especie vegetal, densidad del arbolado, estado de la masa y edad. Dentro de los estratos se pueden definir distintas teselas. Las parcelas de inventario se sitúan en los vértices de la malla kilométrica de coordenadas UTM en sistema de referencia ED50, siempre que estos vértices se sitúen sobre una tesela definida en el MFE25.

La metodología del IFN establece un muestreo en campo mediante parcelas de radio variable. De esta manera, cada parcela está formada por cuatro subparcelas de radio 5, 10, 15 y 25 m. Los árboles que se miden en cada subparcela dependen del Dn que presenten (Figura 10). En la subparcela de

³ El MFE50 se encuentra disponible para descarga en la página web del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente: <http://www.magrama.gob.es/es/biodiversidad/servicios/banco-datos-naturaleza/informacion-disponible/mfe50.aspx>

radio 5 se miden todos los pies mayores, es decir, aquellos que tienen un Dn superior a 7,5 cm. En la de radio 10, se miden aquellos árboles con Dn superior a 12,5 cm. En la subparcela de radio 15 se miden los que tienen Dn superior a 22,5 cm, y finalmente, en la de radio 25 m, aquellos árboles que superan los 42,5 cm de Dn (Ruano *et al.*, 2005; Junta de Castilla y León, 2014).

Para convertir los valores que se obtienen a nivel de parcela a valores por hectárea, el IFN establece unos factores de expansión para cada rango diamétrico, de manera que el peso de cada árbol en el cálculo de variables derivadas depende de su diámetro (Valbuena, 2014). El factor de expansión determina el número de árboles que representa en una hectárea cada árbol medido en la parcela (Tabla 2). Los factores de expansión son el resultado de dividir la superficie de una hectárea por la superficie de la subparcela. La suma de los factores de expansión de cada uno de los árboles de la parcela es el número de árboles por hectárea.

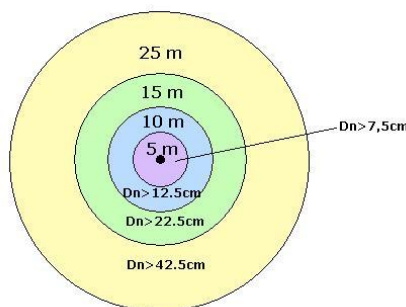


Figura 10: Parcela de radio variable del IFN con los diámetros mínimos que deben tener los pies para que se midan como pies mayores en cada una de las subparcelas.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2: Factor de expansión que se debe aplicar a cada árbol medido en función del rango diamétrico en el que se encuentre.

Rango diamétrico	Factor de expansión
7,5 a 12,5 cm	127,32
12,5 a 22,5 cm	31,83
22,5 a 42,5 cm	14,14
> 42,5 cm	5,09

Los datos de campo tomados por los equipos del IFN4 para el País Vasco se encuentran disponibles en la página del Departamento de Desarrollo Económico y Competitividad del Gobierno Vasco⁴. Los datos se distribuyen como bases de datos Access donde se encuentran desglosados en distintas tablas. De la base de datos disponible del IFN4, en concreto para las parcelas de la provincia de Bizkaia, se han utilizado datos de las siguientes tablas:

- PCParcelas: tabla de la que se han tomado las coordenadas del centro de cada parcela, composición específica, distribución espacial, modelo de combustible, pendiente y orientación, cortas de regeneración o mejoras sobre el vuelo aplicadas y niveles de vegetación de cada parcela.
- PCEspParc: tabla de la que se han obtenido los datos relativos a la especie, ocupación, estado de la masa, forma principal de masa, origen y tratamiento de la misma en cada parcela.

⁴ http://www.nasdap.ejgv.euskadi.eus/r50-774/es/contenidos/informacion/inventario_forestal_2011/es_agripes/inventario_forestal_2011.html

- PCMayores: tabla de la que se han obtenido el número de árbol, rumbo y distancia al centro de la parcela, especie, las dos medidas de Dn, altura total y forma de cubicación de cada árbol y para cada parcela.

A partir de los datos que recoge esta base de datos se elaboraron distintas tablas con diversa información. Las tablas con los datos se recogen en el apartado 3.1.2.

- Tabla general con información sobre cada una de las parcelas: número de parcela, clase, subclase, coordenadas del centro de la parcela según IFN4, fracción de cabida cubierta (FCC) total y de los árboles, distribución espacial, composición específica, modelo de combustible, cortas de regeneración, mejoras sobre el vuelo aplicadas, orientación, pendiente, porcentaje de ocupación por la especie *Pinus radiata*, estado de la masa, forma principal de la masa, origen de la masa y tratamiento de la misma.
- Por cada parcela, se generó una tabla con las medidas de campo de los pies mayores tomados por los equipos del IFN4: número de árbol, distancia de cada árbol al centro de la parcela, especie, las dos medidas de Dn, altura total de cada árbol y forma de cubicación de cada pie.

2.2.3 Estimación del error en las coordenadas del centro de parcelas

Puesto que en el análisis posterior se van a utilizar las coordenadas del centro de la parcela que indica la base de datos del IFN4, y ya que estas coordenadas están tomadas con GPS de mano durante los muestreos en campo (que puede tener un error de varios metros), se ha estimado previamente el error que existe entre estas coordenadas que indica el IFN4 y las coordenadas del centro de la parcela tomadas en campo con un GPS de precisión centimétrica. Para ello, se seleccionaron y buscaron en campo 10 parcelas del IFN4 en masas de *Pinus radiata* de los valles cantábricos de Álava y Bizkaia.

La aproximación a la parcela se realizó siguiendo las coordenadas que indica el IFN4 para cada parcela, con la ayuda de un GPS de mano. Posteriormente, los centros de parcela se localizaron con ayuda de las fotografías de cada parcela, así como del rumbo, distancia y medidas de cada árbol, que permitieron identificar los árboles presentes en cada una, y de un detector de metales que sirvió para localizar el rejón metálico que se encuentra enterrado en el centro de cada parcela.

Una vez localizados los centros de parcela, se tomaron las coordenadas de los mismos con precisión centimétrica, mediante un GPS diferencial (Figura 11).



Figura 11: Toma de coordenadas con GPS centimétrico en el centro de la parcela nº 175 del IFN4 en Álava. Fuente: elaboración propia.

2.2.4 Selección de parcelas en el área de estudio

En primer lugar se creó una capa shapefile (.shp) con la localización de los centros de parcela según las coordenadas de las mismas que indican los datos de campo del IFN4 para Bizkaia. Estos datos se encuentran en sistema de referencia ED50, por lo que la capa se reproyectó a sistema de referencia ETRS89. Posteriormente se pre-seleccionaron únicamente aquellas parcelas que se encontraban en una masa de *Pinus radiata* en el MFE25 y dentro del área de estudio.

Una vez conocido el error, es decir, la distancia entre el centro de parcela según las coordenadas del IFN4 y las coordenadas reales del centro de la parcela, se seleccionaron mediante observación sobre ortofoto aquellas parcelas que pese a este error, se situaban completamente sobre una masa de *Pinus radiata*. Se descartaron aquellas que teniendo en cuenta ese margen de error pudieran estar afectadas por un cambio brusco en el uso del suelo o en el estado de la masa, como rasos o plantaciones en distinto estado de crecimiento o de otras especies.

Esta selección se acompañó además con otros datos que aporta el IFN4, seleccionando las parcelas que cumplieran los siguientes requisitos:

- Las parcelas se encuentran sobre masas homogéneas (el 90% de los árboles pertenecen a la misma especie).
- Las masas sobre las que se sitúan las parcelas deben ser de origen artificial, establecidas mediante plantación y con un tratamiento de monte alto (procedentes de semilla).
- Las masas deben ser coetáneas (al menos el 90 % de los pies tienen la misma edad individual) o regulares (al menos el 90 % de los pies pertenecen a la misma clase artificial de edad).
- El porcentaje de ocupación de *Pinus radiata* debe superar el 80 %.
- Las masas deben tener una distribución espacial uniforme, es decir, que el estrato arbóreo presente continuidad en el espacio.

2.2.5 Obtención de la BT.

A partir de los datos de cada parcela tomados por el IFN4 se calculó para cada una las parcelas la biomasa total aérea (BT) (tn/ha).

La biomasa total aérea se calculó mediante la ecuación alométrica de Montero *et al.* (2005), que relaciona la biomasa seca total del árbol con su diámetro normal. Para cada pie de la parcela se calcula su biomasa en kilogramos (Ecuación 1) y multiplica por el factor de expansión que le corresponda a ese pie. La suma de la biomasa de cada pie ponderado por su factor de expansión es la biomasa total aérea (BT) en kilogramos por hectárea (kg/ha). Estos valores se han convertido a toneladas por hectárea (Tn/ha).

$$BT(kg) = CF * e^a * Dn^b \quad \text{Ecuación 1}$$

Dónde:

CF: Factor de corrección para la eliminación del sesgo fruto de la transformación logarítmica.

$$CF = e^{\frac{SEE^2}{2}}$$

SEE: Error estándar de la estimación, depende de la especie y fracción de biomasa a estimar.

a: parámetro de la función para la especie y fracción de biomasa (Tabla 3)

b: parámetro de la función para la especie y fracción de biomasa (Tabla 3)

Dn: diámetro normal del árbol (cm)

Tabla 3: Parámetros de la función y SEE para el cálculo de la biomasa total aérea de *Pinus radiata* según Montero *et al.* (2005)

Especie	Fracción de biomasa	Parámetros de la función		SEE
		a	b	
<i>Pinus radiata</i> D.Don	BT	-2,61	2,49	0,19

2.3 Datos LiDAR

2.3.1 Introducción a la tecnología LiDAR

La tecnología LiDAR es un sistema de teledetección activa que opera emitiendo un pulso láser (un haz de luz polarizada entre el rojo y el infrarrojo cercano) y estimando el tiempo que tarda en retornar al sensor una vez ha rebotado contra una superficie. De esta manera se mide la distancia entre el punto de rebote y el sensor. Para conocer la tripleta de coordenadas de cada punto que permita obtener una nube de puntos en 3D, el sensor se acompaña de un sistema inercial de navegación (INS) y de un GPS diferencial que informan de la posición, altura y parámetros de vuelo de cada momento en el que se emite un pulso láser, así como de una red de estaciones GPS en tierra (Vosselman y Maas, 2010) (Figura 12).

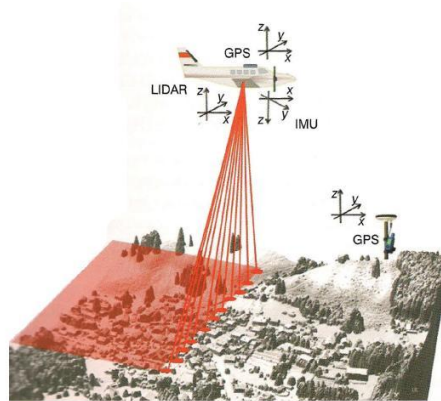


Figura 12: Sistemas de posicionamiento de un ALS. Fuente: Vosselman y Maas (2010).

La plataforma sobre la que se monta el sensor láser escáner puede ser terrestre, aerotransportada o satelital. En el presente estudio se han utilizado datos procedentes de un sistema láser escáner aerotransportado (ALS en sus siglas en inglés). A continuación se resumen brevemente los componentes principales de un ALS (Vosselman y Maas, 2010):

- Sistema láser escáner: envía continuamente pulsos láser que rebotan en las distintas superficies del terreno. Las densidades de pulso obtenidas dependen de la velocidad y altura de vuelo. Actualmente se pueden obtener densidades de entre 0,2 y 50 puntos/m².

Las dos características principales que distinguen los tipos de sensores ALS existentes son su capacidad de registro de los retornos y su tamaño de huella (Bortolot y Wynne, 2005). Las características del sensor determinan además el coste de adquisición de la información.

En cuanto a la capacidad de registro, el láser escáner puede ser de pulsos discretos o de onda continua. En los sistemas de pulsos discretos, se emiten pulsos a intervalos regulares de tiempo y pueden registrar múltiples retornos parciales si la superficie sobre la que impacta es permeable, como por ejemplo la vegetación (Figura 13). No obstante, hay que tener en cuenta que se detectan como distintos objetos si la distancia entre ellos es más larga que la anchura del pulso. Los sistemas de onda continua son más complejos y la potencia de emisión se expresa con una senoide, aportando información de la forma del eco.

Atendiendo al tamaño de huella, los sensores pueden ser de huella pequeña o huella grande. Los sensores de huella pequeña tienen una menor superficie iluminada por el rayo que los de huella grande, de manera que aportan información más detallada.

Los inventarios ALS forestales se han centrado principalmente en el uso de escáneres de pulsos discretos y huella pequeña (González *et al.*, 2012), pero los sensores de huella grande y onda continua también tienen un gran potencial. El uso mayoritario de los sistemas de pulsos discretos se debe a la capacidad de registro de múltiples retornos. Sin embargo, hay ciertos factores que limitan la utilidad de los sensores de huella pequeña a la hora de obtener

mediciones forestales: 1) No se tiene la certeza de que el pulso impacta sobre el ápice de los árboles; 2) el pulso puede penetrar en las copas antes de ser reflejado; 3) no se conoce claramente cuando el pulso ha impactado contra el suelo; y 4) son necesarios vuelos extensos para obtener datos adecuados. A pesar de estas limitaciones, los estudios con sensores de huella pequeña han dado buenos resultados a la hora de estimar la biomasa (Bortolot y Wynne, 2005).

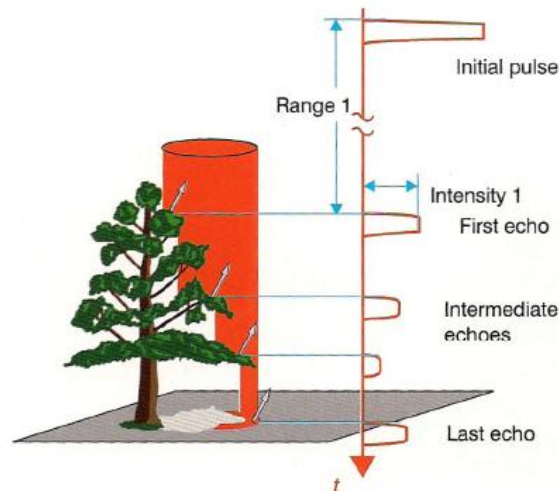


Figura 13: Retornos de un mismo pulso LiDAR en la vegetación registrados por un sistema de pulsos discretos. Fuente: Vosselman y Maas (2010).

- Unidad de medida inercial (IMU): recoge la información de los parámetros de vuelo como el alabeo, el cabeceo y el giro de la plataforma. Estos datos, combinados con los datos GPS, son necesarios para conocer y determinar la orientación y posición de la plataforma. La IMU se enmarca dentro del sistema inercial de navegación (INS).
- Antena receptora de sistema de posicionamiento GNSS diferencial: recoge los datos de una constelación de satélites GNSS que se complementa con una red de estaciones GNSS en tierra. La información de las estaciones en tierra es necesaria para compensar las perturbaciones en la precisión de la posición debidas a los efectos atmosféricos. Mediante estas correcciones se obtienen nubes de puntos de alta precisión (Figura 12).

2.3.2 Características del vuelo y de los datos

Para el presente trabajo se ha hecho uso de los datos del vuelo LiDAR del País Vasco, realizado entre las fechas 12/07/2012 y 28/08/2012 por el Gobierno Vasco, con una densidad de 0,5 puntos/m².

Los datos han sido creados y distribuidos por Eusko Jaurlaritza-Gobierno Vasco en ficheros .las y por hojas de 2 x 2 km, en sistema geodésico de referencia ETRS89, proyección UTM Huso 30 y con cotas ortométricas en base al nuevo modelo del geoide EGM08_RED NAP. Estos ficheros se encuentran disponibles en la Infraestructura de Datos Espaciales de Euskadi (IDE Euskadi: www.geo.euskadi.eus) y están clasificados de forma automática en puntos de suelo, vegetación baja, media, alta, construcciones, puntos fugados, de solape y sin clasificar.

Las especificaciones del sensor y equipos auxiliares del vuelo LiDAR 2012 son las siguientes (Lizarraga, 2013):

- Sensor LiDAR: LMS-Q680
 - Campo de visión transversal: 60°
 - Frecuencia de escaneado: 70.000 Hz
 - Frecuencia de pulso: 100.000 Hz

- Densidad promedio: 0.7 puntos/m²
- Número máximo de retornos por pulso: 4
- Mecanismo de compensación de Roll: Automático, ampliando 10° el ángulo de escaneo
- Sistema de navegación: IGI LM6800i
- Equipo GNSS a bordo del avión: NovAtel OEM4 L12LV 2Hz
- Sistema inercial (IMU/INS): AEROCONTROL lld. Frecuencia de registro 256 Hz
- Planificación de vuelo: TopoFlight v7; MDE=IGN; paso de malla= 25 m
- Velocidad del avión: 130 Km/h
- Altura media de vuelo: 1100 m
- Distancia máxima del avión a la estación de referencia: 40 Km
- Estaciones de referencia: GNSS Gobierno Vasco.
- Software utilizado en procesado: GraNav v8.1

Para el presente trabajo, se han utilizado la totalidad de 142 hojas .las 2 x 2 km que cubren las masas de *Pinus radiata* en la comarca área de estudio (Figura 14).

2.3.3 Pretratamiento de los datos LiDAR

- Extracción de los retornos clasificados como ruido.

Los ficheros .las disponibles en la IDE de Euskadi se encuentran ya clasificados de forma automática y con cotas ortométricas, por lo que se realizó una extracción de los retornos relativos al ruido, etiquetados como clase 7 según el formato LAS. Para extraer estos puntos de ruido se utilizó la herramienta Las2Las (filter) del software ArcGIS.

- Creación de un modelo digital de elevaciones.

Una vez eliminados los puntos de ruido de la nube, se generó, con los puntos clasificados como suelo (categoría 2), el MDE. Para ello se hizo uso del comando “Grid Surface Create” del software FUSION, en el que se estableció un tamaño de celda de 1 m. Como resultado de este proceso se obtuvo un MDE en formato .dtm, en el que cada celda toma como valor de elevación el promedio de la altura de los puntos clasificados como suelo en esa celda. Cabe señalar que FUSION es un software libre de visualización y análisis de datos LiDAR del Servicio Forestal del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA).

- Recorte de las hojas .las con los polígonos de las parcelas seleccionadas.

Posteriormente, las hojas .las filtradas se recortaron mediante el comando “Clip Data” del software FUSION. Para todas las parcelas se realizaron dos recortes, uno con circunferencias de 25 m de radio, y otro con circunferencias de 15 m de radio, a partir de las coordenadas de centro de parcela que indica el IFN4 (Figura 15). Este comando también normaliza la nube de puntos con los MDE creados en el paso anterior, de manera que las alturas de los puntos están referenciadas sobre el nivel del suelo (Figura 16).

El objetivo de recortar la nube de puntos LiDAR con dos tamaños de parcela es analizar cuál es el óptimo para estimar la BT. Con las mediciones del IFN4, aunque las parcelas hayan sido medidas con distintos radios (debido a la metodología de radio variable), al ponderar las medidas con los factores de expansión, se obtienen valores referidos a la hectárea, independientemente del tamaño de la parcela. Sin embargo, los estadísticos de la nube de puntos LiDAR sí que varían en función del radio seleccionado (Figura 17), por lo que se pretende analizar con qué radio los estadísticos de la nube de puntos LiDAR se ajustan mejor a los datos de BT obtenidos en las parcelas del IFN4 (ver apartados siguientes).

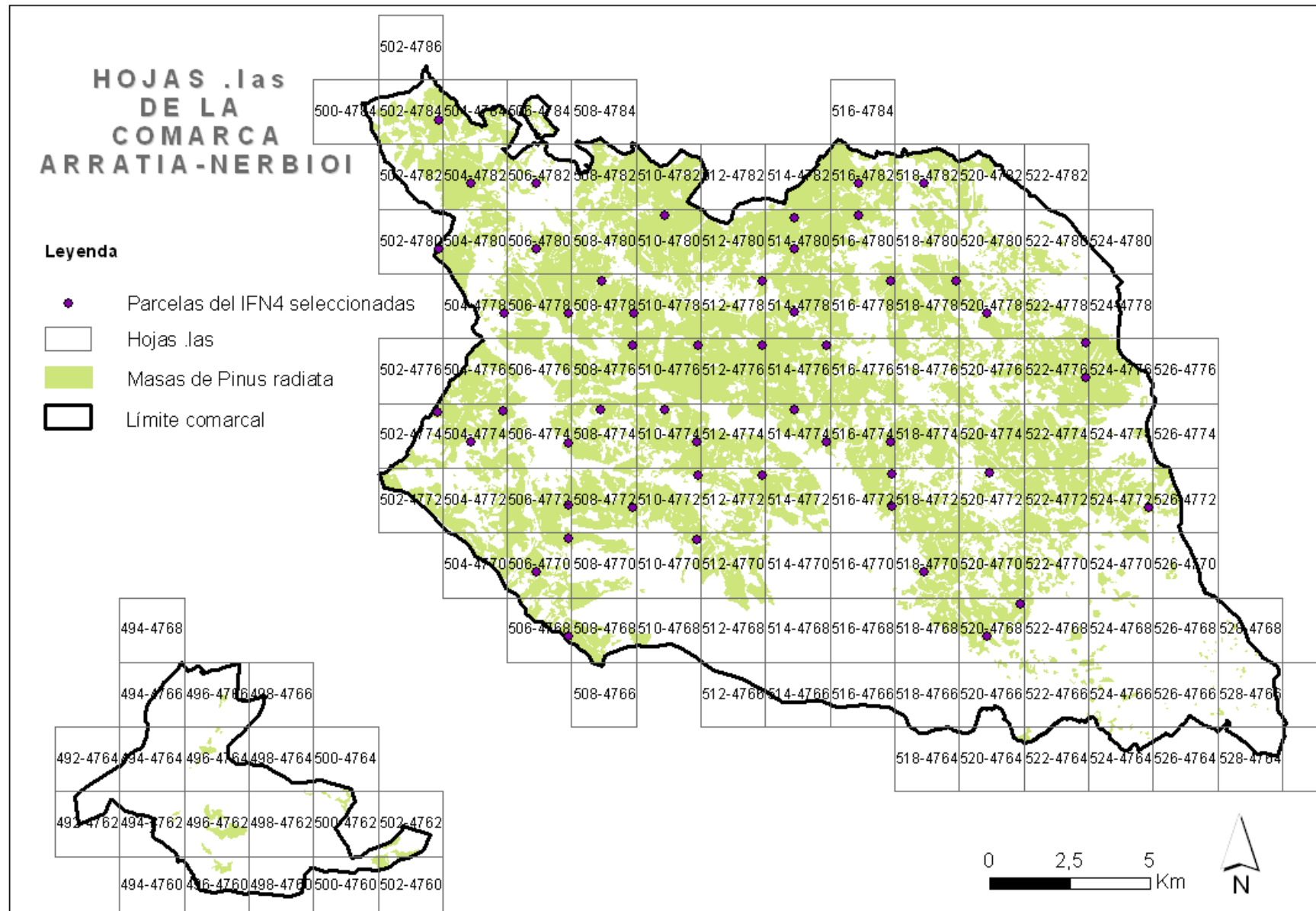


Figura 14: Hojas .las de 2 x 2 km que cubren el territorio del área de estudio.

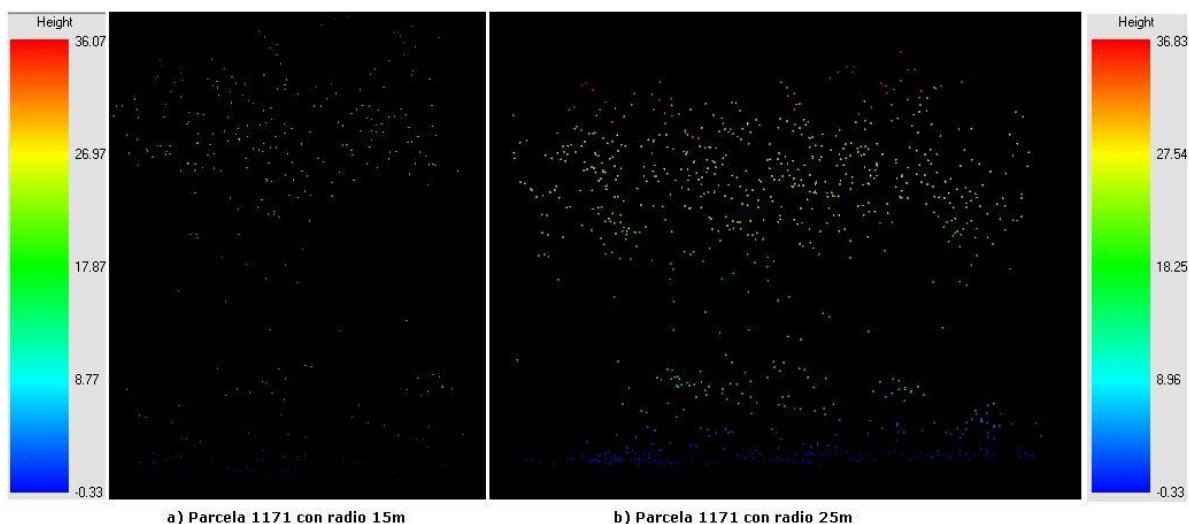


Figura 15: Normalización de la nube de puntos en la parcela 1171 con radio de 15m y 25m.

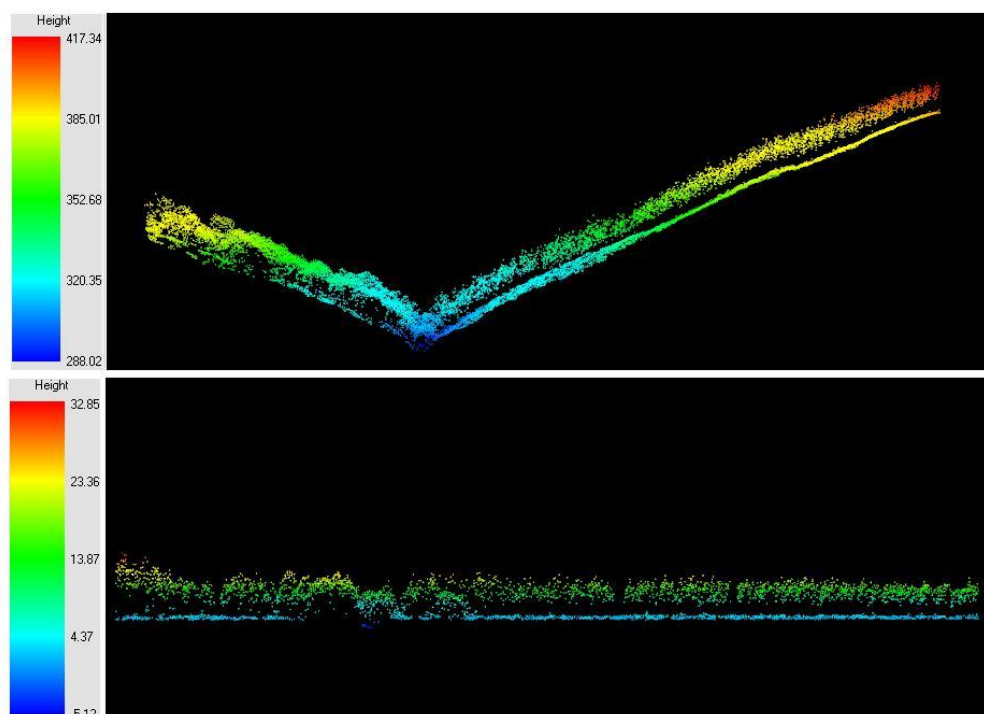


Figura 16: Normalización de la nube de puntos. En la primera imagen las alturas de los puntos son altas sobre el nivel del mar, mientras que en la segunda, la altura de los puntos es sobre el nivel del suelo. Se trata de la nube de puntos de una de las plantaciones del valle de Larragoiti (Zeberio).

- Extracción de los estadísticos de la nube de puntos.

A partir de la nube de puntos normalizada de cada parcela, se extrajeron los estadísticos de cada una. Para ello se utilizó el comando “Cloud Metrics” del software FUSION. Se estableció una altura mínima de 3 m y una altura máxima de 40 m a la hora de extraer los estadísticos. Con esta medida, se asegura que los puntos que rebotan en el matorral no se computan en las estadísticas, ni tampoco puntos superiores a 40 m (altura máxima del dosel arbóreo) que pudieran ser puntos fugados que no hubiesen sido filtrados correctamente. La salida de este comando es un archivo .csv con todos los estadísticos de la nube de puntos para cada parcela. Se obtuvieron los estadísticos para las parcelas con radios de 25 y 15 m.

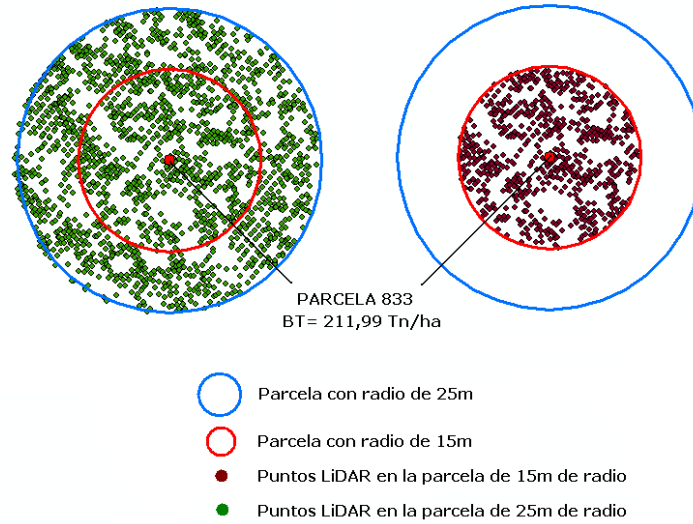


Figura 17: Recorte de la nube de puntos LiDAR para distintos radios (15 y 25m). El valor de la BT es el mismo en los dos casos, pero las estadísticas LiDAR variarán, ya que el número de puntos es diferente en función del tamaño de la parcela.

En la Figura 18 se recoge a modo esquemático el diagrama de trabajo que se siguió en el pretratamiento de los datos LiDAR.

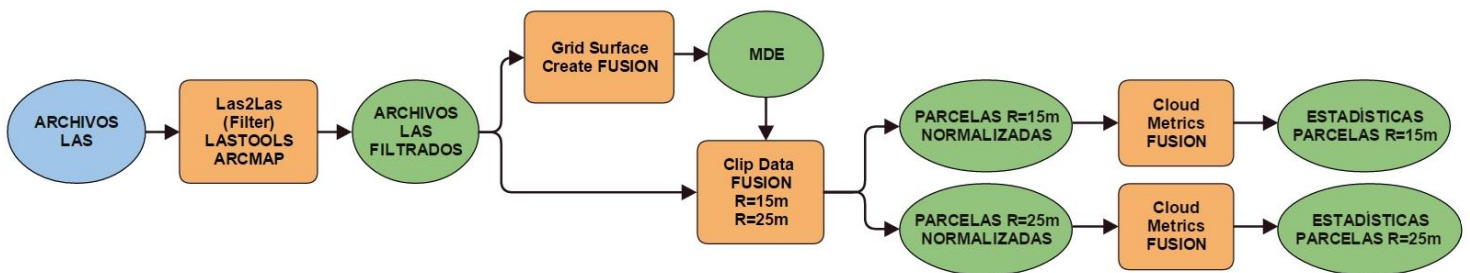


Figura 18: Diagrama de flujo del pretratamiento de los datos LiDAR.

2.4 Construcción de un modelo de estimación de la BT

Primeramente se realizó un análisis de correlación entre los valores de biomasa calculados para cada parcela y los estadísticos LiDAR obtenidos con las parcelas recortadas con 15 y 25 m de radio. Para ello se calcularon los coeficientes de correlación de Spearman (Rho), haciendo uso del software estadístico SPSS. El objetivo de este proceso fue determinar qué radio era el mejor para obtener el modelo y qué estadísticos se encontraban más relacionados con la BT.

Tras seleccionar el radio óptimo, se construyó un modelo mediante un análisis multivariante de regresión lineal con el software R, que permite relacionar la variable dependiente BT calculada para cada parcela con las variables independientes. Las variables también se transformaron logarítmicamente en los casos en los que no se cumplían algunos de los supuestos estadísticos que debe cumplir un modelo de regresión lineal.

Para seleccionar el modelo más adecuado, se tomó en consideración el coeficiente de determinación ajustado (R^2 corregido) y la comprobación del cumplimiento de los supuestos básicos propios de los modelos de regresión lineal (García, 1992):

- La varianza de los residuos debe ser constante (homocedasticidad): para analizar el cumplimiento de este supuesto se realizó el test de “Breusch-Pagan”. La hipótesis nula (el modelo es heterocedástico) se rechaza cuando el p-valor es superior a 0,05.
- Los residuos deben tener una distribución normal: para comprobar el cumplimiento de este supuesto se realizó el test de normalidad “Shapiro-Wilk”. En este test, la hipótesis nula (la normalidad de los residuos) se acepta cuando el p-valor es superior a 0,05.
- Las variables del modelo deben ser independientes (o debe haber colinealidad): el modelo no es correcto cuando las variables regresoras dependen unas de otras. Para evaluar el cumplimiento de este supuesto se aplicó el “factor de inflación de varianza”, en el que la hipótesis de ausencia de colinealidad se rechaza cuando se supera el valor de 4.
- Independencia de los errores: los errores en la medición de las variables explicativas deben ser independientes entre sí. El cumplimiento de esta hipótesis se evaluó mediante el test de “Durbin-Watson”, en el que la hipótesis se cumple cuando los valores se encuentran entre 1 y 3, siendo 2 el más óptimo.
- Ausencia de errores de especificación: los modelos incorrectos conllevan errores en las estimaciones que por medio de ellos se hacen. Los errores pueden deberse a la falta de linealidad o a que no se hayan incluido variables explicativas en el mismo. Para diagnosticar si este supuesto se cumple, se realizó el test “Reset de no linealidad”, en el que la hipótesis nula (linealidad) se rechaza cuando el p-valor del mismo está por debajo de 0,05.
- Ausencia de valores atípicos: los datos atípicos que no se ajustan al modelo pueden influir en la estimación del mismo. Para analizar el cumplimiento de este supuesto se realizó el test de “valores atípicos de Bonferroni”. La hipótesis nula (no existen datos atípicos) se cumple cuando el p-valor es superior a 0,05. Cuando existe algún dato atípico, el test indica el número de observación. Para evaluar si esta observación es influyente, se debe analizar el estadístico de la distancia de “Cook”. Su valor debe ser inferior a 1 para considerarse no influyente.

Todos los test de diagnóstico del cumplimiento de los supuestos de los modelos de regresión lineal se realizaron en el software R.

Finalmente, al modelo se le aplicó una validación cruzada, puesto que la escasez de parcelas obligó a utilizar todas las observaciones, sin poder dividir la muestra en dos subconjuntos “training” y “test”.

La validación cruzada consiste en estimar el valor de la variable dependiente en cada parcela con el modelo que quiere validarse, pero que no incluye esa parcela. De esta forma, se conocen el valor estimado y el valor real para cada parcela, y pueden analizarse así los errores, corrigiendo los coeficientes del modelo original. Para llevarla a cabo, se realizan tantas iteraciones como parcelas se tienen. En cada una de las iteraciones se elimina una parcela del conjunto de la muestra y se calculan los coeficientes del modelo de regresión para la estimación de la variable dependiente en la parcela eliminada. Se obtiene así un modelo predictor para cada parcela, cada uno con coeficientes diferentes. La media de los coeficientes de todos los modelos generados serán los coeficientes del modelo final.

Posteriormente, con ese modelo generado para cada una de las parcelas, se calcula el valor estimado en cada una de ellas. Se obtienen así los residuos, y su análisis permite corregir los estadísticos de error del modelo original.

Al modelo final, con los coeficientes y estadísticos de error corregidos tras la validación cruzada, se le aplicó una transformación logarítmica inversa, ya que había sido construido con la variable dependiente transformada logarítmicamente.

2.5 Representación cartográfica de BT

Una vez obtenido el modelo final para la estimación de la BT, se generó la cartografía para las masas de *Pinus radiata* de la comarca Arratia-Nerbioi (Bizkaia).

Se aplicaron los pretratamientos comentados con anterioridad (extracción de ruido y creación de MDE) a todos los archivos .las. (Figura 14). Posteriormente, utilizando el comando “Grid Metrics” de FUSION se extrajeron para dos tamaños de celda diferentes, los estadísticos de las nubes de puntos normalizadas, con altura mínima computable de 3 m y máxima de 40 m. Como resultado de este comando se obtiene un archivo .csv, con los estadísticos para cada celda. Cada fila corresponde a una celda y en las columnas se recogen los distintos estadísticos.

Puesto que el modelo había sido construido a partir de las métricas de parcelas de 25 m de radio, y el tamaño de celda (y resolución final de la cartografía) del que se deben obtener los estadísticos para generar la cartografía final debe ser similar a la superficie que cubren las parcelas circulares de 25 m de radio (1.963,5 m²), se probaron dos tamaños de celda: 45 m de lado (2.025 m²) y 50 m de lado (2.500 m²). Esto se hizo siguiendo el método basado en áreas (ABA en inglés) (Gutiérrez *et al.*, 2013). A priori, el tamaño de píxel de 45 m se aproxima más a la superficie de la parcela de 25 m, pero debido a la utilidad del resultado cartográfico para la gestión, la resolución espacial de 50 m haría más sencilla su combinación con otras fuentes de información. Por ese motivo se consideró interesante comparar los resultados de ambos productos, para analizar la existencia o no de pérdida de precisión al incrementar el tamaño del píxel en el resultado final.

Mediante el comando “Csv2Grid” de FUSION se convirtieron a formato .asc cada una de las columnas del archivo .csv que contenían las variables independientes que participan en el modelo de regresión.

Los ráster en formato .asc se introdujeron en el software ArcMap y mediante la herramienta “Raster Calculator” se aplicó el modelo de estimación de la BT, generándose un nuevo ráster que muestra la BT estimada para el área de estudio. Este proceso se realizó para los dos tamaños de píxel diferentes (Figura 19).

Por último, mediante la herramienta “Extract Multivalues To Points” de ArcGIS se extrajo, para cada parcela de IFN4, el valor que el modelo había predicho en el píxel en el que se encontraba. Así se comprobaron las diferencias entre las BT predichas para cada píxel en función de su tamaño. Finalmente, se analizó en SPSS la correlación entre la biomasa calculada para cada parcela y la predicha según la distinta resolución espacial utilizada, con el objetivo de determinar cuál es la resolución más apropiada para presentar la cartografía final.

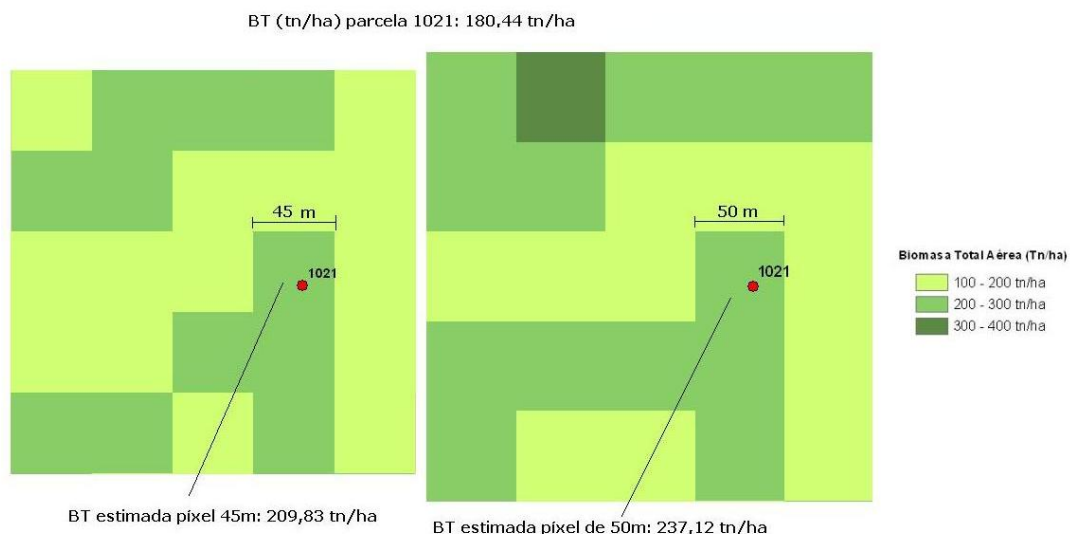


Figura 19: Diferencias en el valor de BT estimado para cada resolución. El valor de BT de la parcela de IFN4 será el mismo, pero el píxel sobre el que se sitúa adquirirá valores diferentes dependiendo del tamaño de píxel.

En la figura se observa el cambio de valor entre los píxeles en el que se sitúa la parcela y otros cercanos.

3. RESULTADOS

3.1 Datos de campo

3.1.1 Estimación del error en las coordenadas del centro de parcela

Tras localizar en 10 parcelas del IFN4 el rejón metálico que indica el centro de la misma, se tomaron las coordenadas del punto con GPS diferencial.

Tras reproyectar las coordenadas que indica el IFN4 como centro de parcela a sistema de referencia ETRS89 (ya que en los datos disponibles del IFN4 se encuentran en sistema ED50), se comprobó que entre las coordenadas reales de los centros de la parcela y las coordenadas que indica el IFN4, hay casos en los que existe un error de hasta 9 m, aunque la diferencia media sea de aproximadamente 5 m (Tablas 4 y 5).

Tabla 4: Coordenadas tomadas con GPS diferencial y coordenadas dadas por el IFN4 en las parcelas en las que se encontró el rejón. En ambos casos las coordenadas están dadas en el sistema de referencia ETRS89 para el huso 30. El error medio es de 4,97 m. La letra A o B hace referencia a la inicial de la provincia en la que se sitúa cada parcela (Álava o Bizkaia).

PARCELA	X_GPS	Y_GPS	X_IFN	Y_IFN	Error en X	Error en Y	ERROR
175-A	505925,40	4763794,75	505920,99	4763799,23	-4,39	4,48	6,28
159-A	506924,90	4765774,30	506926,03	4765775,20	1,13	0,90	1,45
187-A	507898,53	4762790,28	507899,97	4762781,21	1,45	-9,06	9,18
2131-B	504904,37	4778818,35	504902,57	4778820,25	-1,80	1,90	2,62
255-A	531894,22	4763797,90	531888,03	4763803,81	-6,19	5,91	8,56
257-A	533903,35	4763779,05	533902,04	4763776,77	-1,31	-2,29	2,64
259-A	535878,87	4763774,66	535882,04	4763773,72	3,16	-0,94	3,30
1.163-B	511904,53	4771779,06	511902,50	4771776,32	-2,03	-2,74	3,41
1.123-B	514894,33	4773776,41	514894,47	4773782,30	0,14	5,89	5,89
1.103-B	515868,33	4774775,16	515874,46	4774773,29	6,13	-1,87	6,41

Tabla 5: Resumen del error en el posicionamiento de las parcelas encontradas (distancia entre las coordenadas indicadas por el IFN4 y las tomadas con GPS centimétrico sobre el rejón del centro de la parcela).

Error medio (m)	Error máximo (m)	Error mínimo (m)	Desviación típica (m)
4,97	9,18	1,45	2,66

3.1.2 Selección de parcelas del IFN4 en la comarca de Arratia-Nerbioi

Puesto que el error entre las coordenadas del IFN4 y las coordenadas precisas de los centros de parcela puede ser de hasta 9 m, se estableció un margen de error de 10 m. Se seleccionaron 51 parcelas del IFN4 que teniendo en cuenta 35 m de radio (25 m de radio de parcela + 10 m de error) siguieran estando dentro de la misma masa de *Pinus radiata*. Fueron descartadas las parcelas que en 35 m alrededor del centro presentaban cambios en la cubierta (Figura 20).

A partir de los datos del IFN4 se elaboró una tabla con información genérica sobre el estado de cada parcela (Tabla 1 del Anexo 1) y varias tablas, una por parcela, con las medidas de campo de cada una de ellas, sobre la que se ha calculado la BT. En la Tabla 2 del Anexo 1 se recoge un ejemplo de la tabla elaborada para una de las parcelas).

De las 51 parcelas seleccionadas (Figura 22), 2 se encontraban en estado de monte bravo (existe tangencia de copas pero aún no se da la poda natural), 13 en estado de latizal (desde que comienza la

poda natural hasta que el Dn alcanza los 20 cm), y 36 en estado de fustal (Dn>20cm). En 18 de las 51 parcelas se habían realizado entresacas y en otras 14 podas.



Figura 20: Ejemplo de parcelas descartadas y seleccionadas teniendo en cuenta un margen de error de 10 m en el posicionamiento real del centro. La parcela de la izquierda no se seleccionó por presentar un cambio brusco de la cubierta dentro de los 35 m, mientras que la de la derecha fue seleccionada por localizarse indudablemente dentro de la misma masa a pesar del posible error. Fuente: elaboración propia.

Se seleccionaron parcelas con matorral y sin él. En 42 parcelas, el matorral era disperso y de menos de 1 m de altura, en 6 parcelas el matorral superaba los 2 m de altura y tanto el matorral como la plantación eran muy densos, y en otras 3 parcelas apenas había matorral (Figura 21).

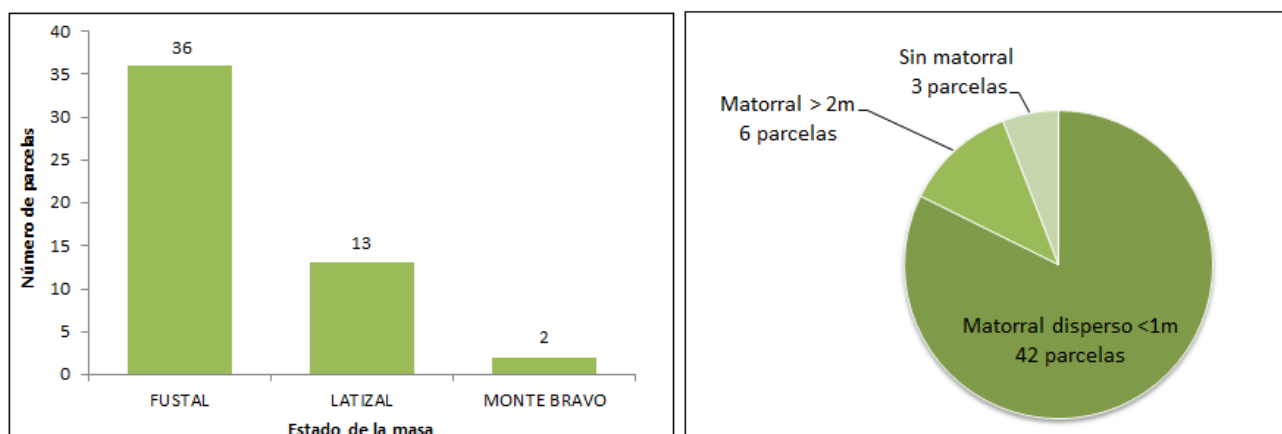


Figura 21: Características de las parcelas seleccionadas. Fuente: elaboración propia.

3.1.3 Obtención de BT

Siguiendo la metodología descrita en el apartado 2.2.5, se ha calculado la BT para cada parcela de IFN4. En la Tabla 6 se incluye un resumen de los valores de BT obtenidos. En la Tabla 2 del Anexo 1 se incluye un ejemplo del cálculo para una de las parcelas. Los resultados de BT de cada parcela se recogen en la Tabla 3 del Anexo 1.

Tabla 6: Valores de BT obtenidos.

	BT (Tn/ha)
Mínimo	6,50
Máximo	360,55
Media	158,08
Desv. Típica	86,50

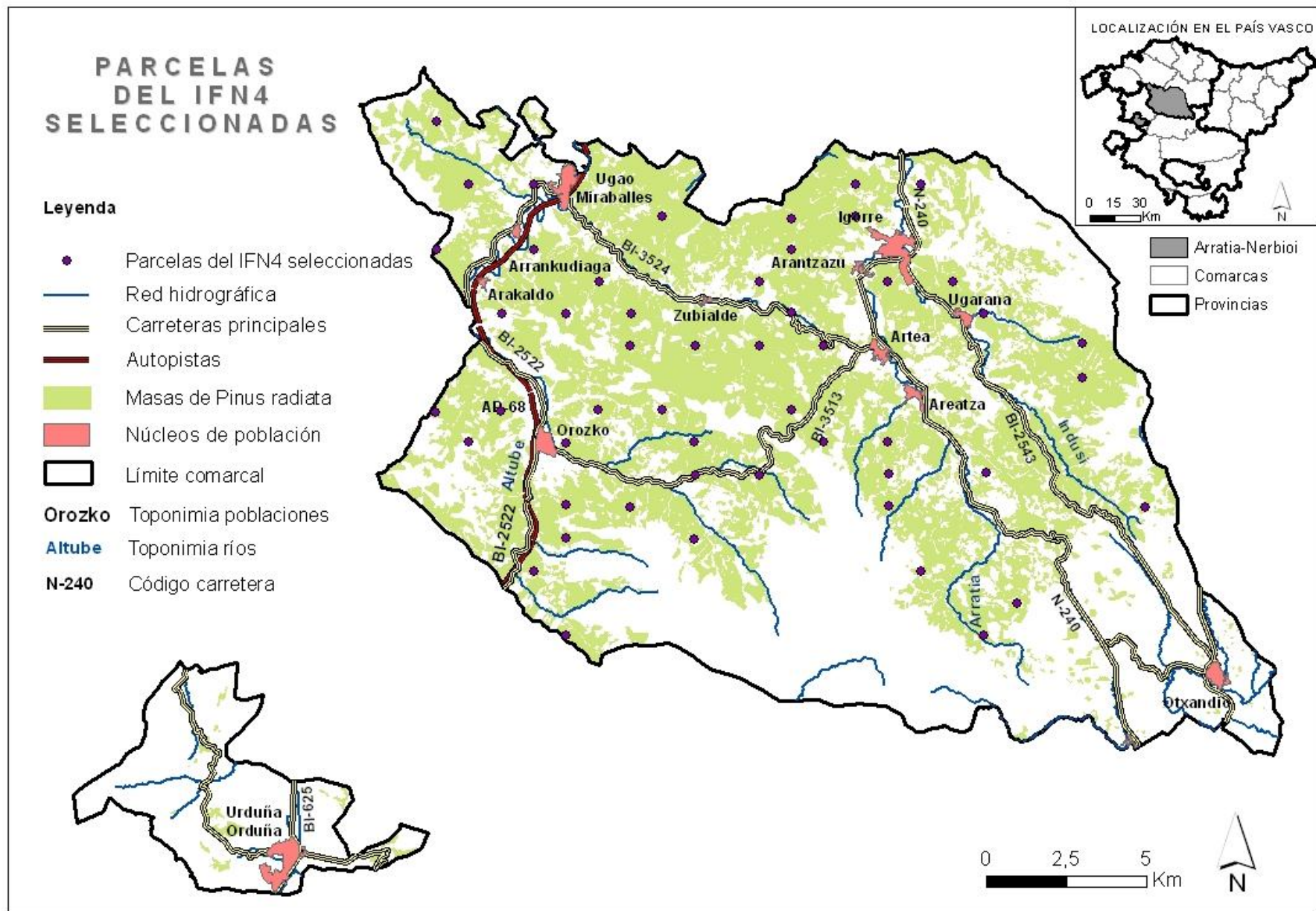


Figura 22: Localización de las parcelas del IFN4 seleccionadas en las masas de *Pinus radiata* del área de estudio

3.2 Datos LiDAR

3.2.1 Extracción de estadísticos de las nubes de puntos LiDAR

Una vez recortadas y normalizadas todas las parcelas para radios de 15 y 25 m, se extrajeron los estadísticos de las nubes de puntos para cada una. A continuación, en la Tabla 7, se resumen los estadísticos que tras el análisis de correlación se han utilizado para la construcción del modelo predictivo de la biomasa (apartados 3.2.3 y 3.3.3). En la Tabla 4 del Anexo 1 se recogen los resúmenes de todos los estadísticos obtenidos para los dos tamaños de parcela.

Tabla 7: Resumen de algunos de los estadísticos LiDAR con mayor correlación (Rho de Spearman > 0,5) (apartado 3.2.2) utilizados en la búsqueda el modelo predictivo de la biomasa.

	Resumen estadísticos LiDAR Parcelas con 15 m de radio				Resumen estadísticos LiDAR Parcelas con 25 m de radio			
	Media	Desv. típica	Máximo	Mínimo	Media	Desv. típica	Máximo	Mínimo
Elev maximum	25,40	7,44	39,58	8,49	26,70	7,24	39,58	9,70
Elev mean	15,54	5,29	29,55	4,49	15,52	5,08	28,84	4,58
Elev mode	15,23	7,20	31,17	3,28	15,49	6,70	30,40	3,57
Elev stddev	4,50	1,97	10,64	1,04	4,74	1,87	10,15	1,39
Elev variance	24,08	21,48	113,12	1,07	25,93	20,82	103,10	1,94
Elev skewness	-0,37	0,61	1,13	-2,28	-0,25	0,66	2,09	-1,16
Elev P20	11,86	4,91	26,26	3,59	11,55	4,59	25,82	3,43
Elev P25	12,75	5,11	26,78	3,78	12,60	4,91	26,35	3,63
Elev P30	13,63	5,29	27,15	3,90	13,36	5,12	27,02	3,79
Elev P40	15,04	5,58	28,88	4,03	14,87	5,39	28,22	4,00
Elev P50	16,09	5,80	29,80	4,37	15,99	5,64	29,31	4,25
Elev P60	17,10	6,05	30,65	4,51	17,07	5,84	30,34	4,55
Elev P70	18,11	6,23	31,99	4,84	18,18	6,04	31,26	4,90
Elev P75	18,61	6,33	32,61	5,04	18,76	6,13	31,74	5,12
Elev P80	19,23	6,44	33,11	5,26	19,46	6,23	32,41	5,33
Elev P90	20,73	6,71	34,32	5,95	21,15	6,51	33,66	6,21
Elev P95	21,91	6,82	35,93	6,44	22,57	6,61	34,93	7,28
Elev P99	23,80	7,20	38,42	7,54	24,82	6,93	37,94	9,47

3.2.2 Análisis de correlación entre los valores de biomasa y los estadísticos LiDAR

Con las métricas LiDAR para parcelas de 15 y 25 m de radio y los valores de biomasa obtenidos para cada parcela de IFN4, se analizaron las correlaciones de Spearman. En la Tabla 8 se recogen los valores de algunos de los estadísticos que mayor correlación presentan con la biomasa, tanto para parcelas de 15 m de radio como para parcelas de 25 m. En la Tabla 5 del Anexo 1 se incluye la tabla con las correlaciones entre la biomasa y todos los estadísticos LiDAR.

Las correlaciones entre la biomasa y los estadísticos LiDAR de los dos tamaños de parcela son muy similares. Si bien en parcelas con radio de 15 m las correlaciones son algo más altas en algunos de los estadísticos relacionados con la altura de la vegetación (Elev. maximum y Elev. mean), las correlaciones son ligeramente más bajas en los percentiles. En los dos tamaños de parcela, estos estadísticos relacionados con la altura de la vegetación tienen una correlación positiva. Por tanto, a mayores valores de estos, mayores valores de biomasa se alcanzan.

Respecto a las variables relacionadas con la variabilidad de la altura del dosel y la estructura forestal (Elev. Variance y Elev.Skewness), las correlaciones son más altas en parcelas de 25 m de

radio. La correlación con Elev.Skewness (asimetría) es negativa, lo que indica que a mayor valor de BT menor es la asimetría.

Destaca la baja correlación (positiva en todos los casos) entre la biomasa y los estadísticos relacionados con la densidad forestal (porcentaje de retornos).

Atendiendo a los coeficientes de correlación, teniendo en cuenta el funcionamiento del IFN4 y la limitación de tiempo impuesta por el tipo de trabajo se ha considerado oportuno buscar el modelo de estimación de la biomasa con los estadísticos de las parcelas de 25 m de radio, aunque no se descarta la posibilidad de comparar en el futuro los resultados obtenidos con el desarrollo de modelos a partir de distintos tamaños de parcela.

Tabla 8: Coeficientes de correlación de Spearman (Rho) entre la BT y los estadísticos LiDAR en parcelas de 15 y 25m de radio.

** : La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

VARIABLES LiDAR	Parcelas 15m	Parcelas 25m
Elev. maximum	0,82**	0,80**
Elev. Mean	0,80**	0,80**
Elev. Variance	0,70**	0,73**
Elev. Skewness	-0,62**	-0,71**
P40	0,80**	0,80**
P60	0,81**	0,82**
P75	0,83**	0,84**
Porcentaje primeros retornos sobre la media	0,47**	0,50**
Porcentaje todos los retornos sobre 3.00 m	0,36**	0,39**

3.3 Modelo de estimación de la BT

3.3.1 Obtención del modelo

En la búsqueda del modelo de estimación de la biomasa total aérea se combinaron inicialmente distintas variables que habían sido seleccionadas por presentar los coeficientes de correlación más altos. También se probó con otras variables que no teniendo unos coeficientes de correlación tan altos pudieran, al combinarse con otras, generar un modelo adecuado.

Las variables también fueron transformadas logarítmicamente en distintas pruebas, con el objetivo de observar si los modelos mejoraban. Se comprobaron distintos modelos con los siguientes casos:

- Modelos con transformación logarítmica únicamente de la variable dependiente y variables independientes sin transformar.
- Modelos con variable dependiente e independientes transformadas logarítmicamente.

Finalmente se seleccionó un modelo en el que se incluyen dos estadísticos LiDAR: la elevación máxima y la asimetría. De acuerdo con los coeficientes de correlación, la altura máxima de los puntos tiene una relación directa con la biomasa, que tomará valores más altos a medida que la altura máxima de la nube de puntos sea mayor. De hecho, los valores más altos de biomasa se dan en las masas en estado de fustal que se encuentran cercanas a la altura de coronación. La asimetría sin embargo tiene una relación inversa, de manera que los valores más altos de biomasa se alejan menos de los valores medios. El signo negativo de la correlación entre la biomasa y la asimetría también se mantiene en el

modelo. El mejor ajuste se consiguió con la variable dependiente transformada logarítmicamente, obteniéndose un R^2 de 0,67.

En la Tabla 9 se recogen las estadísticas del modelo seleccionado, en el que participan como variables regresoras la elevación máxima y la asimetría. El resto de modelos fueron descartados por presentar peor ajuste o no cumplir los supuestos básicos de los modelos de regresión lineal.

Tabla 9: Principales estadísticas del modelo de estimación de la biomasa total aérea (BT)

Coefficientes	Estimado	Error estándar	t valor	Pr (>t)	R² ajustado	Error residual estándar
Intercept	10,37	0,23	46,02	<2e-16	0,67	0,35
Elev.maximum	0,05	0,01	5,79	5,69E-07		
Elev. Skewness	-0,37	0,10	-3,76	0,00		

A continuación se recogen los resultados de los análisis que corroboran el cumplimiento de los supuestos básicos de los modelos de regresión lineal (Tabla 10). Los p-valores son superiores a 0,05 en los distintos test de diagnóstico, por lo que éstos se cumplen. En el caso del test de Durbin-Watson el valor del estadístico se encuentra 1 y 3, por lo que también se cumple. En el caso del test de factor de inflación de la varianza, el valor es menor que 4, lo que verifica que el test se cumple y no existe colinealidad entre variables.

Tabla 10: Diagnóstico del modelo de estimación de biomasa total aérea. Todas las hipótesis básicas que deben cumplir los modelos de regresión lineal se cumplen.

	Test Breusch-Pagan	Test de Shapiro-Wilk	Test Reset de no linealidad	Test Durbin-Watson	Factor de inflación de la varianza	Test valores atípicos Bonferoni
Estadístico	3,06	0,98	0,99	1,46	1,43	Parcela 18
p-valor	0,08	0,66	0,35			No influyente

El análisis del cumplimiento de las hipótesis básicas también se puede realizar de manera gráfica (Figura 23):

- El gráfico “Residuals vs Fitted” evalúa la independencia de los errores, debiendo presentar una línea horizontal.
- El gráfico “Normal Q-Q” evalúa la distribución normal de los residuos, que no deben desviarse de la recta diagonal. Como se puede observar, pese a que la observación 18, que se corresponde con la parcela 1081, sí que se aleja de esta diagonal, el p-valor superior a 0,05 del test “Shapiro-Wilk” corrobora el cumplimiento de esta hipótesis.
- El gráfico “Scale-Location” verifica el cumplimiento de la homocedasticidad cuando la línea representada es horizontal y los puntos se distribuyen de manera homogénea.
- El gráfico “Residuals vs Leverage” evalúa, mediante las distancias de “Cook” la presencia de observaciones atípicas influyentes. Las observaciones que superan el valor de 1 se consideran influyentes. En este caso, la observación 35 (parcela 969) se aleja bastante del resto, pero no se considera influyente por no superar una distancia de “Cook” de 1.

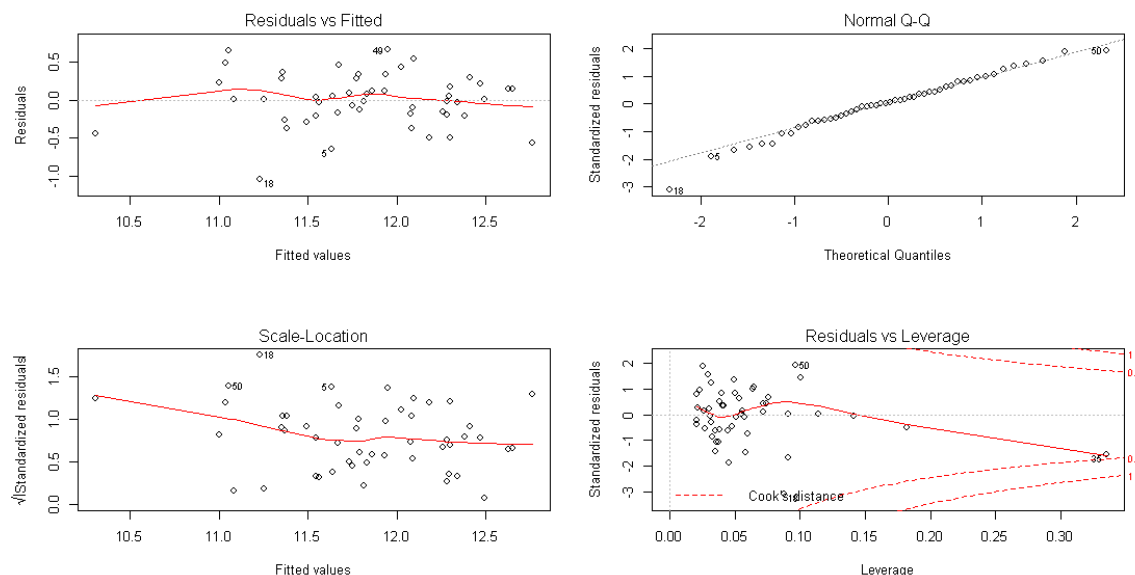


Figura 23: Gráficas básicas de diagnóstico del modelo de estimación de BT.

Cabe destacar que estos supuestos, con los resultados de los test que se recogen en la Tabla 13, se cumplieron después de eliminar la observación 30 (parcela 1045), por ser una observación atípica. En esta parcela se obtuvo un valor de biomasa de 6,5 tn/ha, muy por debajo del resto, y un valor de densidad (509 pies/ha) que no se corresponde con su estado de crecimiento. Según los datos del IFN4, solo 4 pies superaban los 7,5 cm de diámetro y pudieron ser medidos como pies mayores. Esto indica que es una plantación muy joven, en la que, por tanto, se debería obtener una densidad cercana a la densidad de plantación, de en torno a 1.500 pies/ha. Sin embargo, no se obtienen estos valores, debido a que, al haber sido medidos únicamente 4 pies, según la metodología del IFN4, sólo se les aplica el factor de expansión a éstos. Por tanto, los cálculos que se realicen no se corresponderán con la realidad. Lo mismo ocurre en el cálculo de la biomasa, ya que al realizar los cálculos teniendo en cuenta únicamente 4 pies (cuando realmente hay muchos más que no han sido medidos por no alcanzar el diámetro mínimo que establece el IFN4 para considerarlos pies mayores), los resultados no son correctos.

3.3.2 Validación del modelo

Una vez obtenido el modelo se validó su idoneidad mediante validación cruzada, siguiendo el método descrito en el apartado 2.4.

Los coeficientes del modelo final generados tras dicha validación se recogen en la Tabla 11.

Tabla 11: Coeficientes del modelo original y final (corregidos mediante la validación cruzada).

	Coeficientes del modelo original	Coeficientes de la validación cruzada
Intercept	10,37	10,37
Elev.maximum	0,05	0,05
Elev. Skewness	-0,37	-0,37

Mediante el análisis de los residuos obtenidos por validación cruzada, se corrigieron los estadísticos de error del modelo original. Los valores de los estadísticos de R^2 corregido, error cuadrático medio (RMSE) y sesgo del modelo final, una vez realizada la validación cruzada, se incluyen en la Tabla 12.

La similitud entre los estadísticos antes y después de la validación cruzada demuestra que el modelo es preciso y puede ser utilizado para estimar la BT en el área de estudio.

Tabla 12: Validación del modelo de estimación de la biomasa aérea total.

	Modelo original	Validación cruzada
R ² corregido	0,67	0,67
RMSE	0,34	0,34
Sesgo	0,00	0,08

3.3.3 Transformación logarítmica inversa y modelo final

Una vez obtenido el modelo final (Ecuación 2) con los coeficientes y los estadísticos corregidos con la validación cruzada, y puesto que la variable dependiente biomasa estaba transformada logarítmicamente, se realizó una transformación logarítmica inversa (Ecuación 3).

Como la transformación logarítmica inversa introduce un sesgo, se debe eliminar éste mediante un factor de corrección (CF), que se obtiene a partir de la Ecuación 4.

$$\ln BT = 10,373 + 0,050 * \text{Elev. maximum} - 0,370 * \text{Elev. skewness} \quad \text{Ecuación 2}$$

$$BT = CF * e^{10,373} * e^{0,050 * \text{Elev. maximum}} * e^{-0,370 * \text{Elev. skewness}} \quad \text{Ecuación 3}$$

$$CF = e^{\text{error estándar de la estimación}^2 / 2} \quad \text{Ecuación 4}$$

El modelo final es, por tanto, el que sigue (Ecuación 5):

$$BT = 1,063 * 31984,29 * e^{0,050 * \text{Elev. maximum}} * e^{-0,370 * \text{Elev. skewness}} \quad \text{Ecuación 5}$$

3.4 Representación cartográfica de la BT

Tras analizar la correlación entre la biomasa calculada para cada parcela y la predicha para ese pixel según la resolución (Tabla 13), se determinó que la resolución más adecuada para crear la cartografía final son píxeles de 45 m de lado. En la Tabla 6 del Anexo 1 se recoge la BT calculada para cada parcela y la BT estimada en el píxel en el que se encuentra en función de la resolución (45 y 50 m).

Tabla 13: Coeficientes de correlación de Spearman entre la biomasa calculada para cada parcela y la calculada para ese pixel.

	BT parcela IFN
BT pixel 45m	0,81**
BT pixel 50m	0,75**

** La correlación es significativa a nivel 0,01 (bilateral)

La cartografía final, realizada con una resolución de 45 m de pixel (Figura 24), mostró un valor máximo de BT de 656,82 tn/ha y una BT media de 134,04 tn/ha. En la Tabla 14 se presenta un resumen de los valores de BT obtenidos con la cartografía de 45 m de pixel.

Tabla 14: Resumen de los valores BT (tn/ha) obtenidos por el modelo predictivo en la cartografía final.

Media	Máximo	Mínimo	Desviación típica
134,04	656,82	3,20	74,14

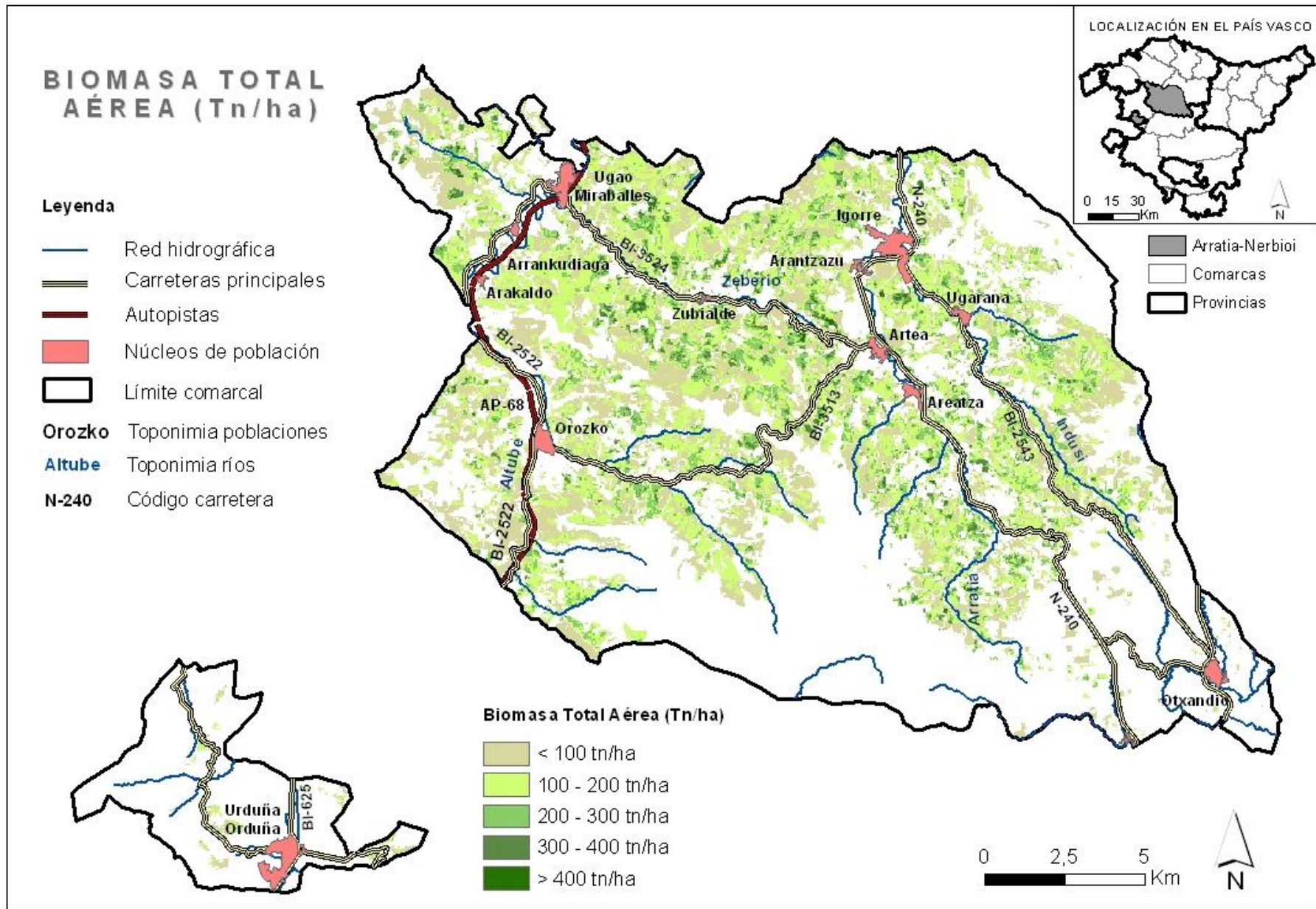


Figura 24: Distribución la biomasa total aérea en la comarca de Arratia-Nerbioi.

4. DISCUSIÓN

Una de las fases más importantes a la hora de la realización de inventarios forestales LiDAR es la localización precisa de las parcelas de campo en las que se miden las variables dasométricas con las que después se calculan otros parámetros forestales de masa, que son los que posteriormente se relacionan con las estadísticas de las nubes de puntos LiDAR para construir los modelos.

En este caso, la fase dedicada a la captura de datos de campo no se ha llevado a cabo como tal, sino que se ha partido de los datos de campo del IFN4 disponibles. Se ha considerado que, puesto que se disponen de esos datos de campo, que además son muy cercanos en el tiempo al vuelo LiDAR-PNOA, ambos tipos de informaciones pueden ser de gran utilidad para construir modelos predictores que permitan conocer la distribución espacial continua de las variables forestales en el territorio.

Sin embargo, los datos del IFN4 tienen la limitación de que las coordenadas del centro de las parcelas están tomadas con un GPS de mano, por lo que se debe considerar que pueden tener un error de varios metros.

Para conocer qué error puede existir entre las coordenadas indicadas por el IFN4 y las coordenadas reales de la parcela, se consideró necesaria la búsqueda del centro de algunas de las parcelas del IFN4, de las que se tomarían las coordenadas con GPS diferencial. Para el presente estudio, se aprovecharon los datos tomados durante el transcurso de otro trabajo en la primavera de 2014, en el que, ayudados por un detector de metales, se buscaron los rejonos metálicos enterrados en los centros de parcela. Esta tarea es especialmente costosa y requiere de mucha práctica para identificar, mediante fotografías y medidas de árboles tomadas 5 o 10 años antes (en el anterior inventario), los árboles que rodean el centro de cada parcela. Ese es el motivo por el que solo pudieron ser localizados los rejonos de 10 parcelas. Además, al ser datos procedentes de otro trabajo, estas parcelas localizadas con las que se ha estimado el error, no se encuentran en el área de estudio, aunque sí en comarcas limítrofes.

El bajo número de parcelas utilizadas (51 parcelas IFN en una superficie de 17.700 ha) para la construcción del modelo, se debe a que, además de restringirse a las parcelas del IFN4 localizadas en el área de estudio, se realizó una selección de las mismas para descartar aquellas que, teniendo en cuenta el margen de error de hasta 10 m en la localización del centroide, pudieran verse alteradas por otra vegetación o superficies.

El error en la localización de los centros de parcela del IFN4 en la comarca (coordenadas facilitadas por el IFN4) ha podido suponer que las nubes de puntos que se han recortado como parcela del IFN4 realmente no lo sean, o estén desplazadas, y por tanto, no se correspondan con los datos de campo. Esta podría ser una de las principales causas del bajo ajuste del modelo. La localización precisa de los centros de cada parcela podría ser una interesante mejora a incluir en los futuros IFN, y aumentaría su utilidad en el uso de los sus datos de campo como fuente para los inventarios forestales LiDAR.

Por otro lado, en el cálculo de las variables de masa, hay que tener en cuenta que los factores de expansión que establece la metodología del IFN para su conversión a valores por hectárea, se sobreestiman los pies con diámetros menores, que tienen mayor peso. Sin embargo, no se considera que esto pueda haber supuesto una alteración en los cálculos en este trabajo, ya que en plantaciones forestales homogéneas y regulares se espera que todos los pies tengan similar diámetro y, por tanto, factor de expansión. Los problemas pueden darse en plantaciones muy jóvenes en las que pocos pies alcancen todavía el diámetro mínimo por el que se consideran pies mayores, de manera que, si se miden esos pocos, la densidad obtenida al aplicar los factores de expansión no se corresponderá con la real.

El modelo para la estimación de la biomasa total aérea se ha obtenido mediante un análisis multivariante de regresión lineal y una validación cruzada. El ajuste del modelo, con un R^2 de 0,67 se ha considerado bueno, teniendo en cuenta que los datos de las 51 parcelas de campo del IFN4 que se sitúan en el área de estudio suponen una intensidad del muestreo de 0,05 % (1 parcela de 0,19 ha cada

347 ha). En la estimación de variables para *Pinus radiata* en plantaciones de Galicia, González *et al.* (2012) obtuvieron un R^2 de 0,68 para el modelo de estimación de la biomasa aérea, a partir de una fracción de muestreo de 33,75% (54 parcelas de 225 m² en un área de 3600ha). Por su parte, Gutierrez *et al.* (2013) proponen una fracción de muestreo del 10% para los inventarios LiDAR.

La relación inversa de la asimetría que se ha reflejado en el modelo obtenido se corresponde con el signo negativo que presenta la misma variable en el modelo obtenido por González *et al.* (2012) para las plantaciones de *Pinus radiata* en Galicia.

Quedan por explorar otras opciones a la hora de aplicar el modelo para la cartografía final, ya que, de aplicarse en zonas mayores, un tamaño de píxel que se ajuste al tamaño de la parcela de campo puede resultar demasiado pequeño.

Sería necesario, así mismo, aplicar un estudio similar para otras especies y lugares, y en ese sentido, la disponibilidad de los datos LiDAR e IFN a nivel nacional pueden ser una buena oportunidad.

5. CONCLUSIONES

Los resultados del trabajo demuestran la utilidad de los datos IFN4 del 2011 combinados con los datos LiDAR-PNOA de baja densidad (0,5 m²/ha) de 2012 para la construcción de un modelo de estimación de la BT. 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, una cartografía bastante precisa de la distribución de la BT en las plantaciones forestales de *Pinus radiata* de la comarca Arratia-Nerbioi.

Al igual que para la estimación de la biomasa, es bastante probable que pudieran obtenerse modelos para otras variables forestales de interés que permitirían realizar un inventario completo de las masas de *Pinus radiata* en la comarca.

Verificada además la utilidad conjunta de los datos IFN4 y LiDAR-PNOA, podría considerarse la localización con mayor precisión de los centros de más parcelas del IFN4 (de ésta y otras comarcas) para construir, a partir de sus datos de campo, un modelo con mejor ajuste que permita estimar la biomasa en un espacio a mayor escala, por ejemplo a nivel provincial. La utilización de los datos de campo del IFN4 ya disponibles, ahorraría, además, el coste económico y temporal que conlleva la toma de datos en campo necesaria para el inventario forestal LiDAR.

Dado que tanto el IFN como la cobertura LiDAR-PNOA son productos periódicos, sería deseable que se realizase una experiencia similar de utilización conjunta de los datos para los próximos vuelos e IFN. En esta línea, el año 2016 podría ser un año fructífero, ya que se prevé llevar a cabo un nuevo vuelo LiDAR en el País Vasco, al tiempo que se realizará el Quinto Inventario Forestal Nacional (IFN5), ahora que su periodicidad es de 5 años en las zonas productivas de la región atlántica.

La posibilidad de conocer “desde gabinete” la distribución de la biomasa u otros parámetros forestales en las masas forestales del territorio tiene un gran interés para su gestión, mayor aún, en estas plantaciones con vocación altamente productiva.

6. AGRADECIMIENTOS

La orientación, supervisión y apoyo que me han brindado la Dra. Teresa Lamelas y Antonio Luis Montealegre han sido determinantes y de gran ayuda para la realización de este trabajo.

Por su parte, Alejandro Cantero de Hazi Fundazioa, me facilitó durante la primavera de 2014 los materiales (vehículo todoterreno, GPS diferencial y detector de metales) necesarios para la búsqueda de los centros de algunas parcelas del IFN4, aprovechando un periodo de prácticas en la institución.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Ainz, M.J. (2008). El monocultivo de pino radiata en el País Vasco: origen y claves de permanencia de un sistema de explotación contrario al desarrollo sostenible. *Estudios Geográficos*, 256, págs.335-356.
- Albizu, P. (2013). Aprovechamiento de madera de coníferas a la industria de Euskadi. *Rev. Montes*, 113, págs. 25-27.
- Andreae MO, Merlet P. (2001). Emission of trace gases and aerosols from biomass burning. *Global Biogeochem Cycles* 15(4):955–966.
- Azpitarte, J. (2013). Evolución del macizo y del asociacionismo forestal vasco. *Rev. Montes*, 113, págs. 15-17.
- Bortolov, Z.J. & 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, págs: 342-360.
- Bravo, E. & Ortuzar, L. (2012). Mecanización forestal en Euskadi: tala y desembosque. *Foresta*, 55, págs.114-125.
- Cabrera, J., Lamelas, M.T., Moontealegre, A.L., de la Riva, J. (2014). *Estimación de variables dasométricas a partir de datos LiDAR PNOA en masas regulares de Pinus halepensis Mill.* XVI Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica. Alicante.
- Condes, S. & Riaño, D. (2005). *El uso del escáner láser aerotransportado para la estimación de la biomasa foliar del Pinus sylvestris L. en Canencia (Madrid)*. Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales, 19, págs: 63-70. Actas de la I Reunión de Inventario y Teledetección Forestal.
- Domingo, D. (2015). *Estimación de variables dasométricas en masas de Pinus halepensis Mill. mediante datos LiDAR y trabajo de campo. Trabajo fin de máster.* Universidad de Zaragoza.
- García, A. (1992). Estadística Aplicada: Conceptos Básicos. Madrid, Editorial UNED.
- 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) págs. 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.* 6º Congreso Forestal Español (6CFE01-482). Sociedad Española de Ciencias Forestales.
- Hazi Fundazioa. (2013). *Medir el bosque, comprender el paisaje.* Fundación Hazi Fundazioa.
- Junta de Castilla y León. (2014). *Metodología empleada para el estudio de los crecimientos de madera y biomasa en Castilla y León.* Consejería de Fomento y Medio Ambiente, Valladolid. 47 págs. V. 1.0
- Lizarraga, F. (2013). *Estimación de parámetros forestales mediante datos LiDAR. Trabajo Final de Grado.* Universidad Pública de Navarra.
- MAGRAMA, (2013). *Cuarto Inventario Forestal Nacional. Comunidad Autónoma del País Vasco/Euskadi.* Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Madrid.

- Mateos, E., Edeso, J.M., Bastarrika, A., Torre, L. (2012). Estimación de la biomasa residual procedente de la gestión forestal en Bizkaia. *Lurralde: Investigación y espacio*, 35, págs. 13-30.
- Michel, M. & Gil, L. (2013). *La transformación histórica del paisaje forestal en la Comunidad Autónoma de Euskadi*. Gobierno Vasco. Vitoria-Gasteiz.
- Michel, M. (2006). *El Pino Radiata en la historia forestal vasca: Análisis de un proceso de forestalismo intesivo*. Munibe, suplemento 23. Aranzadi Zientzi Elkartea.
- Ministerio de Medio Ambiente. (2014). *Instrucciones para el apeo de las parcelas de campo del IFN4*. Dirección General de Política Forestal. Servicio de Inventario Forestal.
- Montealegre, A.L., Lamelas, M.T., de la Riva, J., García-Martín, A., Escribano, F. (2015). *Estimación de variables dasométricas en masas de Pinus halepensis Mill. Mediante datos LiDAR-PNOA y trabajo de campo*. XVI Congreso de la Asociación Española de Teledetección.
- Montero, G., Ruiz-Peinado, R., Muñoz, M. (2005). *Producción de Biomasa y fijación de CO₂ por los bosques españoles*. Monografías INIA: Serie Forestal nº13. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. Ministerio de Educación y Ciencia. Madrid.
- 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, págs.129-133.
- Palacios-Orueta A, Parra A, Chuvieco E, Carmona-Moreno C (2004) *Remote sensing and geographic information systems methods for global spatio-temporal modelling of biomass burning emissions: assessment in the African continent*. J Geophys Res 109(D14S09):12
- Rodríguez, A., Cueto, A.I., Majada, J., Benito, J.L. (2006). *Silvicultura del pino insigne (Pinus radiata). Manual básico. Cuidados culturales del pino insigne en Asturias para producir madera de calidad*. Gobierno del Principado de Asturias, Consejería de Medio Ambiente y Desarrollo Rural.
- Ruano, I., Bravo, F., Ordóñez, C. (2005). *Eficiencia del muestreo relascópico y del muestreo con parcelas concéntricas y de radio fijo para la estimación de variables dasométricas en rodales de pino piñonero (Pinus pinea)*. Cuarto Congreso Forestal Nacional, Sociedad Española de Ciencias Forestales.
- Valbuena, M. (2014). *Determinación de variables forestales de masa y de árboles individuales mediante delineación de copas a partir de datos LIDAR aerotransportado. Aplicación a las masas de Pinus sylvestris L. en Álava*. Tesis doctoral. Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad de la Rioja.
- Vallejo, R. & Sandoval, V. (2013). El Inventario Forestal Nacional. *Foresta*, 56, pág. 16-24.
- Vermote E, Ellicot E, Dubovik O, Lapyonok T, Chin M, Giglio L, Roberts GJ (2009) *An approach to estimate global biomass burning emissions of organic and black carbon from MODIS fire radiative power*. J Geophys Res 114(D18205): 23
- Vosselman, G. & Maas, H.G. (2010). *Airbone and Terrestrial Laser Scanning*. Dunbeath: Whittles publishing.

8. ANEXOS

ANEXO 1: TABLAS COMPLEMENTARIAS

Tabla 1: Características de las parcelas seleccionadas.

Nº parcela	FCC Total %	FCC Arboles %	Distribución Espacial	Composición Específica	Presencia matorral	Cortas Regeneración	Mejoras sobre el Vuelo	% Ocupación	Estado	Forma principal Masa	Origen Masa	Tratamiento Masa
443	100	85	Uniforme	Homogénea	Disperso <1m	Si	Podas	100	Fustal	Regular	Plantación	Monte alto
447	80	35	Uniforme	Homogénea	Disperso <1m	Si	No se observa	100	Monte bravo	Coetánea	Plantación	Monte alto
479	95	85	Uniforme	Homogénea	Disperso <1m	No	No se observa	80	Fustal	Regular	Plantación	Monte alto
497	95	80	Uniforme	Homogénea	Bosque claro	Si	Podas	100	Fustal	Regular	Plantación	Monte alto
813	100	85	Uniforme	Homogénea	Disperso <1m	Si	Podas	80	Latizal	Regular	Plantación	Monte alto
815	100	90	Uniforme	Homogénea	Pasto fino	Si	No se observa	100	Fustal	Regular	Plantación	Monte alto
833	95	75	Uniforme	Homogénea	Disperso <1m	No	No se observa	90	Fustal	Regular	Plantación	Monte alto
835	100	95	Uniforme	Homogénea	Disperso <1m	Si	Podas	100	Fustal	Regular	Plantación	Monte alto
933	100	50	Uniforme	Homogénea	Disperso <1m	Si	No se observa	100	Fustal	Regular	Plantación	Monte alto
935	95	75	Uniforme	Homogénea	Matorral >2m	No	No se observa	90	Fustal	Coetánea	Plantación	Monte alto
947	95	55	Uniforme	Homogénea	Matorral >2m	No	No se observa	90	Fustal	Coetánea	Plantación	Monte alto
949	100	85	Uniforme	Homogénea	Disperso <1m	Si	No se observa	90	Fustal	Regular	Plantación	Monte alto
951	95	70	Uniforme	Homogénea	Disperso <1m	No	No se observa	100	Fustal	Coetánea	Plantación	Monte alto
953	100	75	Uniforme	Homogénea	Matorral >2m	No	No se observa	100	Fustal	Coetánea	Plantación	Monte alto
959	100	55	Uniforme	Homogénea	Disperso <1m	Si	Podas	100	Fustal	Coetánea	Plantación	Monte alto
965	100	75	Uniforme	Homogénea	Disperso <1m	Si	No se observa	100	Fustal	Regular	Plantación	Monte alto
967	100	90	Uniforme	Homogénea	Disperso <1m	No	No se observa	100	Fustal	Coetánea	Plantación	Monte alto
969	95	80	Uniforme	Homogénea	Disperso <1m	No	No se observa	90	Latizal	Coetánea	Plantación	Monte alto
971	100	85	Uniforme	Homogénea	Disperso <1m	Si	No se observa	100	Fustal	Coetánea	Plantación	Monte alto
973	100	80	Uniforme	Homogénea	Disperso <1m	Si	No se observa	100	Latizal	Coetánea	Plantación	Monte alto
975	100	100	Uniforme	Homogénea	Disperso <1m	Si	No se observa	100	Fustal	Coetánea	Plantación	Monte alto
987	100	100	Uniforme	Homogénea	Disperso <1m	No	No se observa	100	Fustal	Coetánea	Plantación	Monte alto

989	100	85	Uniforme	Homogénea	Disperso <1m	Si	Podas	90	Latizal	Coetánea	Plantación	Monte alto
993	100	80	Uniforme	Homogénea	Disperso <1m	No	No se observa	100	Fustal	Regular	Plantación	Monte alto
997	100	80	Uniforme	Homogénea	Disperso <1m	Si	No se observa	100	Fustal	Coetánea	Plantación	Monte alto
1005	95	75	Uniforme	Homogénea	Matorral >2m	Si	No se observa	100	Latizal	Regular	Plantación	Monte alto
1021	90	75	Uniforme	Homogénea	Disperso <1m	No	Podas	100	Fustal	Coetánea	Plantación	Monte alto
1039	100	95	Uniforme	Homogénea	Matorral >2m	Si	No se observa	90	Fustal	Regular	Plantación	Monte alto
1043	100	80	Uniforme	Homogénea	Disperso <1m	Si	Limpias	100	Latizal	Coetánea	Plantación	Monte alto
21045	100	30	Uniforme	Homogénea	Disperso <1m	No	No se observa	100	Monte bravo	Coetánea	Plantación	Monte alto
1061	100	95	Uniforme	Homogénea	Matorral >2m	No	Podas	80	Latizal	Coetánea	Plantación	Monte alto
1065	100	70	Uniforme	Homogénea	Disperso <1m	Si	Limpias	100	Latizal	Regular	Plantación	Monte alto
1077	100	80	Uniforme	Homogénea	Disperso <1m	Si	Podas	100	Fustal	Coetánea	Plantación	Monte alto
1079	100	80	Uniforme	Homogénea	Disperso <1m	No	No se observa	90	Fustal	Regular	Plantación	Monte alto
1081	100	60	Uniforme	Homogénea	Disperso <1m	Si	Podas	70	Latizal	Coetánea	Plantación	Monte alto
1087	100	75	Uniforme	Homogénea	Disperso <1m	Si	No se observa	90	Fustal	Regular	Plantación	Monte alto
1109	100	85	Uniforme	Homogénea	Disperso <1m	No	Otros	80	Fustal	Regular	Plantación	Monte alto
1123	100	90	Uniforme	Homogénea	Disperso <1m	No	No se observa	100	Fustal	Coetánea	Plantación	Monte alto
1139	100	80	Uniforme	Homogénea	Disperso <1m	No	No se observa	100	Latizal	Coetánea	Plantación	Monte alto
1143	100	100	Uniforme	Homogénea	Disperso <1m	Si	No se observa	90	Latizal	Coetánea	Plantación	Monte alto
1145	90	80	Uniforme	Homogénea	Disperso <1m	Si	Podas	90	Fustal	Coetánea	Plantación	Monte alto
1163	100	100	Uniforme	Homogénea	Disperso <1m	Si	No se observa	90	Latizal	Coetánea	Plantación	Monte alto
1165	100	90	Uniforme	Homogénea	Disperso <1m	No	No se observa	100	Fustal	Regular	Plantación	Monte alto
1169	100	90	Uniforme	Homogénea	Disperso <1m	Si	No se observa	90	Fustal	Coetánea	Plantación	Monte alto
1171	90	85	Uniforme	Homogénea	Disperso <1m	Si	No se observa	80	Fustal	Regular	Plantación	Monte alto
1187	90	70	Uniforme	Homogénea	Disperso <1m	Si	Podas	90	Fustal	Coetánea	Plantación	Monte alto
1193	100	45	Uniforme	Homogénea	Disperso <1m	Si	No se observa	80	Fustal	Regular	Plantación	Monte alto
1201	95	60	Uniforme	Homogénea	Disperso <1m	Si	Podas	90	Latizal	Regular	Plantación	Monte alto
1221	90	80	Uniforme	Homogénea	Pasto fino	Si	No se observa	80	Fustal	Coetánea	Plantación	Monte alto
1237	100	85	Uniforme	Homogénea	Disperso <1m	Si	Podas	100	Fustal	Coetánea	Plantación	Monte alto
1243	90	70	Uniforme	Homogénea	Disperso <1m	Si	No se observa	90	Fustal	Coetánea	Plantación	Monte alto

Tabla 2: Ejemplo de datos de campo de la parcela 947 y del cálculo de la BT..

Estadillo	N° Arbol	Distancia	Dn1	Dn2	Ht	F. expansión	Dn medio (cm)	BT árbol (kg)	BT parcela (kg/ha)
0947	26,00	2,30	188,00	174,00	18,00	31,83	18,10	100,59	3201,74
0947	27,00	6,10	197,00	211,00	14,70	31,83	20,40	135,44	4311,32
0947	15,00	7,90	216,00	215,00	18,30	31,83	21,55	155,24	4941,43
0947	19,00	7,40	229,00	217,00	20,60	31,83	22,30	169,03	5380,33
0947	8,00	11,20	230,00	221,00	20,40	14,15	22,55	173,78	2458,48
0947	4,00	3,70	224,00	229,00	18,50	14,15	22,65	175,70	2485,69
0947	17,00	4,40	227,00	234,00	17,90	14,15	23,05	183,52	2596,31
0947	10,00	10,60	240,00	225,00	22,50	14,15	23,25	187,51	2652,71
0947	6,00	14,60	240,00	247,00	18,30	14,15	24,35	210,36	2975,96
0947	1,00	15,00	234,00	254,00	17,50	14,15	24,40	211,44	2991,18
0947	23,00	12,10	251,00	242,00	19,80	14,15	24,65	216,87	3067,99
0947	11,00	14,20	248,00	245,00	25,30	14,15	24,65	216,87	3067,99
0947	22,00	14,40	251,00	263,00	17,80	14,15	25,70	240,58	3403,43
0947	7,00	10,70	257,00	275,00	22,90	14,15	26,60	262,08	3707,66
0947	25,00	8,60	280,00	281,00	19,50	14,15	28,05	299,07	4230,94
0947	9,00	7,20	282,00	280,00	24,00	14,15	28,10	300,40	4249,72
0947	14,00	11,60	288,00	277,00	25,50	14,15	28,25	304,40	4306,37
0947	13,00	5,40	300,00	277,00	24,20	14,15	28,85	320,74	4537,48
0947	20,00	14,50	301,00	287,00	25,40	14,15	29,40	336,16	4755,71
0947	12,00	10,30	302,00	300,00	22,70	14,15	30,10	356,43	5042,37
0947	16,00	12,60	308,00	298,00	24,20	14,15	30,30	362,35	5126,12
0947	28,00	6,50	313,00	305,00	21,00	14,15	30,90	380,46	5382,34
0947	30,00	14,80	321,00	318,00	25,90	14,15	31,95	413,43	5848,83
0947	5,00	9,40	335,00	357,00	23,30	14,15	34,60	504,06	7130,92
0947	24,00	7,10	358,00	337,00	23,20	14,15	34,75	509,51	7208,06
0947	18,00	12,30	376,00	334,00	29,90	14,15	35,50	537,31	7601,26
0947	29,00	4,80	366,00	388,00	24,60	14,15	37,70	623,99	8827,52
						N: 452,71		BT (Kg): 7887,30	BT (Kg/ha): 121489,85

Tabla 3: Resultados de BT (kg/ha) para cada parcela

PARCELA	BT (tn/ha)
443	118,29
447	115,80
479	349,06
497	119,24
813	58,91
815	199,47
833	211,99
835	169,89
933	133,69
935	132,46
947	121,49
949	160,52
951	135,73
953	191,79
959	73,18
965	176,64
967	210,52
969	26,63
971	101,41
973	123,16
975	149,53
987	255,90
989	100,56
993	260,06
997	159,99
1005	78,19
1021	180,44
1039	227,04
1043	65,56
1045	6,49
1061	66,87
1065	60,12
1077	119,41
1079	220,38
1081	19,16
1087	306,67
1109	186,10
1123	321,29
1139	75,00
1143	83,30
1145	170,83
1163	107,36
1165	184,37
1169	326,76
1171	360,55
1187	112,66
1193	145,47
1201	99,06
1221	295,96
1237	120,48
1243	266,62

Tabla 4: Resumen de todos los estadísticos LiDAR obtenidos para las parcelas con radio 15 m y 25 m.

	Parcelas con 15 m de radio				Parcelas con 25 m de radio			
	Media	Desviación típica	Máximo	Mínimo	Media	Desviación típica	Máximo	Mínimo
Elev minimum	4,06	2,45	19,20	3,01	3,38	0,84	7,04	3,00
Elev maximum	25,40	7,44	39,58	8,49	26,70	7,24	39,58	9,70
Elev mean	15,54	5,29	29,55	4,49	15,52	5,08	28,84	4,58
Elev mode	15,23	7,20	31,17	3,28	15,49	6,70	30,40	3,57
Elev stddev	4,50	1,97	10,64	1,04	4,74	1,87	10,15	1,39
Elev variance	24,08	21,48	113,12	1,07	25,93	20,82	103,10	1,94
Elev CV	0,29	0,09	0,55	0,13	0,31	0,08	0,58	0,15
Elev IQ	5,86	3,16	17,16	1,25	6,16	2,84	17,23	1,49
Elev skewness	-0,37	0,61	1,13	-2,28	-0,25	0,66	2,09	-1,16
Elev kurtosis	3,37	1,68	13,19	1,65	3,29	1,18	7,82	1,85
Elev P01	5,04	2,88	20,46	3,03	4,51	2,23	15,27	3,03
Elev P05	7,36	4,00	22,96	3,17	6,85	3,34	21,78	3,11
Elev P10	9,27	4,39	24,63	3,28	8,87	3,98	23,73	3,26
Elev P20	11,86	4,91	26,26	3,59	11,55	4,59	25,82	3,43
Elev P25	12,75	5,11	26,78	3,78	12,60	4,91	26,35	3,63
Elev P30	13,63	5,29	27,15	3,90	13,36	5,12	27,02	3,79
Elev P40	15,04	5,58	28,88	4,03	14,87	5,39	28,22	4,00
Elev P50	16,09	5,80	29,80	4,37	15,99	5,64	29,31	4,25
Elev P60	17,10	6,05	30,65	4,51	17,07	5,84	30,34	4,55
Elev P70	18,11	6,23	31,99	4,84	18,18	6,04	31,26	4,90
Elev P75	18,61	6,33	32,61	5,04	18,76	6,13	31,74	5,12
Elev P80	19,23	6,44	33,11	5,26	19,46	6,23	32,41	5,33
Elev P90	20,73	6,71	34,32	5,95	21,15	6,51	33,66	6,21
Elev P95	21,91	6,82	35,93	6,44	22,57	6,61	34,93	7,28
Elev P99	23,80	7,20	38,42	7,54	24,82	6,93	37,94	9,47
Percentage first returns above 3.00	52,49	18,86	85,83	16,95	52,88	18,83	85,25	15,39
Percentage all returns above 3.00	49,46	17,61	81,73	16,16	49,77	17,44	78,51	14,79
Percentage first returns above mean	28,95	11,76	59,46	7,14	28,92	11,85	54,55	6,37
Percentage first returns above mode	29,83	15,45	62,35	6,90	29,40	14,00	63,85	5,26
Percentage all returns above mean	26,74	10,50	56,73	6,54	26,67	10,48	51,26	6,01
Percentage all returns above mode	27,70	14,45	61,50	6,28	27,20	12,97	62,32	5,24

Tabla 5: Correlaciones de Spearman entre el valor de biomasa y los estadísticos LiDAR en las parcelas de 15m y 25m. **: La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral). *: La correlación es significativa a nivel 0,05 (bilateral).

	Parcelas 15m	Parcelas 25m
	BT	BT
Elev minimum	0,02	0,00
Elev maximum	0,81**	0,79**
Elev mean	0,80**	0,80**
Elev mode	0,63**	0,71**
Elev stddev	0,70**	0,73**
Elev variance	0,70**	0,73**
Elev CV	0,14	0,07
Elev IQ	0,59**	0,66**
Elev skewness	-0,62**	-0,71**
Elev kurtosis	0,17	0,12
Elev P01	0,13	0,10
Elev P05	0,29*	0,30*
Elev P10	0,46**	0,44**
Elev P20	0,62**	0,63**
Elev P25	0,67**	0,69**
Elev P30	0,72**	0,72**
Elev P40	0,80**	0,80**
Elev P50	0,80**	0,81**
Elev P60	0,81**	0,82**
Elev P70	0,82**	0,83**
Elev P75	0,83**	0,84**
Elev P80	0,84**	0,83**
Elev P90	0,83**	0,81**
Elev P95	0,83**	0,81**
Elev P99	0,82**	0,77**
Percentage first returns above 3.00	0,36**	0,39**
Percentage all returns above 3.00	0,36*	0,38**
Percentage first returns above mean	0,47**	0,49**
Percentage first returns above mode	0,12	0,15
Percentage all returns above mean	0,45**	0,48**
Percentage all returns above mode	0,09	0,12

Tabla 6: BT calculada en las parcelas del IFN4 y estimada por el modelo en píxeles de 45 y 50m.

Parcela	BT parcela (Tn/ha)	BT (Tn/ha) Píxel de 45m	BT (Tn/ha) Píxel de 50m
443	118,30	128,13	144,08
447	115,80	136,29	133,91
479	349,06	321,91	197,48
497	119,25	134,11	140,99
813	58,91	104,35	108,05
815	199,47	437,93	451,40
833	211,99	176,23	182,85
835	169,90	145,01	161,62
933	133,69	184,99	272,38
935	132,46	143,53	136,50
947	121,49	194,84	168,39
949	160,52	0,00	0,00
951	135,73	130,68	135,18
953	191,79	264,55	189,96
959	73,18	105,39	105,15
965	176,64	195,18	287,10
967	210,52	175,79	202,38
969	26,63	74,54	105,08
971	101,41	90,53	100,32
973	123,16	88,59	56,27
975	149,53	105,51	143,58
987	255,90	161,47	147,26
989	100,56	65,70	66,31
993	260,06	207,21	177,84
997	159,99	137,10	149,63
1005	78,19	93,19	80,21
1021	180,44	209,83	237,12
1039	227,04	233,11	248,13
1043	65,56	66,30	94,97
1045	6,50	35,41	37,36
1061	66,87	94,41	96,09
1065	60,12	103,17	96,18
1077	119,41	183,20	209,56
1079	220,38	237,96	263,03
1081	19,16	97,75	51,56
1087	306,67	174,09	168,74
1109	186,10	143,87	132,87
1123	321,29	300,37	245,31
1139	75,00	63,85	91,67
1143	83,30	115,00	107,21
1145	170,83	133,73	142,01
1163	107,36	129,80	146,57
1165	184,37	137,64	172,62
1169	326,76	256,50	293,61
1171	360,55	312,28	220,26
1187	112,66	88,56	99,36
1193	145,47	144,15	189,03
1201	99,06	129,47	153,25
1221	295,96	156,56	161,57
1237	120,48	57,45	72,70
1243	266,62	258,73	256,53

ANEXO 2: Fotografías.

(Todas las fotografías han son de elaboración propia).



Fotografía 1: Plantaciones forestales de *Pinus radiata* en Pagomakurre (Areatza)



Fotografía 2: Plantaciones de *Pinus radiata* en Urigoiti (Orozko).



Fotografía 3: Plantaciones forestales de *Pinus radiata* en el valle de Orozko.



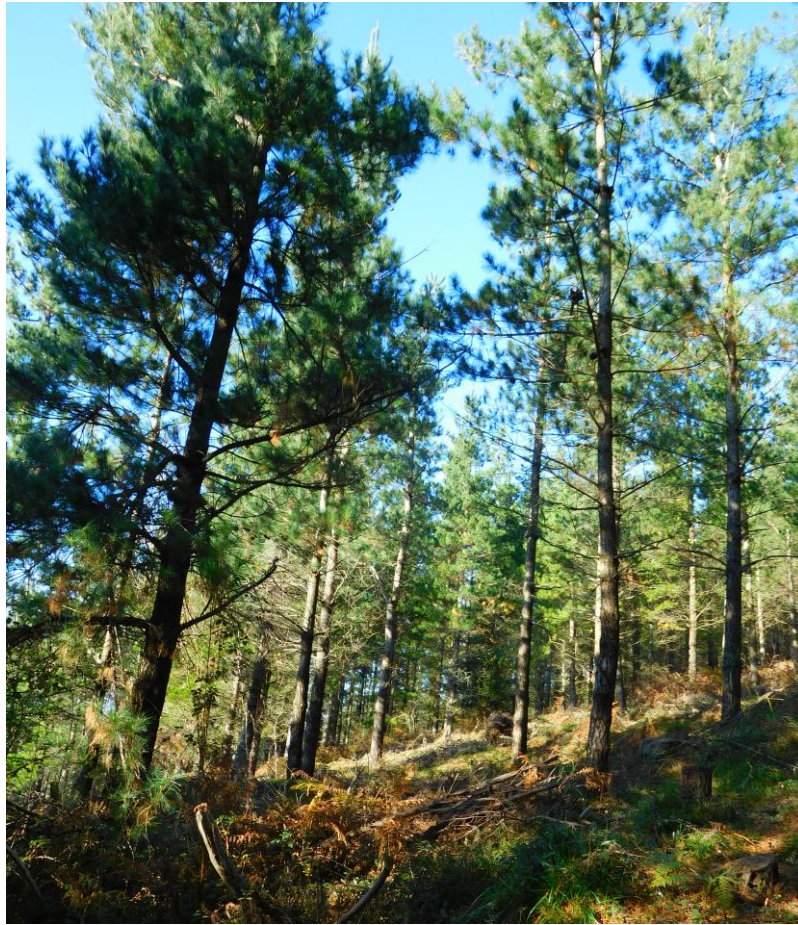
Fotografía 4: Plantaciones forestales de *Pinus radiata* en el valle de Zeberio.



Fotografía 5: Caseríos de Orozko con pinares detrás.



Fotografía 6: Plantación reciente de *Pinus radiata* en Orozko. Detrás masas más maduras.



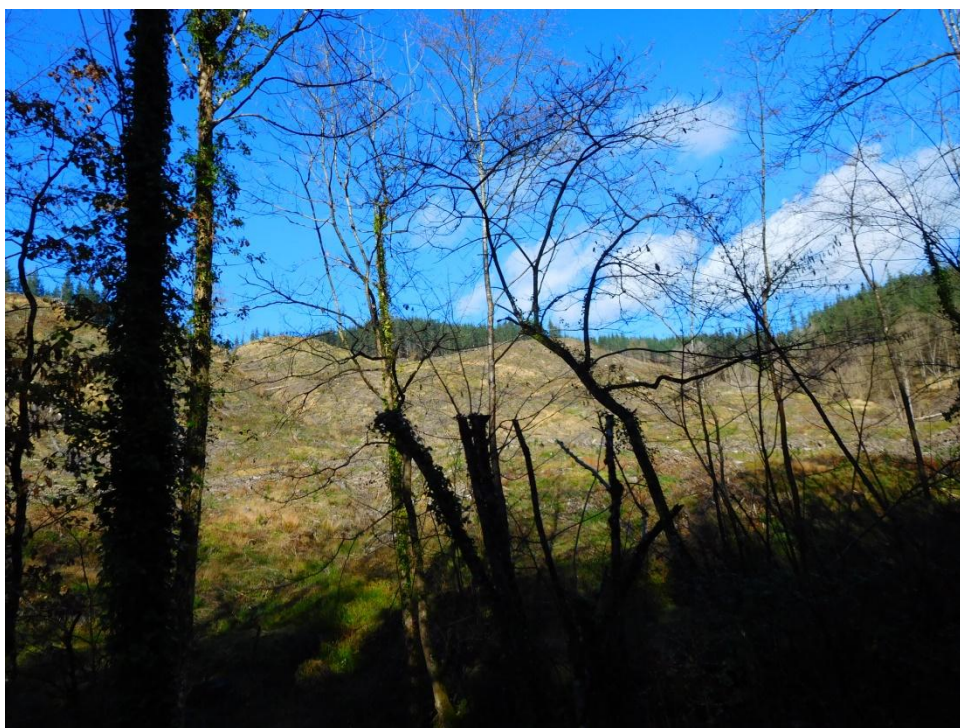
Fotografía 7: Interior de una masa de *Pinus radiata* en Urigoiti (Orozko)



Fotografía 8: Interior de un pinar en Igorre.



Fotografía 9: Interior de un pinar en Saldropo (Ubidea)



Fotografía 10: Zona en la que se ha aplicado una tala “a hecho” como corta final.