

Análisis de la biomasa de fragmento de bosque por medio de productos LIDAR, en Cataluña – España

Sidney H. C. de Santana^{*}, Luis F. S. Sastres^{**}, Salvador H. Navarro^{**}, Maria L. S. Laurentino^{***}

^{*}Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) Departamento de Ciências Geográficas, Av. Professor Moraes Rego, s/n. Cidade Universitária, Recife, PE, Brasil. Fone: +55 81 9 9882 8231. E-mail: sidneysantana.geo@hotmail.com

^{**}Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias de Palencia, Universidad de Valladolid, Uva, Palencia, Castilla y León, España. Fone: +34 970 108350. E-mail: luxpher@gmail.com & inpaisal@iaf.uva.es

^{***}Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias de Palencia, Universidad de Valladolid, Uva, Palencia, Castilla y León, España. Fone: +55 81 9 9761 6012. E-mail: luciellelaurentino@gmail.com

Received 03 March 2016; accepted 22 April 2016

Abstract

This work aims quantify and analyze the biomass of a forest area belonging to the Natural Space of the Alynia Mountain, located in Catalonia, Spain, by means of remote sensing tools. Thus for the study, they were used LiDAR data of the study area. From these data two Digital Terrain Models (Digital Surface Model and Digital Elevation Model of Vegetation) were generated, and other relevant statistical calculations were performed to then calculate the biomass, basal area and number of feet. The information obtained was embodied in maps to represent the results and other parameters related to biomass. As a result of this work, models of biomass, basal area and number of trees had a good relationship with the inventory data, so it was possible to estimate these parameters for the study area. In fact calculating biomass by LiDAR data resulted in 3059.76 tons for an area of 24.52 has drawn in the study area, while the inventory calculations resulted from 3341.42 tons in the same area. So, can be say that the LiDAR technology provides forestry research a number of applications, from dasometric order and / or dendrometry necessary for effective forest management.

Keywords: Active remote sensing, ecosystem study, forest biomass, LiDAR, *Pinus sylvestris*.

1. Introducción

El impacto del cambio climático se manifiesta de distintas formas según las distintas regiones geográficas y sus efectos en los ecosistemas varían con el aumento de la temperatura, los cambios en el nivel de irradiancia y radios UV-B, así como con la cantidad y los patrones espaciales de

precipitación y humedad (Netherer y Schopf, 2010). El IV Informe de Evaluación del IPCC, aprobado en la primera mitad de 2007, destaca que, entre los ecosistemas terrestres, "...los ecosistemas de tipo mediterráneo se encuentran entre los más vulnerables del mundo [al cambio climático], y sufrirán impactos muy severos" (IPCC, 2007).

El aumento de las temperaturas medias se está demostrando como un factor importante que explica los cambios en la distribución de plantas y animales que se ha venido observando en la historia reciente según el. De esta manera, los bosques son particularmente sensibles a los cambios del clima, pues el largo tiempo de vida de los árboles no permite una pronta adaptación a los cambios ambientales (Lindner et al., 2010).

Actualmente diversas políticas promueven el seguimiento de las tasas de almacenamiento de carbono en los bosques, como el protocolo de Kioto, la PAC o RED++ (p. ej., IGBP, 1998) así como una orientación de la gestión de los bosques hacia la mitigación del cambio climático (Canadell y Raupach, 2008). Los bosques en el mundo almacenan unas 289 gigatoneladas de carbono tan solo en su biomasa, por lo que desempeñan un papel decisivo en el equilibrio mundial del carbono y poseen un potencial importante de mitigación del cambio climático (FAO, 2010).

La vegetación arbórea supone el 70% del carbono acumulado en la vegetación mundial (Bravo et al., 2007). En la mayoría de los países europeos y norte de América, el volumen de la madera aprovechada anualmente es menor que el crecimiento anual de los bosques (FAO, 2010), con lo cual convierte a este tipo de bosques, actualmente, en sumideros netos de CO₂.

La fijación de carbono en la biomasa arbórea de los sistemas forestales de España ha sido cuantificada por Montero et al. (2005), además de los estudios de Sánchez Peña y Martínez Saavedra (2001), que parten de los datos de los inventarios forestales nacionales, teniendo en cuenta que los inventarios forestales constituyen una base de partida para estimar la biomasa forestal (Brown, 2002). El carbono acumulado en estos bosques, varía en gran medida en función de las especies, por ejemplo los eucaliptos y los pinos son los árboles que presentan las mayores tasas de absorción de carbono, en concreto estos últimos presentan una media de 1,2 t/ha año, datos que revelan el potencial que los bosques en España (OSE, 2011).

El *Pinus sylvestris* T., por ejemplo, es un pino que ocupa una media de 1 280 000 ha del territorio español (Montero et al., 2008) pudiendo sufrir mayores consecuencias con los cambios ambientales. Un estudio hecho por

López y Camacho (2010) muestra que en un escenario para 2050 la superficie ocupada por el *Pinus sylvestris* sufrirá una disminución de la área fitoclimática potencial de los actuales 8.444.700 ha a 1 269 100 ha en condiciones climáticas de este escenario futuro. En la mitad sur de España, según los autores, la situación sería aún más grave donde la especie desaparecería prácticamente del conjunto de sierras béticas y de una parte muy importante del Sistema Central. Otros estudios hechos, a partir de teledetección activa, tratan de la ocupación de la especie en regiones ecológicas y socialmente similares (Cuasante y García, 2009).

A su vez, la teledetección tiene su interés incrementado cuando los costes asociados al inventario y la necesidad de seguimiento de los bosques son altos (Holmgren y Thuresson, 1998).

En las últimas décadas, nuevas herramientas de teledetección han ganado popularidad a la hora de adquirir información espacialmente continua sobre la disposición espacial de recursos forestales (Boyd y Danson, 2005). Entre muchas herramientas, está el *Light Detection and Ranging* (LiDAR). A partir de la emisión de pulsos de láser esta herramienta mide el tiempo de retorno para estimar directamente la altura y la estructura vertical de los bosques (Dubayah y Drake, 2000; Lefsky et al., 2002).

Con los datos LiDAR se puede describir estructuras forestales, como volúmenes de las copas de los árboles, distribución vertical del dosel, diversidad forestal, cantidad de biomasa sobre el suelo cubierto por vegetación, estudios de erosión y sedimentación costera, entre otros, ubicándose como una de las técnicas aerotransportadas más precisas para adquirir información de posición de cualquier objeto sobre la superficie terrestre (Rengifo y Puentes, 2007). Los datos LiDAR se pueden adquirir a alta densidad de muestreo con precisión geométrica excelente (Reutebuch et al., 2005; Mallet y Bretar, 2009). Estas ventajas pueden revelar la variabilidad de la biomasa área global en escalas espaciales finas.

De esta manera, el Espacio Natural de la Montaña de Alinyà presenta una diversidad paisajística, florística y faunística riquísima, conteniendo masas forestales de gran interés ambiental como potenciales sumideros de carbono. Una de estas masas correspondiente a

un bosque de *Pinus sylvestris*, debido a su potencial como sumidero de carbono, fue seleccionada para la realización de estos trabajos.

Por lo tanto, el objetivo de este estudio consiste en cuantificar y analizar la biomasa de un fragmento forestal de *Pinus sylvestris* perteneciente al Espacio Natural de la Montaña de Alinyà, por herramientas de detección remota activa.

2. Material y métodos

2.1 Caracterización del área de estudio

El Espacio Natural de la Montaña de Alinyà lo constituyen 5352,13 ha localizadas en la provincia de Lérida dentro del municipio de Figols i Alinyà, con coordenadas centrales E 1°25'22,8''; N 42°10'49,1''. Este espacio natural es la mayor finca privada de Cataluña

perteneciente a la Fundación Catalunya-La Pedrera (FCLP)

La disposición altitudinal, que va desde los 608 m hasta los 2379 m, el relieve y la orientación de las laderas, las zonas de solana y de umbría, dan lugar a diferentes zonas con un microclima característico (clima prepirenaico). Las temperaturas medias se sitúan entre los 8 °C y los 16 °C, con fenómenos de inversión térmica en el fondo del valle en los meses fríos. Características climáticas estas, que incluyen la zona en la región eurosiberiana y también se encuentran zonas que son típicamente mediterráneas (Moisés et al., 2004). Por la situación geográfica, la pluviometría media oscila entre los 650 mm y los 1100 mm, donde los valores máximos se dan en la primavera y el verano, y los valores mínimos durante el invierno.

La Figura 1 corresponde al mapa de localización de la zona de estudio.

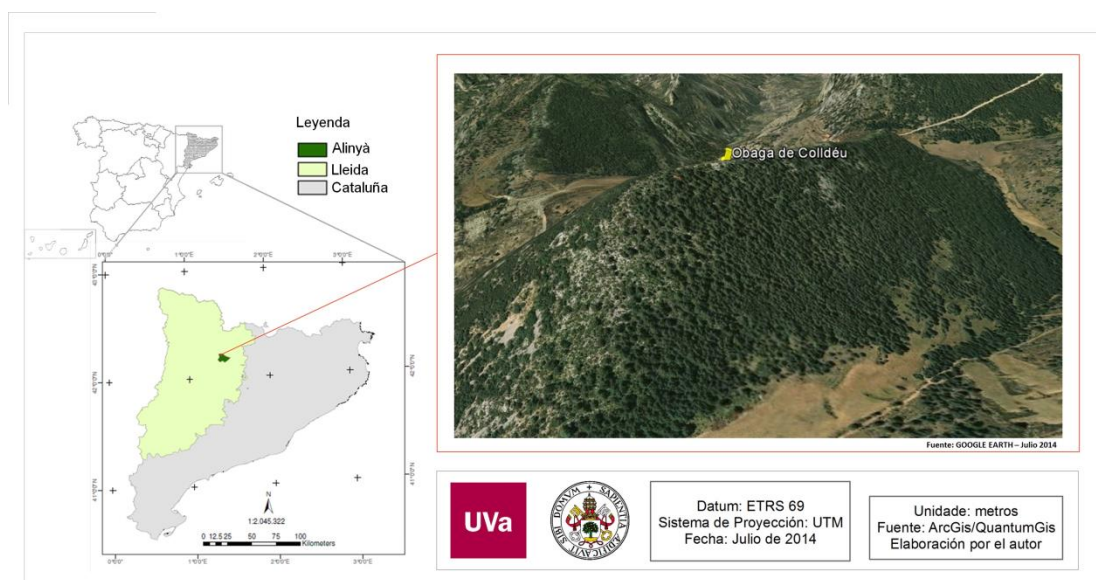


Figura 1 - Localización de la Zona de Estudio (Obaga de Colldéu).

Dentro del espacio natural descrito se ha seleccionado una masa homogénea de 25 ha de *Pinus sylvestris* (Figura 2) sobre la que fueron calculados, a partir de datos LiDAR, varios modelos de estimación de las variables de interés, en este caso, biomasa, área basimétrica y número de pies.

2.2 Datos del inventario

Como datos de referencia de campo para este estudio, se han utilizado aquellos

procedentes del inventario forestal realizado por FCLP en verano del 2013. Los datos suministrados han sido, por una parte, las coordenadas centrales, el radio y la superficie total de las parcelas así como el número de pies por clase diamétrica y, por otra, los resultados de los cálculos del área basimétrica y biomasa para cada uno de los rodales inventariados según la metodología del CREAM (Centro de Investigación Ecológica y Aplicaciones Forestales) (Generalitat de Catalunya). Como

base para la comparación con datos LiDAR y la posterior obtención de modelos de regresión se han elegido 5 rodales de masa homogénea de

Pinus sylvestris que suponen 23 parcelas circulares de radio medio de 12 m y una superficie ideal de 452,39 m².

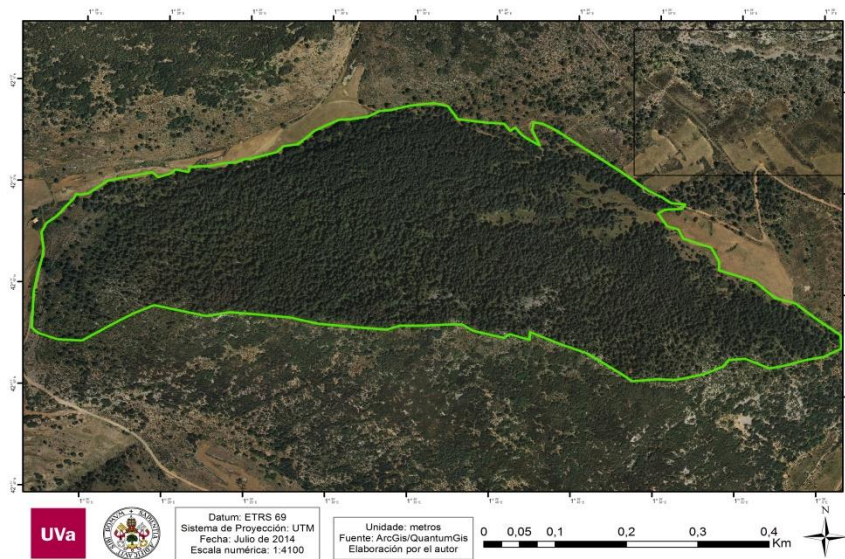


Figura 2 - Delimitación de la zona de estudio sobre la ortofotocarta.

La Figura 3 presenta el mapa del espacio natural, con los puntos del Inventario de la Fundación y la delimitación de la zona de estudio. Los puntos son representados por tres caracteres distintos: el carácter (*) representa

los puntos de los rodales utilizados en los cálculos estadísticos de biomasa, el carácter (■) representa los puntos situados en la zona de estudio, y el carácter (●) los demás puntos de los rodales que forman parte del inventario.

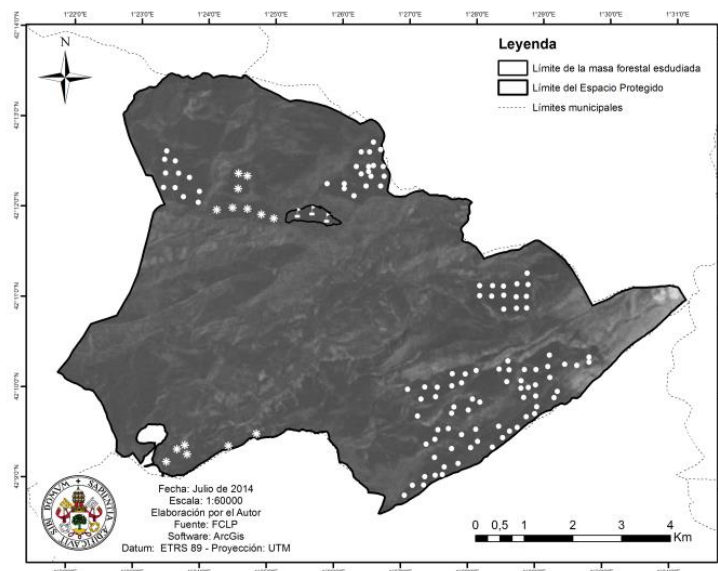


Figura 3 - Puntos del inventario Forestal Nacional.

2.3 Procesamiento de los datos LiDAR

Para trabajar con los datos LiDAR, fueron adquiridas las hojas correspondientes al vuelo LiDAR sobre el área de estudio, el cual se

realizó entre los años 2009 y 2011 por el Instituto Geográfico Nacional dentro del plan PNOA (Plan Nacional de Ortografía Aérea). Durante el procesamiento se ha aplicado una

corrección con factores de crecimiento anuales obtenidos del IFN3 (Inventario Forestal Nacional). Los archivos adquiridos se encuentran en formato de nube de puntos “.las” ya reclasificados. Para este trabajo se han seleccionado los archivos pertinentes sumando un total de 1,23 GB de información. Dichos archivos incluyen la zona para la que se estiman las variables y las zonas donde se encuentran las parcelas del inventario.

Para el visionado de la nube de puntos LiDAR fue necesaria la utilización del programa gratuito FugroVieverTM (Fugro).

Para la gestión y el filtrado se utilizó el software Lastools (Martin Isenburg, LAStools). En cuanto al análisis, el cálculo de variables y el visionado de puntos se ha recurrido al software de libre distribución FUSION/LDV desarrollado por el Forest Service–USDA (Servicio Forestal del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos).

Así las clases consideradas fueron las correspondientes al suelo, baja vegetación, media vegetación, alta vegetación y *model key point*. Seguidamente se utilizó la herramienta *lasclip* para seleccionar y extraer la información contenida en el archivo .las correspondiente a la zona de interés.

Un Modelo Digital de Superficies, (MDS) fue generado para el área y para las demás hojas utilizadas, para que sea posible la realización de los cálculos de biomasa por medio de la separación del suelo con la masa forestal. Para ello fue utilizado el comando *GridSurfaceCreate* de FUSION. Un proceso similar fue adoptado para generar el Modelo Digital de Alturas de Vegetación (MDHV o *Canopy model*) de la zona. Posteriormente, ambos modelos se convirtieron a formato ascii.

El siguiente paso consistió en calcular toda la batería de estadísticos LiDAR (Anexo) de parcelas circulares, con radios similares a aquellos tomados en el terreno (12 m de radio y 452 m² de superficie ideal) teniendo como centro de cada circunferencia su respectivo punto de los 23 seleccionados. Este proceso fue realizado mediante el comando *Gridmetrics* de FUSION para obtener los datos LiDAR que se confrontarán con los datos a pie de campo con el fin de generar los modelos. Dicho comando calcula los estadísticos en celdas rectangulares de tamaño ajustable por el usuario, en este caso

de 20 m de lado para tener superficies similares a las parcelas de campo. Hay que resaltar que al ejecutar *Gridmetrics* el programa FUSION arroja ciertos errores que se traducen en celdas con información corrupta que han de ser desechadas. Es por ello que al aplicar modelos en las celdas o al representar en un mapa alguna variable aparezcan celdas en blanco o “huecos”.

El proceso tiene como fase final la obtención de ecuaciones de regresión lineal donde se modela la relación entre una variable dependiente (biomasa, área basimétrica y número de pies) y las variables independientes (estadísticos LiDAR). En este caso se ha utilizado el software estadístico de libre licencia R, nacido en la Universidad de Auckland y desarrollado actualmente por *R Development Core Team*. Mediante dicho programa se han examinado las relaciones de correlación entre las variables y se ha ido afinando los distintos modelos hasta conseguir altos coeficientes de determinación y bajos errores estándar.

Para los 3 modelos que se han obtenido se ha comprobado las condiciones de heterocedasticidad, normalidad, linealidad y existencia de valores atípicos. En los 3 casos los modelos cumplen las condiciones requeridas.

2.4 Cálculos de los modelos estadísticos basados en datos LiDAR

Los modelos lineales generados a partir de los datos LiDAR para la estimación de las variables biomasa, área basimétrica y número de pies, son los siguientes:

Ecuación 1: Modelo para el cálculo de Biomasa

$$\begin{aligned} \text{Biomasa} = & -7.229823 + (61.02237 * \text{"Elev mean"}) - (9.186137 * \text{"Elev P05"}) - \\ & (22.939749 * \text{"Elev P50"}) - (4.677324 * \\ & \text{"Elev P75"}) - (13.513121 * \text{"Elev P90"}) - \\ & (6.38019 * \text{"ElevP95"}) + (0.030771 * \\ & \text{"Percentage"}) - (4.253758 * \text{"Elev P25"}) \\ & + (114.919262 * \text{"Elev CV"}) + (0.805849 * \\ & \text{"Elev P99"}) \end{aligned}$$

Ecuación 2: Modelo para el cálculo de Área basimétrica

$$\begin{aligned} \text{Área basimétrica} = & -7.53203 + (13.96245 * \\ & \text{"Elev mean"}) - (3.45731 * \text{"Elev P05"}) + \\ & (0.01205 * \text{"Percentage"}) - (5.80055 * \\ & \text{"Elev P50"}) - (0.073602 * \text{"Elev P95"}) - \end{aligned}$$

$$(3.36153 * "Elev P90") + (85.2988 * "Elev CV") + (0.49708 * "Elev P99") + (1.23639 * "Elev varia") - (13.91983 * "Elev stdde")$$

Ecuación 3: Modelo para el cálculo de Números de Piés

$$\begin{aligned} \text{Número de pies} = & -839.7000 + (0.4565 * \\ & "Percentage") + (874.500 * "Elev mean") \\ & - (162.100 * "Elev P05") - (304.3000 * \\ & "Elev P50") - (167.2000 * "Elev P90") - \\ & (172.7000 * "Elev P95") + (5128.000 * \\ & "Elev CV") + (0.0000022403 * \\ & "Percentage") - (126.700 * "Elev varia") \\ & + (71.9400 * "Elev skewn") \end{aligned}$$

En la Tabla 1 se resumen los parámetros utilizados en las correlaciones de estos tres parámetros.

Tabla 1 - Correlaciones de los modelos lineares construidos para la estimación de la biomasa, área basimétrica y número de pies.

Modelo de Biomasa
<i>Correlaciones</i>
Error estándar residual = 0,5712
Múltiple R – cuadrado = 0,9198
Ajustado R-cuadrado = 0.853
Modelo de Area basimetrica
<i>Correlaciones</i>
Error estándar residual = 0,172
Múltiple R – cuadrado = 0,9145
Ajustado R-cuadrado = 0,8433
Modelo Número de Pies
<i>Correlaciones</i>
Error estándar residual = 6,666
Múltiple R – cuadrado = 0,9562
Ajustado R-cuadrado = 0,9197

2.5 Cartografía y layout

Los productos cartográficos generados para este trabajo fueran construidos por medio de los softwares ArcMap™ 10 (ArcGIS®) bajo licencia de Esri adquirida por la Universidad de Valladolid, y QuantumGIS desarrollado por la fundación OSGeo (*Open Source Geospatial*

Foundation) de licencia gratuita y código abierto.

La clasificación de los índices de vegetación empleada consiste en una gradación de colores, en la cual cada tono corresponde a un valor.

3. Resultados y discusión

3.1 Modelo Digital de Terreno

A partir del procesamiento de la información contenida en el vuelo LiDAR y el cálculo de los distintos estadísticos se generaron dos MDT, uno de superficies y otro de alturas de vegetación así como mapas de las principales variables de interés.

La Figura 4 presenta el modelo de elevaciones o superficies generado por los datos LiDAR, por medio de la herramienta *GridsurfaceCreate*.

Por medio de la gradación de colores con los valores de altitud correspondiente, como muestra la leyenda de la Figura 5, se observa que la porción sudoriental comprende la parte más elevada de la zona de estudio, representada por el color amarillo, mientras que la zona más baja se encuentra en la porción noroeste de la zona, representada por el color azul.

3.2 Modelo de Dosel

La Figura 5 presenta el modelo de dosel o alturas de la vegetación, creado por la herramienta *Canopy Model*.

La Figura 5 muestra que la masa de vegetación más elevada se encuentra en la parte central del área y en algunos sectores de la parte oriental. Los valores de altura más bajos se encuentran, de manera general, por los bordes del área de estudio, representados por el color morado. La porción oeste y noreste presentan las mayores áreas con valores bajos de elevación frente a las demás. Al compararse el modelo de dosel con la ortofotografía de la zona (Figura 2) es posible obtener una misma idea respecto a la situación de la masa forestal en la zona, sin embargo, además de especificar los valores de altura, el modelo de dosel presenta detalles específicos de toda la masa forestal por medio del contraste de colores, apoyando, de esta forma, el análisis de la zona. En esto sentido Riaño et al. (2004) afirma que los niveles de

detalle obtenidos con sensores LiDAR aerotransportados son realmente espectaculares, puesto que se logra una descripción muy

detallada de la estratificación vertical de la vegetación.

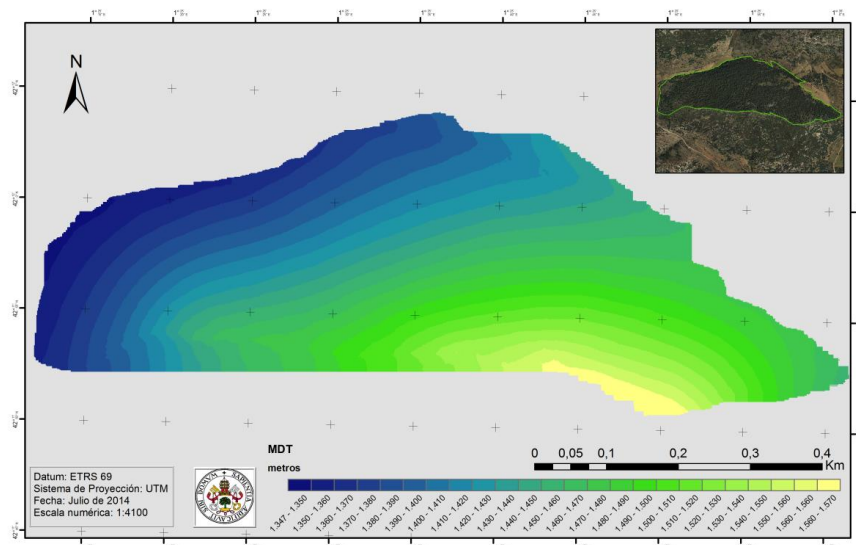


Figura 4 - Modelo digital de superficies resultante de los datos LiDAR.

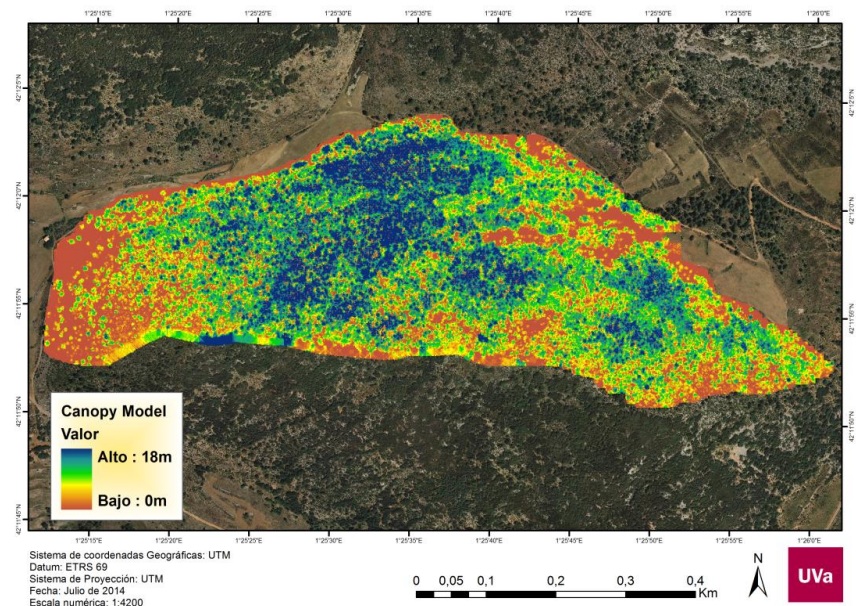


Figura 5 - MDHV resultante de los datos LiDAR.

3.3 Resultados de los modelos estadísticos basados en datos LiDAR

En la Tabla 2 son enseñados los valores de las variables forestales obtenidos por el inventario forestal, y los valores resultantes de las ecuaciones formuladas por medio de los modelos lineales entre los datos LiDAR y los datos del

inventario.

A continuación, la Figura 6 muestra las gráficas de dispersión entre los valores por parcela de las variables provenientes del inventario y los generados por el modelo estadístico aplicado sobre los datos LiDAR.

Tabla 2 - Valores de biomasa, área bisimétrica y número de pies por parcela obtenidos mediante inventario y con los respectivos modelos.

Puntos de los rodales	Biomasa Inventario	Biomasa modelo	Área Bisimétrica Inventario	Área Bisimétrica modelo	Nº de pies Inventario	Nº de pies modelo
6d1	4,28	4,41	1,16	1,18	23,00	21,91
6d2	7,36	6,73	2,11	1,93	72,00	64,69
6d2	5,21	5,27	1,45	1,56	34,00	48,57
4e1	5,66	5,55	1,64	1,70	59,00	58,69
4e2	5,72	7,38	1,58	1,37	37,00	38,39
4e3	7,38	7,43	2,11	2,02	65,00	58,41
4e4	7,57	4,82	2,11	2,18	62,00	61,75
4e5	5,68	4,28	1,74	1,59	109,00	108,45
4e6	4,62	4,82	1,28	1,16	30,00	30,28
8a1	4,8	6,44	1,36	1,38	41,00	42,34
8a2	5,85	6,32	1,68	1,82	49,00	46,92
8a3	5,64	5,29	1,59	1,76	42,00	48,27
8a4	4,97	2,78	1,39	1,53	37,00	40,64
8a5	2,38	6,84	0,71	0,95	32,00	33,92
8b1	6,48	4,22	1,86	2,03	59,00	60,26
8b2	4,62	5,67	1,28	1,23	30,00	21,44
8b3	6,38	2,55	1,83	1,70	58,00	56,15
8d1	2,31	6,12	0,66	0,61	18,00	12,46
8d2	6,46	6,14	1,84	1,71	54,00	52,55
8d3	5,54	6,79	1,63	1,70	65,00	58,04
8d4	6,56	7,51	1,96	1,96	97,00	94,14
8d5	7,79	7,86	2,24	2,16	81,00	81,10
8d6	7,82	4,41	2,27	2,27	80,00	79,59

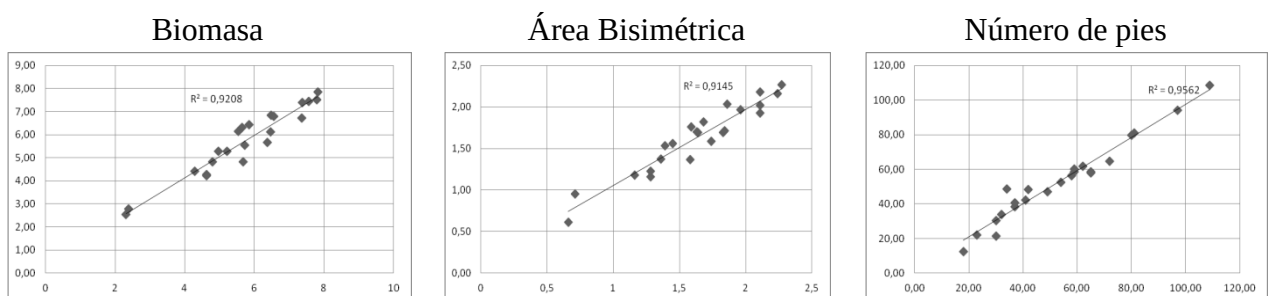


Figura 6 - Correlaciones de las variables originadas de los datos inventario e resultantes del cálculo estadístico de los datos LiDAR.

En la Figura 6 se percibe que las correlaciones entre los valores de las variables para las 23 parcelas y los valores correspondientes resultantes del modelo aplicado presentan una buena correlación. De hecho el número de pies es la variable que presenta mayor correlación, mientras que el área basimétrica es la que presenta la menor entre las tres.

Los modelos estadísticos, una vez calculados sobre los datos de las parcelas, fueron aplicados en la zona de estudio para que fuera estimada la biomasa en esta zona. Asimismo, un procedimiento similar se utilizó para estimar el

área basimétrica y el número de pies para todo el espacio analizado.

En este punto cabe recordar que al calcular los modelos en cada una de las celdas, quedan espacios en blanco correspondientes a información corrupta inevitable, inherente a las limitaciones del software FUSION.

3.4 Estimación de la Biomasa

De la obtención de los datos de biomasa resultantes del modelo descrito en el apartado anterior fue generado un mapa utilizando los datos LiDAR (Figura 7).

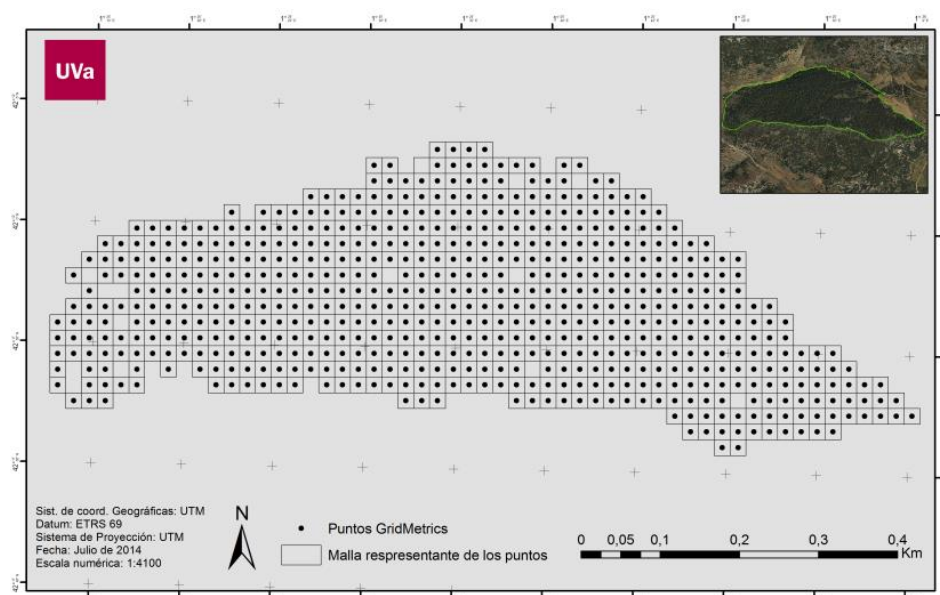


Figura 7 - Cuadrículas con los datos de biomasa de la zona de estudio.

En la Figura 7 cada celda (400 m^2) contiene el valor de biomasa calculado con el modelo. El área total de la zona de estudio resultante de la suma de todas las cuadrículas corresponde a 24,52 ha frente a las 25 ha de partida. Esto se debe a la eliminación de celdas con errores.

Haciendo la suma del valor de biomasa de cada celda se obtiene un valor de biomasa total de la zona de estudio de 3059,76 toneladas. Paralelamente, tomando como base las tres parcelas del inventario y sus respectivos valores de biomasa para las 24, 52 ha se obtiene un valor de 3341,42 toneladas. Se aprecia que son unos valores bastante cercanos si bien el obtenido mediante el modelo calculado a partir de los datos LiDAR es ligeramente inferior. Esto sin

duda se debe a que el modelo calculado a partir de los datos del inventario se calcula sobre toda la zona, sin discriminar partes de bosque donde los árboles son más pequeños o donde incluso no hay vegetación arbórea. De esta forma se constata la importancia de los datos LiDAR en la proyección más fiable del objeto de estudio, ya que el sensor recoge datos de toda la zona de estudio, con distinta cubierta vegetal, mientras que las parcelas del inventario sirven como muestras, tendiendo a homogenizar las informaciones sobre el espacio considerado.

Por lo tanto, la Figura 8 muestra el mapa de la estimación de la biomasa calculada con los datos LiDAR para la zona de estudio.

Al analizar la Figura 8 se puede observar que la concentración de la biomasa (expresa en

toneladas por celda) no se distribuye de manera homogénea en la zona sino que la concentración de los mayores valores se encuentra hacia el centro de la zona, aunque haya áreas con bajos

valores de biomasa. Igualmente es posible percibir que en la zona este, hay una concentración significativa de grandes valores de biomasa.

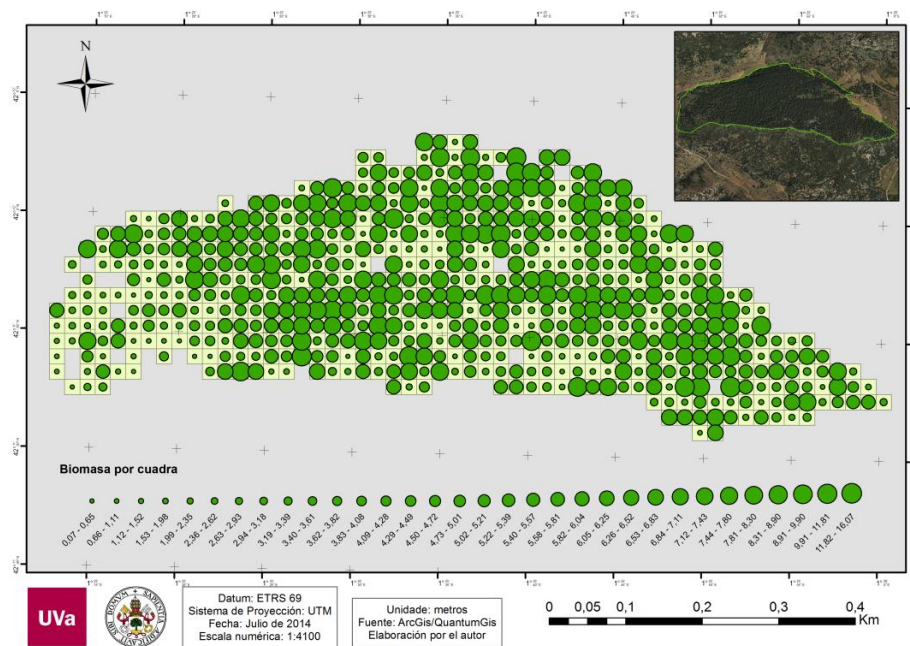


Figura 8 - Mapa de biomasa en la zona de estudio.

3.5 Área Basimétrica

El área basimétrica corresponde al área en metros cuadrados del corte transversal de un árbol a una altura media de 1,30 m.

La Figura 9 representa los mapas del área basimétrica de la zona de estudio. Estos datos están representados por celda.

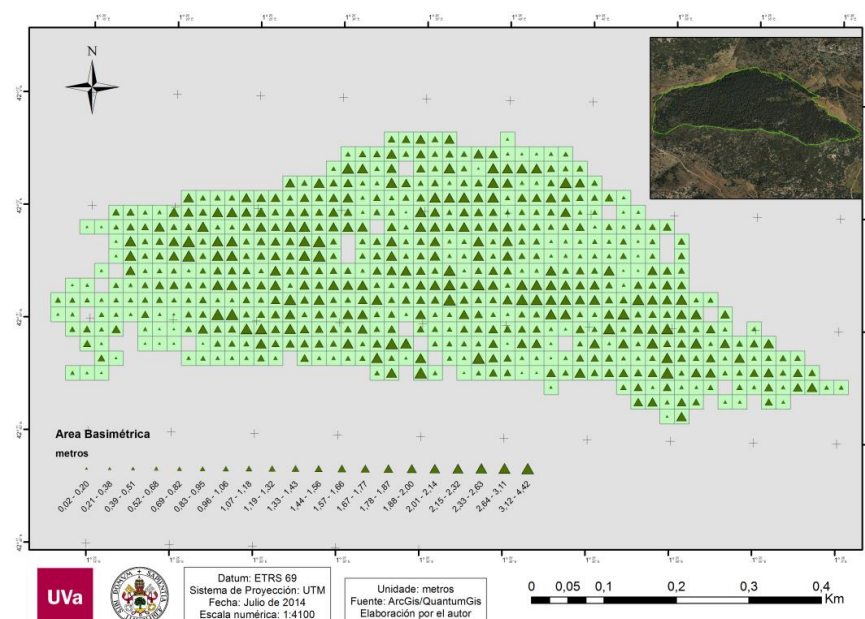


Figura 9 - Mapa del Área Basimétrica de la zona de estudio.

Al analizar la Figura 9 se constata una cierta similitud con el mapa de biomasa,

concentrando las mayores medidas del área basimétrica en la parte central de la zona,

tendiendo ligeramente hacia al oeste. Además se puede observar una concentración de grandes medidas en la porción este, hecho que demuestra una similitud con el mapa de biomasa.

De esta forma, tanto la biomasa como el área basimétrica presentan coherencia con el modelo de dosel de la Figura 7, presentando los mayores valores correspondientes a cada una, en el área central, tendiendo hacia el oeste de la zona, y una “isla” de altos valores en el este de la zona.

Este hecho indica que la altura de la vegetación, la biomasa y el área basimétrica

están directamente relacionadas en este caso, apuntando a que los grandes valores en estas áreas son una respuesta a la presencia de los grandes árboles existentes, al contrario de la existencia de muchos árboles jóvenes o pequeños, los cuales también podrían resultar en grandes valores de biomasa.

3.6 Número de Pies

La Figura 10 presenta el mapa de número de pies, igualmente representados por cuadrícula de 400 m².

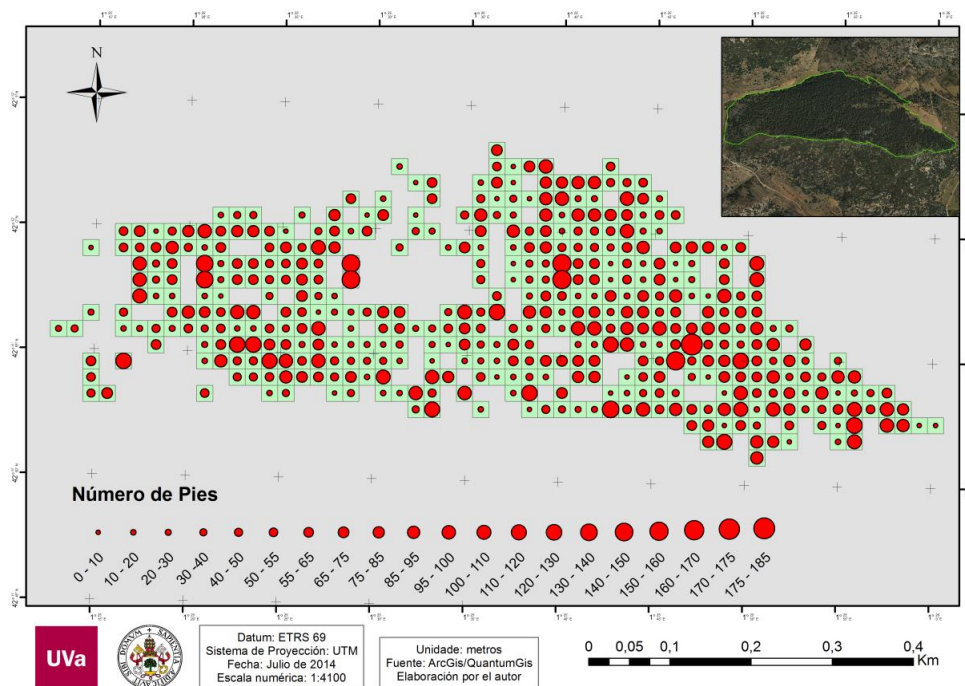


Figura 10 - Mapa del número de pies de la zona de estudio.

La falta de celdas y de elementos cartográficos en una parte del mapa del número de pies, debido a los errores de procesamiento en FUSION, imposibilita establecer una relación clara de esta variable con las demás.

3.7 Datos de Elevación y Fracción Cobierta

Otros parámetros fueron utilizados como apoyo al análisis de la masa forestal, como es el caso de la elevación media y elevación percentil 95, representados respectivamente en las Figuras 11 y 12.

Cada punto presente en los gráficos corresponde al valor de cada celda sobre la zona

de estudio. Aunque se refieran a variables distintas, los dos gráficos se proyectan sobre la misma idea. Así que se puede comprobar que la altura de la masa forestal está directamente relacionada con otras variables. En este contexto Asner et al. (2012) examinaron la efectividad de la altura del media dosel extraída para estimar la biomasa en Panamá, Perú, Madagascar, y Hawái. Igualmente, estudios anteriores hechos por Means et al. (2000) y Popescu et al. (2004) han estimados con éxito la biomasa aérea o volumen del árbol de cálculos estadísticos con los datos LiDAR de altura de vegetación en los bosques boreales y templados.

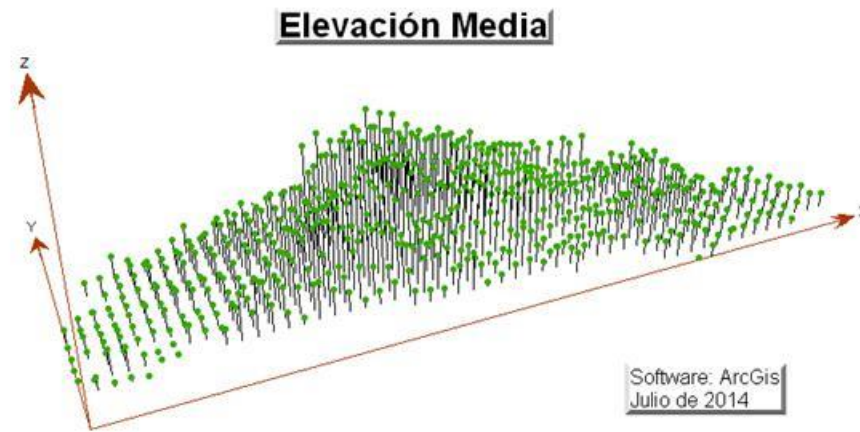


Figura 11 - Gráfico de los valores de elevación media.

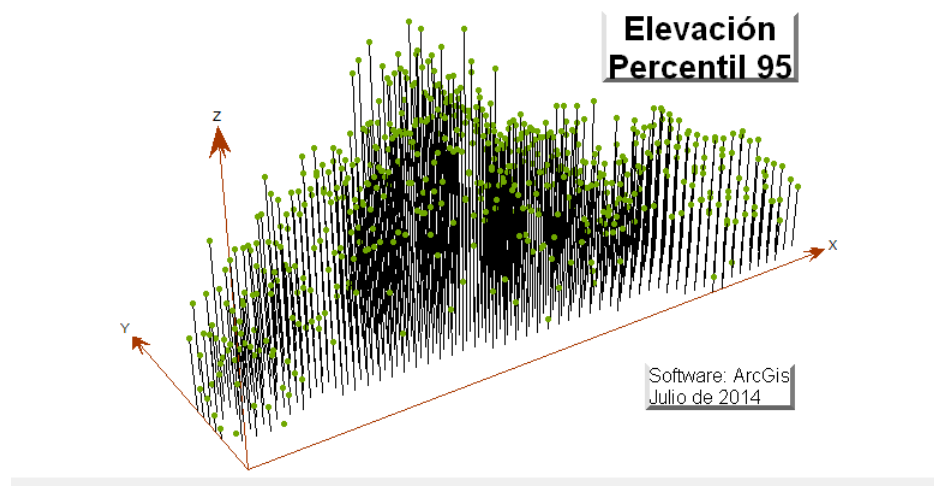


Figura 12 - Gráfico de los valores de elevación Percentil 95.

Cada punto presente en los gráficos corresponde al valor de cada celda sobre la zona de estudio. Aunque se refieran a variables distintas, los dos gráficos se proyectan sobre la misma idea. Así que se puede comprobar que la altura de la masa forestal está directamente relacionada con otras variables. En este contexto Asner et al. (2012) examinaron la efectividad de la altura del media dosel extraída para estimar la biomasa en Panamá, Perú, Madagascar, y Hawai. Igualmente, estudios anteriores hechos por Means et al. (2000) y

Popescu et al. (2004) han estimados con éxito la biomasa aérea o volumen del árbol de cálculos estadísticos con los datos LiDAR de altura de vegetación en los bosques boreales y templados.

La Figura 13 se corresponde a la representación gráfica de la aplicación del parámetro Fracción Cobertura Cubierta en la zona de estudio.

La Fracción de Cobertura Cubierta (FCC) hace referencia al porcentaje de la superficie horizontal cubierta por la proyección de las copas (García, 2010).

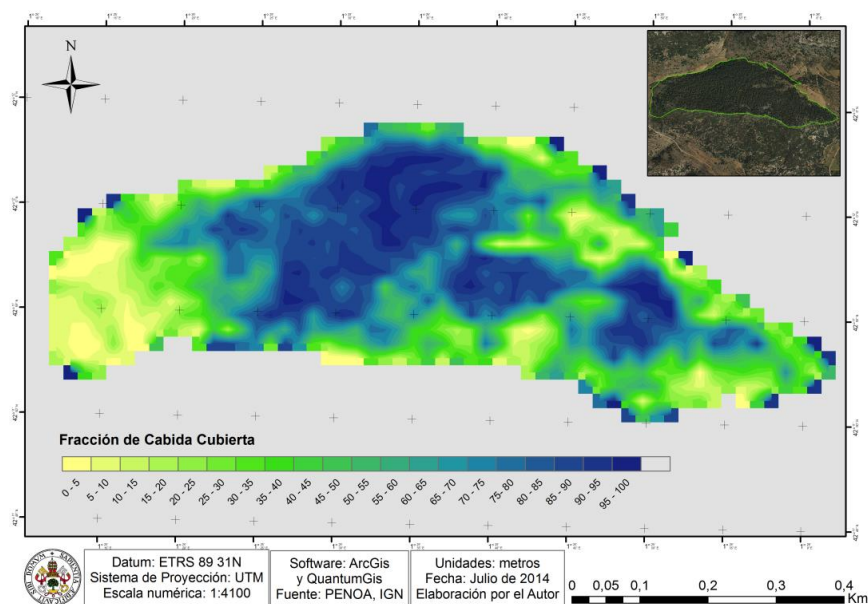


Figura 13 - Mapa de Fracción de Cuida Cubierta.

De esta forma, en consonancia con la biomasa, área basimétrica y las informaciones de altura, la FCC presentan los mayores valores en el área central, tendiendo hacia el oeste de la zona, además de mostrar un fragmento de valores altos en la porción más oriental. La FCC presenta un gran contraste entre sus valores, representando de forma muy nítida la situación de la masa forestal en estudio.

4. Conclusiones

El Modelo Digital del Superficies generado fue crucial para la secuencia y éxito de los cálculos con los demás parámetros. De la misma forma el Modelo de Dosel se ha presentado como un buen producto para analizar la estructura de la masa forestal, ya que diferencia claramente los valores de altura entre los árboles.

Los datos LiDAR relacionados con datos de los inventarios forestales, se muestran extremadamente útiles, teniendo en cuenta los resultados estadísticos. En este sentido los modelos estadísticos generados sobre los datos LiDAR presentaron una buena correlación con los datos del inventario, con coeficientes de determinación superiores al 0,9. Asimismo cumplen con las condiciones de heterocedasticidad, linealidad, normalidad y valores atípicos.

Los modelos obtenidos aportan una información más completa de la zona de estudio, en consecuencia, los productos cartográficos presentan un buen resultado, ya que fueron coherentes entre sí, con la ortofotografía. Además de integrar las informaciones importantes obtenidas en este estudio.

Si bien el software FUSION es potente y de acceso libre presenta todavía errores a la hora de implementar sus algoritmos.

Por fin la tecnología LiDAR aporta la investigación forestal una serie de aplicaciones, de orden dasométrica y/o dendrometría, necesarias para una efectiva gestión de los bosques. Además de la ventaja que tiene frente a otros métodos más convencionales, en cuanto a su precisión, temporalidad y barrido, que son de gran utilidad en un contexto de urgencia de resultados fiables en el escenario actual de cambio climático y vulnerabilidad de los ecosistemas.

Agradecimientos

A Dios. Al Dr. Salvador Hernández, mi tutor en España, Luis Fernando, mi director de tesis, A las profesoras Dra Maria Fernanda Abrantes y Dra Josiclêda Galvâncio Torres por la orientación e apoyo. A la Universidad Federal de Pernambuco y A la Universidad de Valladolid, por la estructura, material y equipo. Al Banco

Santander de España, por la beca y al ICE. Al SERGEO.A Amparo Gilces Reyna.

Referencias

- Asner, G.P., Mascaró, J., Muller-Landau, H.C., Vieilledent, G., Vaudry, R., Rasamoelina, M., Hall, J.S., Van Breugel, M., 2012. A universal airborne LiDAR approach for tropical forest carbon mapping. *Oecologia* 168, 1147–1160.
- Boyd, D.S., Danson, F.M., 2005. Satellite remote sensing of forest resources: three decades of research development. *Progress in Physical Geography* 29, 1-26.
- Bravo, F., Del Río, M., Pando, V., San Martín, R., Montero, G., Ordoñez, C.Y., Cañellas, I., 2002. El diseño de las parcelas del Inventario Forestal Nacional y la estimación de variables dasométricas, in: Bravo, F. et al. (Eds.). *El Inventario Forestal Nacional Elemento Clave para la Gestión Forestal Sostenible*. Fundación General de la Universidad de Valladolid, Valladolid, pp. 19-35.
- Brown, S., 2002. Measuring carbon in forests: current status and future challenges. *Environmental Pollution* 116, 363-372.
- Canadell, J.G., Raupach, M.R., 2011. Future of the terrestrial carbon sink, in: Richardson K.S., Steffen, W.L., Liverman, D. (Eds.). *Climate Change: global risks, challenges and decisions*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 90-91.
- Cuasante, D., García, C., 2009. Estimación de recursos forestales con tecnología LIDAR aerotransportada. Aplicación práctica en varios montes de la Provincia de Burgos. V Congreso Forestal Español.
- Dubayah, R.O., Drake, J.B., 2000. LiDAR remote sensing for forestry. *Journal of Forestry* 98, 44-46.
- FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2010. *El Estado de los bosques del mundo. Bosques, actividad forestal y productos forestales para un futuro sostenible*. Roma. pp. 26-46.
- Gao B.C., 1996. NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment* 58, 257-266.
- García, J. M., Allué, C., 2010. Effects of climate change on the distribution of *Pinus sylvestris* L. stands in Spain. A phytoclimatic approach to defining management alternatives. *Forest Systems* 19, 329-339.
- García, D.G., 2011. Estimación de variables de interés forestal basadas en datos LiDAR en el monte número 117 del c.u.p término municipal de Cuenca. Trabajo fin de carrera. Universidad de Madrid.
- Holmgren, T., 1998. Satellite remote sensing for forestry planning. *Scandinavian Journal of Forest Research* 13, 90-110.
- IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007. *Climate Change 2007: Climate Change Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Working Group II Contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report. Cambridge University Press, Cambridge.
- Lefsky, M.A., Cohen, W.B., Parker, G.G., Harding, D.J., 2002. Lidar remote sensing for ecosystem studies. *BioScience* 52, 19-30.
- Lindner, M., Maroschek, M., Netherer, S., Kremer, A., Barbati, A., García-Gonzalo, J., Seidl, R., Delzon, S., Corona, P., Kolstrom, M., Lexer, M.J., Marchetti, M., 2010. Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *Forest Ecology and Management* 259, 698-709.
- Mallet, C., Bretar, F., 2009. Full-waveform topographic lidar: state-of-the-art. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 64, 1-16.
- Means, J.E., Acker, S.A., Fitt, B.J., Renslow, M., Emerson, L., Hendrix, C.J., 2000. Predicting forest stand characteristics with airborne scanning LiDAR. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 66, 1367-1371.
- Moisés, J., Ibáñez, M., Rodríguez, R., 2004. Estudi climatològic de la Vall d'Alinyà, in: *Els Sistemes Naturals de la Vall d'Alinyà*. Institució Catalana d'Història Natural, Barcelona, pp. 17-45.
- Montero G., Ruiz-Peinado, R., Muñoz, M., 2005. Producción de biomasa y fijación de CO₂ por los bosques españoles. Monografías INIA, Madrid. (Serie Forestal, 13).
- Montero, G., Muñoz, M., Donés, J., Rojo, A., 2004. Fijación de CO₂ por *Pinus sylvestris* L. y *Quercus pyrenaica* Willd. en los montes

- “Pinar de Valsain” y “Matas de Valsain”. Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales 13, 399-416.
- Netherer S., Schopf, A., 2010. Potential effects of climate change on insect herbivores in European forests - General aspects and the pine processionary moth as specific example. Forest Ecology and Management 259, 831-838.
- OSE, 2011. Biodiversidad en España. Base de la Sostenibilidad ante el cambio global. 5.
- Ponzoni, F.J., Shimabukuro, Y.E., 2009. Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação. Parêntese, São José dos Campo.
- Popescu, S.C., Wynne, R.H., Scrivani, J.A., 2004. Fusion of small-footprint LiDAR and multispectral data to estimate plot-level volume and biomass in deciduous and pine forests in Virginia, USA. Forest Science 50, 551-565.
- Rengifo, M., Puentes, Y.M., 2007. Penetración de la señal del sistema ALS40 LiDAR aerotransportado en la cobertura vegetal presente en las islas: La Viciosa y El Morro. Boletín Científica CCCP 14, 95-108.
- Reutebuch, S.E., Andersen, H., Mcgaughey, R.J., 2005. Light detection and ranging (LiDAR): an emerging tool for multiple resource inventory. Journal of Forestry 103, 286-292.
- Riaño, D., Chuvieco, E., Condés, S., González-Matesanz, J., Ustin, S.L., 2004. Generation of crown bulk density for *Pinus sylvestris* L. from lidar. Remote Sensing of Environment 92, 345-352.
- Sanchez Peña, G., Martinez-Saavedra, J., 2001. Proceso de contabilización de los sumideros de CO₂ en los sistemas forestales españoles. Cuadernos de la SECF 12, 29-34.

ANEXO

SOFTWARES:

- 3D GeoData Viewer FugroViewer. Visor de datos LiDAR. Copyright © Fugro. Available: <http://www.fugroviewer.com>. Access: mar., 20, 2014.
- ArcGIS® software by Esri. ArcGIS® and ArcMap™ are the intellectual property of Esri and are used herein under license. Copyright © Esri. All rights reserved. Available: www.esri.com. Access: mar., 20, 2014.
- McGaughey R J 2008 *FUSION/LDV: Software for LiDAR Data Analysis and Visualization (Portland, OR: USDA, Forest Service, Pacific Northwest Research Station)*. Available: <http://forsys.cfr.washington.edu/>. Access: mar., 20, 2014.
- Martin Isenburg, LAStools - efficient tools for LiDAR processing. version 111216. Available: <http://lastools.org>. Access: mar., 20, 2014.
- QuantumGIS Development Team, <2013>. Quantum GIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. Available: <http://qgis.osgeo.org>. Access: mar., 20, 2014.
- R Development Core Team (2008). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0. Available: <http://www.R-project.org>. Access: mar., 20, 2014.