

**Empleo  
de la tecnología LiDAR para el seguimiento  
ecológico: aplicación piloto para la Red de  
Parques Nacionales y comparativa con los  
datos LiDAR del PNOA**

---





# Empleo de la tecnología LiDAR para el seguimiento ecológico: Aplicación piloto en la Red de Parques Nacionales

<b>1. Introducción .....</b>	<b>5</b>
<b>2. La tecnología LiDAR.....</b>	<b>6</b>
2.1 Principios de la tecnología LiDAR.....	6
2.2 Clasificación de los sensores LiDAR.....	9
2.3 Fuentes de datos LiDAR .....	10
<b>3. El empleo de la tecnología LiDAR en la Red de Parques Nacionales: El caso piloto del Parque Nacional de Monfragüe.....</b>	<b>11</b>
3.1 Proceso de obtención de los productos LiDAR .....	11
3.1.1 <i>Ejecución del vuelo LiDAR</i> .....	11
3.1.2 <i>Procesado de los datos brutos</i> .....	12
3.1.3 <i>Control de calidad</i> .....	13
3.1.4 <i>Datos brutos: ficheros *.LAS</i> .....	14
3.1.5 <i>Modelos</i> .....	14
3.1.5.1 <i>Modelo digital de superficies (MDS)</i> .....	14
3.1.5.2 <i>Modelo digital de terreno (MDT)</i> .....	15
3.1.5.3 <i>Modelo digital de vegetación (MDV)</i> .....	15
3.1.5.4 <i>Modelo digital de edificaciones (MDEd)</i> .....	16
3.2 Explotación de datos LiDAR .....	17
3.2.1 <i>Variables de vegetación</i> .....	17
3.2.2 <i>Obtención de información sobre variables</i> .....	18
3.2.3 <i>Apoyo a la fotointerpretación</i> .....	21
<b>4. Comparación del vuelo propio realizado en Monfragüe con el vuelo de PNOA....</b>	<b>24</b>
4.1 LiDAR PNOA: Datos .....	26
4.2 Trabajo y análisis realizados .....	28
4.3 Resultado de la comparativa LIDAR PNOA vs LIDAR propio .....	36
4.3.1 <i>Comparación de análisis estadístico de parámetros de vegetación</i> .....	36
4.3.2 <i>Valoración de los modelos de altura de vegetación generados a partir de los datos Lidar</i> 40	
4.4 CONCLUSIONES.....	41
4.5 ANEXO. Imágenes comparación LiDAR.....	42
<b>5. Referencias bibliográficas.....</b>	<b>69</b>

## **1. INTRODUCCIÓN**

En la actualidad se encuentra en fase de discusión y diseño el Plan de Seguimiento de la Red de Parques Nacionales, que busca establecer y desarrollar las metodologías básicas para la realización de un seguimiento del estado y la evolución de los sistemas naturales en la misma.

En este marco, la utilización de la tecnología LiDAR se considera una oportunidad para la obtención de información de forma remota y automática sobre el estado de los ecosistemas. Es por ello que de cara a la puesta en práctica del Plan de Seguimiento, y buscando que las metodologías finalmente incluidas en el mismo hayan sido probadas y validadas con anterioridad, se ha realizado una experiencia piloto de vuelo LiDAR en el Parque Nacional de Monfragüe.

El objetivo de este documento es presentar los resultados obtenidos a partir de la experiencia realizada en el Parque Nacional de Monfragüe, y comparar los resultados obtenidos con los proporcionados por el PNOA.

## 2. LA TECNOLOGÍA LIDAR

### 2.1 Principios de la tecnología LiDAR

LiDAR es el acrónimo para Light Detection and Ranging. Se trata de un sistema activo de teledetección, es decir, utiliza su propia fuente de energía, y se basa en el mismo principio básico utilizado por la tecnología radar, aunque empleando energía láser en vez de energía emitida en la región de microondas. Su principio de funcionamiento es relativamente sencillo pues un sensor LiDAR mide el intervalo de tiempo transcurrido entre la emisión de un pulso láser y la recepción de un eco o retorno después de que dicho pulso láser incida sobre un objeto situado sobre la superficie terrestre. La determinación de la distancia entre el emisor y el receptor se realiza midiendo el tiempo transcurrido entre la emisión de un pulso ( $t_0$ ) y la detección de la señal reflejada ( $t_1$ ).

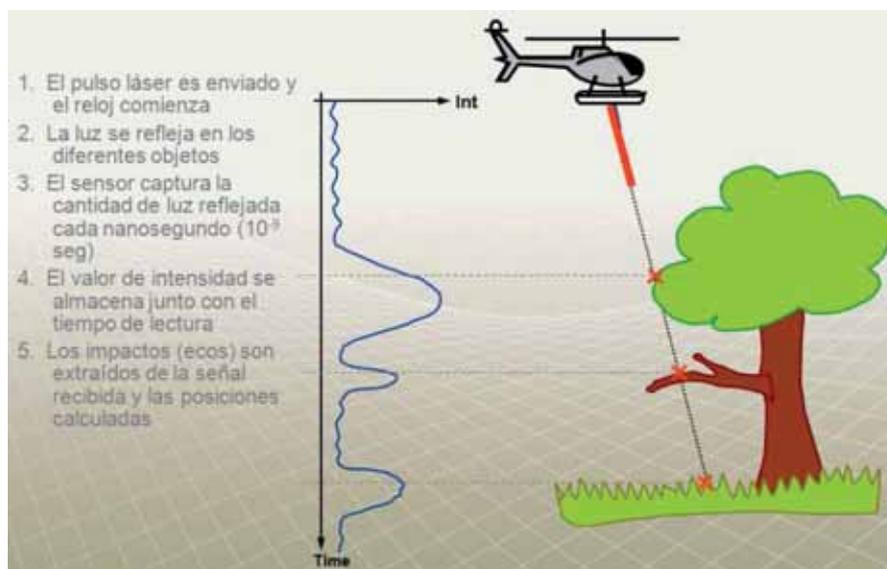


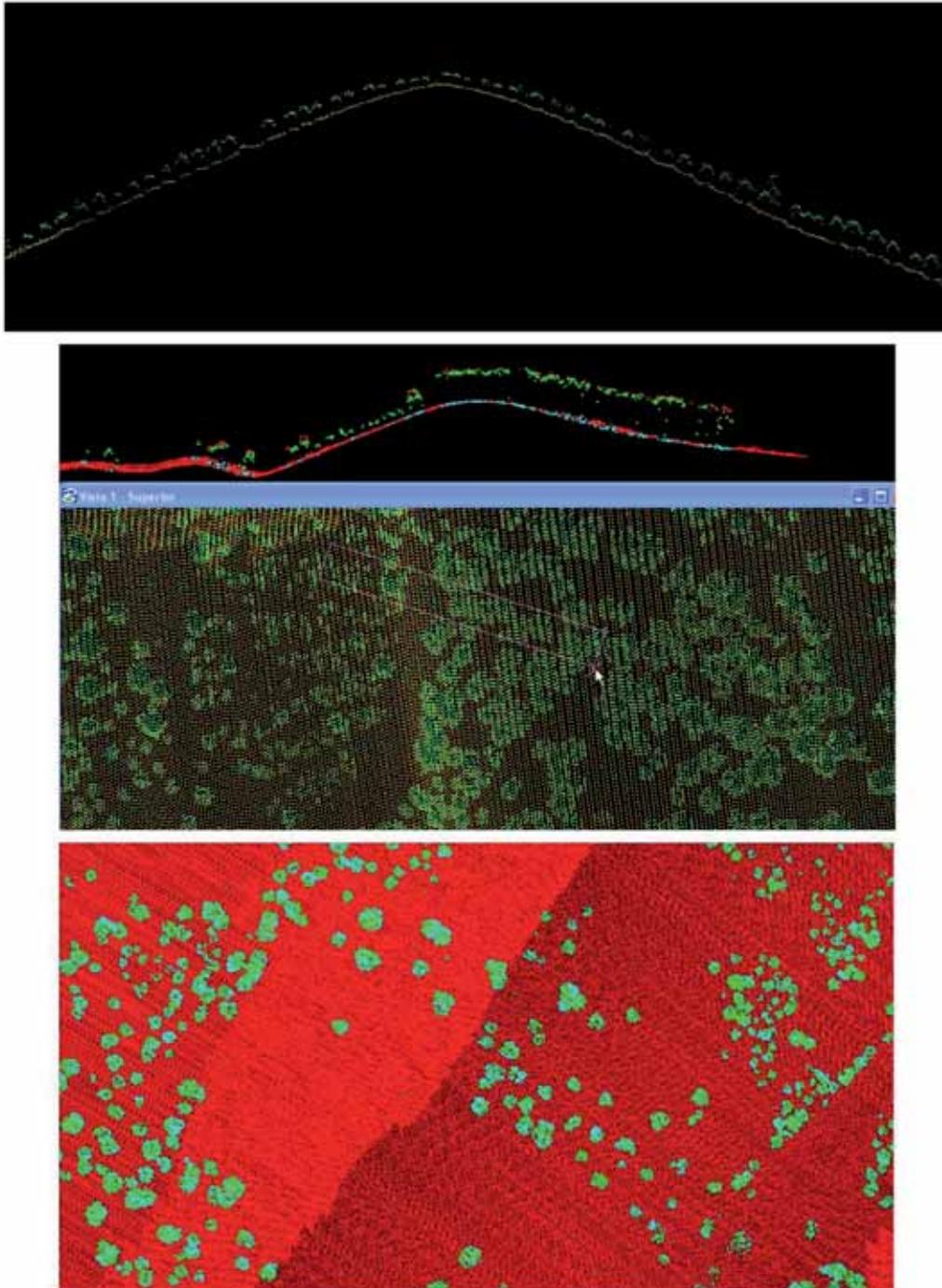
Figura 1: Funcionamiento del sistema LiDAR

El cálculo de la distancia cumple con la siguiente ecuación, donde la velocidad de propagación de la onda es un dato conocido por construcción y los tiempos de emisión y recepción de la señal son parámetros observables:

$$D = \frac{\text{VelocidadOnda} \cdot (t_1 - t_0)}{2}$$

Si se conoce la posición absoluta del punto de emisión y el ángulo de inclinación con el que se emite el pulso, se podrá determinar la posición espacial del objeto radiado. Esta posibilidad de obtener la posición espacial de los puntos radiados hace que esta tecnología adquiera un interés muy grande para las ciencias de observación de la tierra.

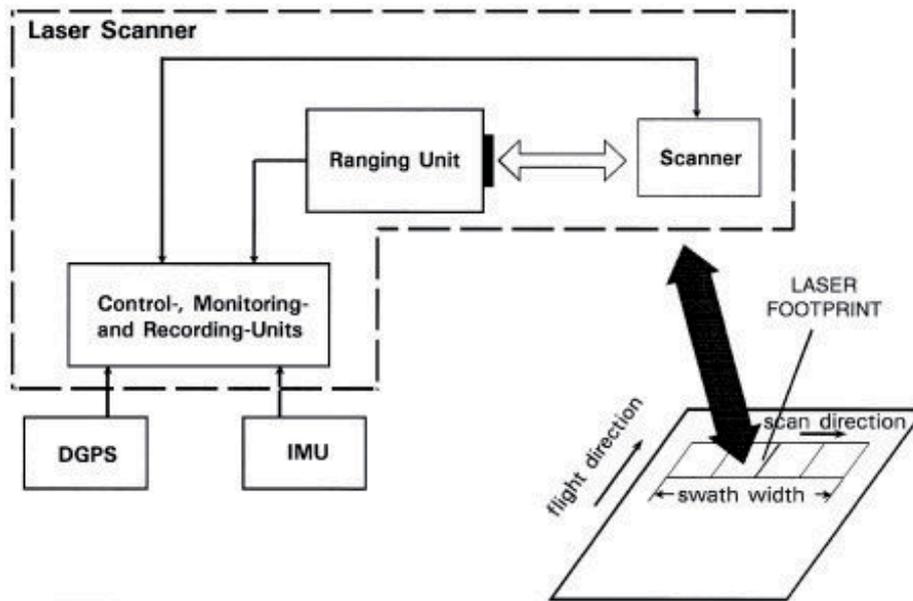
Basándose en este principio de medida, los sistemas LiDAR son capaces de generar una densa nube de puntos en 3 dimensiones que permiten describir detalladamente la superficie del terreno escaneado por el sensor.



**Figura 2:** Nubes de puntos obtenidas con el vuelo propio del Parque Nacional de Monfragüe

Para calcular las coordenadas (X, Y, Z) del punto donde se refleja el pulso láser emitido es necesario combinar la información proporcionada por los siguientes sub-sistemas que componen el sistema LiDAR:

- Unidad de medida de distancias láser
- Escáner y la unidad de control
- Procesamiento.



**Figura 3:** Componentes de un sistema LiDAR

La unidad de medida de distancias comprende el emisor láser y el receptor electro-óptico, los cuales comparten el mismo camino óptico asegurando así que el objeto iluminado por el láser está dentro de campo de visión (Field Of View- FOV) del receptor. Normalmente el escáner distribuye el rayo láser de manera perpendicular a la dirección de vuelo mientras que la segunda dimensión se realiza por el movimiento del avión. Por su parte, la unidad de control y procesamiento incluye el sub-sistema formado por el sistema de posicionamiento global y la unidad de medida inercial (GPS/IMU), lo que permite determinar la posición y orientación del sensor. Los distintos sub-sistemas que componen el sistema LiDAR producen, de manera asíncrona, un conjunto de datos que son marcados con el tiempo de adquisición y son posteriormente almacenados por la unidad de control y procesamiento. Los datos de cada una de estas fuentes son enlazados posteriormente utilizando dichas marcas durante la fase de post-proceso para obtener las coordenadas X, Y, Z del punto.

Las propiedades físicas de los sistemas LiDAR se caracterizan por los siguientes parámetros: la longitud de onda del láser ( $\mu\text{m}$ ), la duración del pulso (ns), la energía del pulso ( $\mu\text{J}$ ), la velocidad de emisión de pulsos (kHz), la anchura del pulso (mrad), el ángulo de escaneo (deg), la velocidad de escaneo (Hz), la altura de vuelo (m) y el tamaño de la huella sobre el terreno (m).

Como se mencionó con anterioridad, como resultado de la técnica se obtiene una nube de puntos. Previa a su utilización, se requiere un trabajo de procesamiento y depuración. Con la nube de puntos procesada se pueden generar distintos modelos digitales de superficies (del terreno, la vegetación, edificaciones,...), a partir de los cuales se puede extraer información de interés sobre los sistemas naturales.

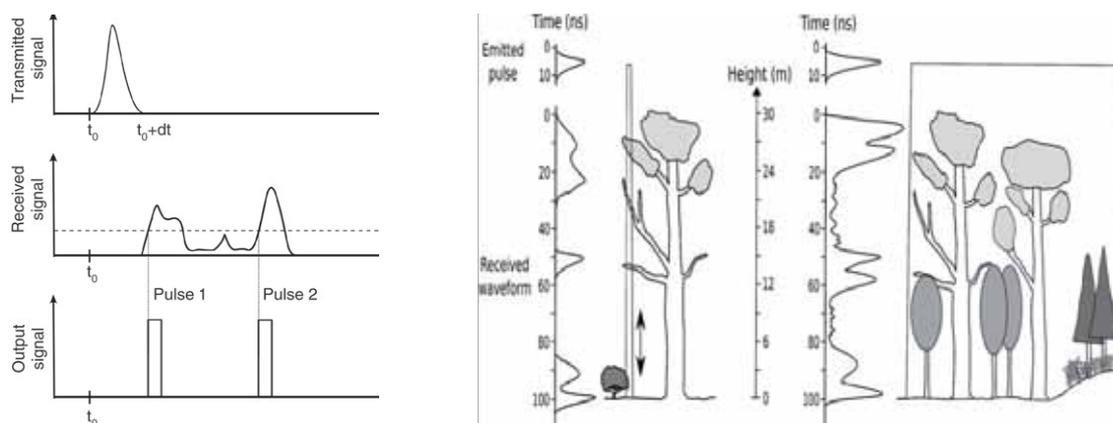
## 2.2 Clasificación de los sensores LiDAR

La clasificación de los sensores LiDAR puede hacerse atendiendo a varios criterios. Así, un primer criterio clasifica los sensores en función del tipo de superficie a medir, considerando sensores topográficos, sensores batimétricos y sensores atmosféricos. Los primeros suelen operar en la región del infrarrojo cercano (700-1300 nm) mientras que los empleados para aplicaciones batimétricas o atmosféricas se emplean sistemas que trabajan con dos longitudes de onda, una en el infrarrojo cercano y otra en la región del verde (500-600 nm).

De acuerdo al principio de medida de distancias empleado, podemos considerar dos grupos en función del método empleado para determinar el tiempo transcurrido entre la emisión de un pulso y su retorno. El primer método, más directo, consiste en medir el tiempo transcurrido desde la emisión de un pulso hasta su recepción mediante relojes ultra-precisos, y es empleado por la mayoría de los sistemas comerciales. El segundo se basa en determinar la diferencia de fase entre el pulso emitido y el recibido. En este caso el tiempo empleado por el pulso en recorrer la distancia sensor-objeto es directamente proporcional a la diferencia de fase observada.

Un tercer criterio para clasificar los sistemas LiDAR es en base a la plataforma sobre la que va instalado el sensor. Así por ejemplo, podemos encontrar sistemas terrestres, sistemas aeroportados y sistemas a bordo de satélite. Más recientemente, se han desarrollado sistemas montados sobre vehículos denominados sistemas LiDAR móviles (VLS). Estos sistemas son una variación de los sistemas terrestres, montados sobre vehículos, vagones o furgonetas, lo que les proporciona más flexibilidad.

El cuarto criterio para clasificar los sistemas LiDAR se basa en las capacidades de registro de los sistemas. Siguiendo este criterio, podemos clasificar los sistemas en sensores discretos y sensores de huella continua (figura 2). El primer grupo graba retornos discretos (primeo y último, o retornos múltiples - hasta 5) por cada pulso emitido, mientras que el segundo grupo de sensores digitizan toda la energía que es devuelta hacia el sensor por los distintos objetos situados en el camino óptico del pulso emitido.



**Figura 4:** Izquierda: señal emitida y recibida (primer y último retorno) para un sensor discreto.

Centro: Onda digitizada en una zona arbolada utilizando un sistema de huella pequeña.

Derecha: Onda digitizada para un sistema de huella grande

De acuerdo al tamaño de la huella, podemos clasificar los sensores como sistemas de huella pequeña (varios centímetros), y sistemas de huella grande (hasta varios metros). El tamaño de la huella es un parámetro crítico que determina el área de muestro del sobre el terreno o lo que es lo mismo la proyección sobre el terreno del campo instantáneo de visión (Instantaneous Field Of View –IFOV) del sensor, esto es, la resolución.

### **2.3 Fuentes de datos LiDAR**

Para obtener datos LiDAR del territorio de la Red de Parques Nacionales se puede recurrir a dos fuentes: bien a la realización de vuelos propios, bien a los vuelos realizados como parte del PNOA (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea), aún no disponibles para todo el territorio nacional (ver siguiente figura). El uso de uno u otro dato también responde a objetivos diferentes y tiene distintas características y aplicaciones en el Plan de Seguimiento de la RPPNN.

El LiDAR del PNOA es un producto gratuito, con una densidad de 0,5 puntos por metro cuadrado. Su precisión altimétrica es de 20 cm. Se distribuye en ficheros \*.LAS en cuadrados UTM de 2 x 2 km, utilizando como sistema geodésico de referencia ETRS89.

En la actualidad, el LiDAR PNOA está totalmente procesado pero no se ha realizado una clasificación de la nube de puntos. Se puede trabajar directamente con los datos de intensidad procedentes de ellos pero para otros aprovechamientos se requiere una labor de preparación de los datos. La realización de un vuelo propio permite contar con un vuelo de mayor densidad de puntos, totalmente procesado, mediante una inversión.

### **3. EL EMPLEO DE LA TECNOLOGÍA LIDAR EN LA RED DE PARQUES NACIONALES: EL CASO PILOTO DEL PARQUE NACIONAL DE MONFRAGÜE**

Como parte del desarrollo del Plan de Seguimiento de la Red de Parques Nacionales y de su programa de seguimiento ecológico, se ha encontrado adecuado establecer una metodología de aprovechamiento de datos LiDAR, que permita obtener información del estado de los ecosistemas dentro de la Red. Como prueba piloto, para desarrollar y validar la metodología y con objeto de realizar una comparación con los datos PNOA, se realizó un vuelo LiDAR del Parque Nacional de Monfragüe.

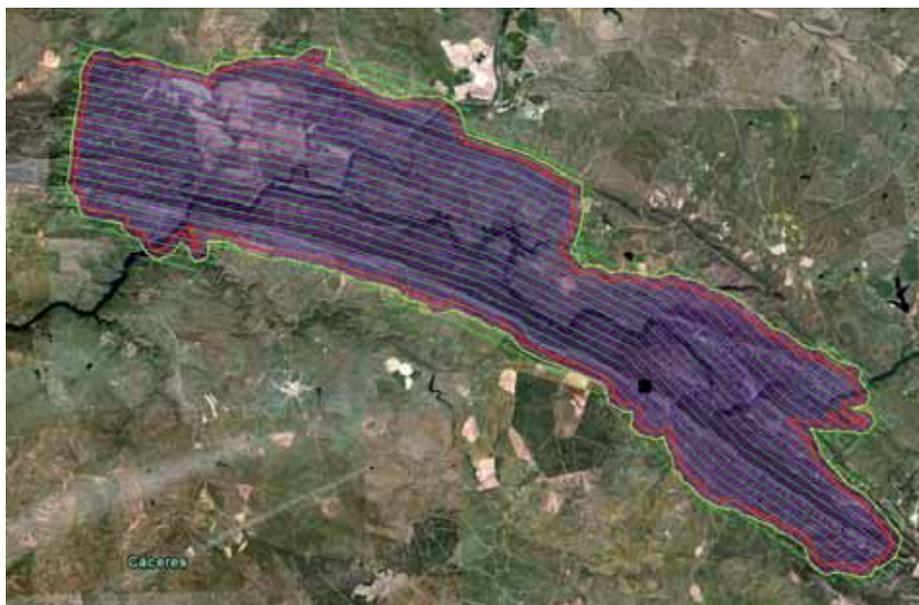
#### **3.1 Proceso de obtención de los productos LiDAR**

El proceso de obtención de los productos LiDAR ha constado de dos partes. Primero, se obtuvieron los datos brutos mediante un vuelo LiDAR, que se combinó además con la obtención de un producto ortofotográfico gracias a un vuelo fotogramétrico. Posteriormente, los datos brutos obtenidos se sometieron a un procesamiento y a un control de calidad, con objeto de obtener los productos definitivos. Para la realización de todo este proceso se contrató a la empresa BLOM S. L., con amplia experiencia en la realización de vuelos LiDAR.

##### **3.1.1 Ejecución del vuelo LiDAR**

Se realizaron dos vuelos LiDAR con diferentes características. Primero se realizó un vuelo general con una densidad de 5 pto/m<sup>2</sup>, que incluyó toda la superficie del Parque y un buffer a su alrededor de 300 metros. Posteriormente, se realizó un vuelo de detalle sobre una zona al sureste del Parque, con una densidad de 40 pto/m<sup>2</sup>. Para la realización de ambos vuelos, entre los días 12, 14 y 15 de Noviembre de 2010, se utilizó un helicóptero Eurocopter Ecureuil AS350 B2, con un sensor TopEye MKIII S/N 700.

Para el vuelo de 5 pto/m<sup>2</sup> se diseñó el siguiente plan de vuelo:



**Figura 2:** Plan de vuelo a 5 pto/m<sup>2</sup>

El vuelo realizado incluyó tres pasadas transversales respecto a las líneas de toma de datos, con el objetivo de controlar la calidad del vuelo y a su vez mejorar la calidad de los datos

durante el procesado. Todas las líneas de toma de datos están atravesadas por una pasada transversal.

Para el vuelo de 40 pto/m<sup>2</sup> se diseñó el siguiente plan de vuelo:



**Figura 3:** Zona de detalle sobrevolada para obtener un producto LiDAR de 40 pto/m<sup>2</sup>

### **3.1.2 Procesado de los datos brutos**

Para producir los ficheros de salida es necesario procesar datos procedentes de distintas fuentes. Estas fuentes de datos incluyen al láser, información de la orientación del helicóptero (IMU) e información de los receptores GPS, tanto el/los de tierra como el del helicóptero. A continuación se nombran los pasos básicos a seguir para realizar el procesado básico LiDAR y la generación de los Modelos de Elevaciones:

- Decodificación de los datos y pre-procesado GPS.
- Posicionamiento GPS.
- Procesado IMU.
- Generación de la trayectoria del helicóptero.
- Creación del archivo de datos láser \*.LAS.
- Calibración y matching de las trayectorias.
- Correcciones en altura utilizando datos de campo.
- Búsqueda y eliminación de puntos no válidos.
- Edición de puntos LiDAR y clasificación de datos LiDAR.
- Generación de estadísticas de precisión y calidad de los datos LiDAR.
- Edición básica de datos LiDAR y corrección de errores. Clasificación de puntos LiDAR.
- Inserción de líneas de ruptura.
- Generación de MDT, MDS.

- Creación de los ficheros de salida.

Los datos brutos del vuelo consisten en una nube de puntos, cada uno a una altura distinta. Esta nube se trata para corregir los datos de altura y posicionamiento, teniendo en cuenta los datos del GPS, de la trayectoria del helicóptero y del sistema inercial. Posteriormente, se procede a la clasificación automática de cada uno de sus puntos según lo establecido por la clasificación LAS estándar 1.1.

<b>Código</b>	<b>Clase</b>
0	Creado, no clasificado
1	Sin clasificar
2	Suelo
3	Vegetación baja (< 0,4 m)
4	Vegetación media (0,4 – 2 m)
5	Vegetación alta (> 2 m)
6	Edificios
7	Puntos bajos (ruido)
8	Model Key-point
9	Agua
10	Reservado para definición ASPRS
11	Reservado para definición ASPRS
12	Puntos superpuestos
13-31	Reservado para definición ASPRS

Esta clasificación se corrige semiautomáticamente, para detectar y reparar posibles errores, obteniéndose el archivo \*.LAS definitivo. Los modelos digitales se obtienen a partir de la interpolación de las nubes de puntos de estos archivos y seleccionando las clases LAS que intervienen en cada modelo digital, según corresponda.

### **3.1.3 Control de calidad**

Todos los productos obtenidos se sometieron a dos procesos de control de calidad distintos, uno llevado a cabo por BLOM y otro por TRAGSATEC. Se buscó asegurar de este modo que el resultado obtenido fuera el mejor posible. Una vez finalizada esta fase de control de calidad, se concluyó que los productos entregados tenían la calidad suficiente para poder realizar las fases posteriores del proyecto.

Como resultado de los vuelos y del procesamiento de los datos captados durante los mismos se obtuvieron una serie de productos, que incluye tanto los datos brutos, como los productos derivados. A continuación se van a describir los productos más importantes comprendidos.

### 3.1.4 Datos brutos: ficheros \*.LAS

Los ficheros \*.LAS almacenan los puntos obtenidos a través del vuelo LiDAR clasificado según el estándar 1.1 para ficheros LAS. A partir de este producto y según el software empleado para su explotación, se pueden obtener vista 3D de la nube de puntos y realizar perfiles de la zona.

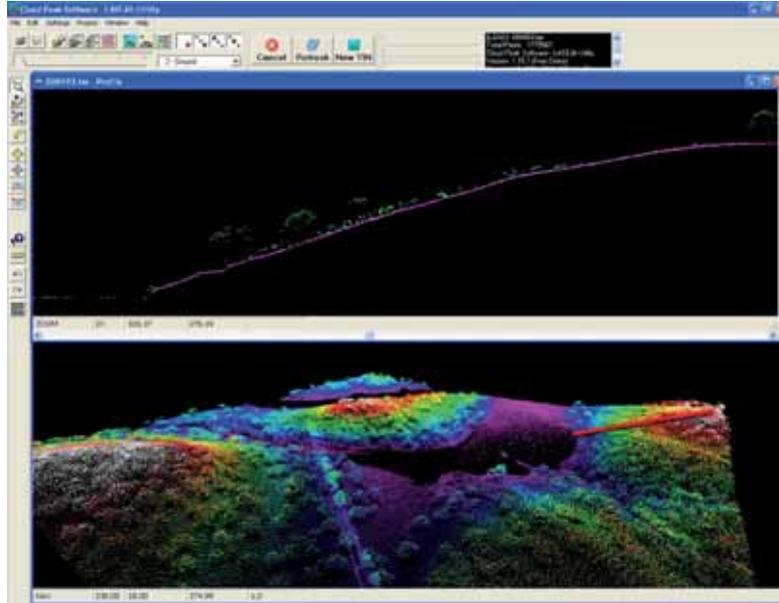


Figura 4: Visualización en tres dimensiones y mediante un perfil de un fichero \*.LAS

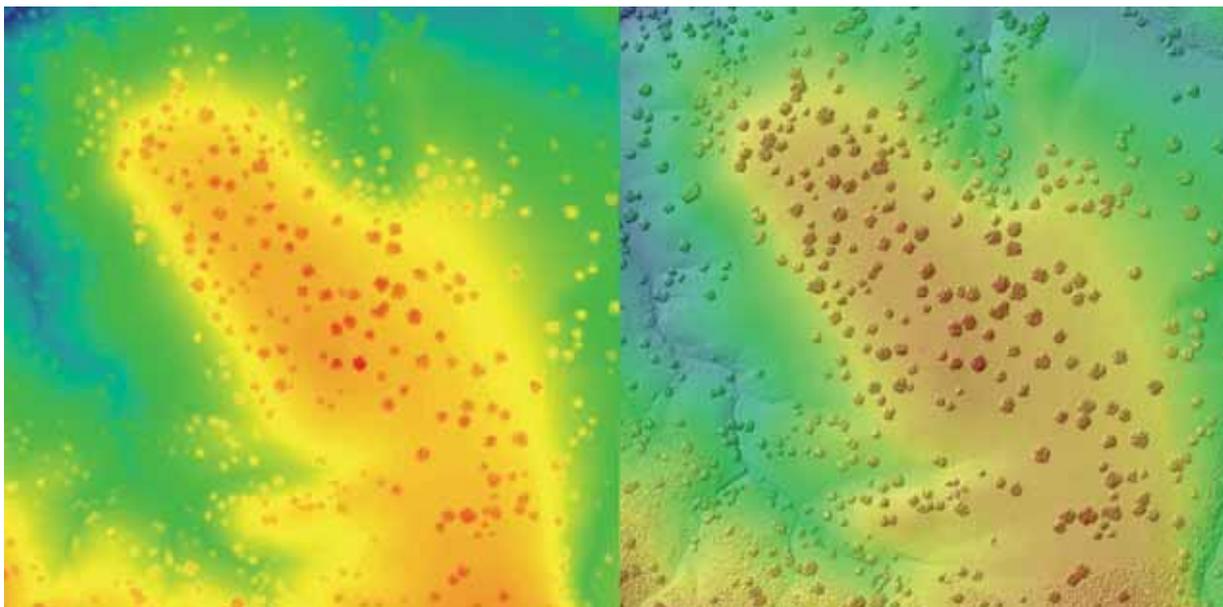
Por las propiedades del LiDAR, el pulso de luz permite obtener datos de elevación bajo la cubierta vegetal, con precisión de centímetros, y gran resolución, por lo que los ficheros LAS que almacenan todos los datos capturados son un producto de gran potencial para analizar la estructura y los estratos inferiores de la vegetación.

### 3.1.5 Modelos

Los modelos representan la altura de distintas superficies, generados a partir de la interpolación de los puntos obtenidos durante el vuelo LiDAR. Cada uno de los modelos viene determinado por clase de puntos que se utiliza para su generación, dentro de la clasificación realizada.

#### 3.1.5.1 Modelo digital de superficies (MDS)

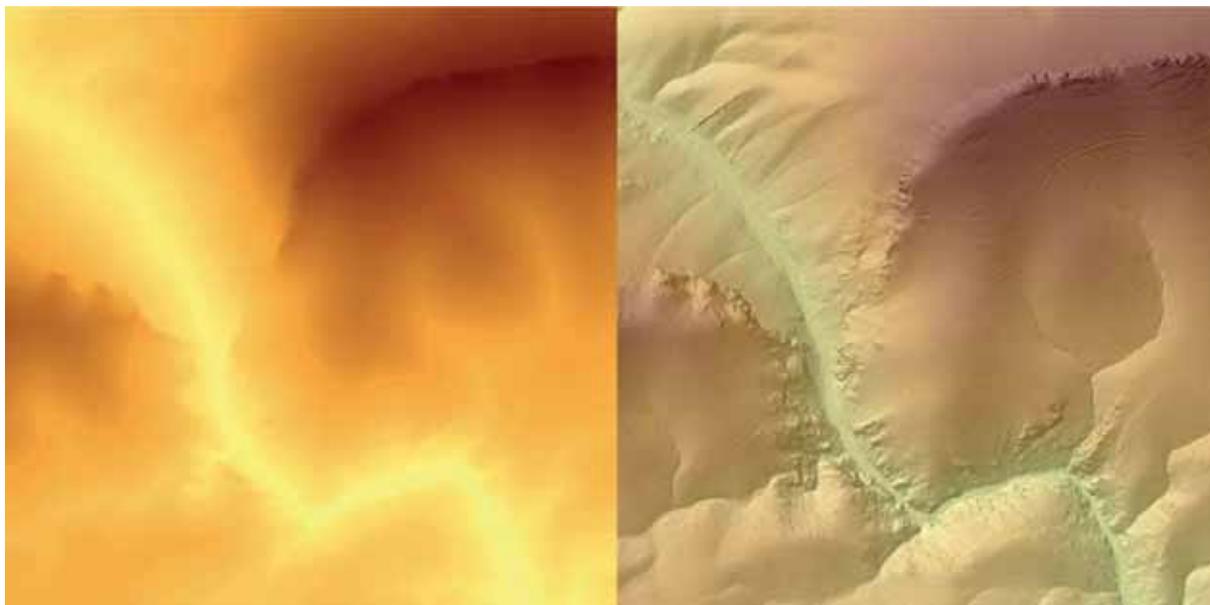
El modelo digital de superficies se obtiene mediante la interpolación de los puntos del primer pulso. Esto permite obtener un producto que aporta la altura de todos los elementos que aparecen en la zona de vuelo.



**Figura 5:** Modelo digital de superficies original (izquierda) y con sombreado de relieve (derecha)

### 3.1.5.2 Modelo digital de terreno (MDT)

El modelo digital de terreno se obtiene mediante la interpolación de los puntos del último pulso, excluyendo tanto la vegetación como los edificios y otras infraestructuras. Proporciona un reflejo de gran precisión del terreno.



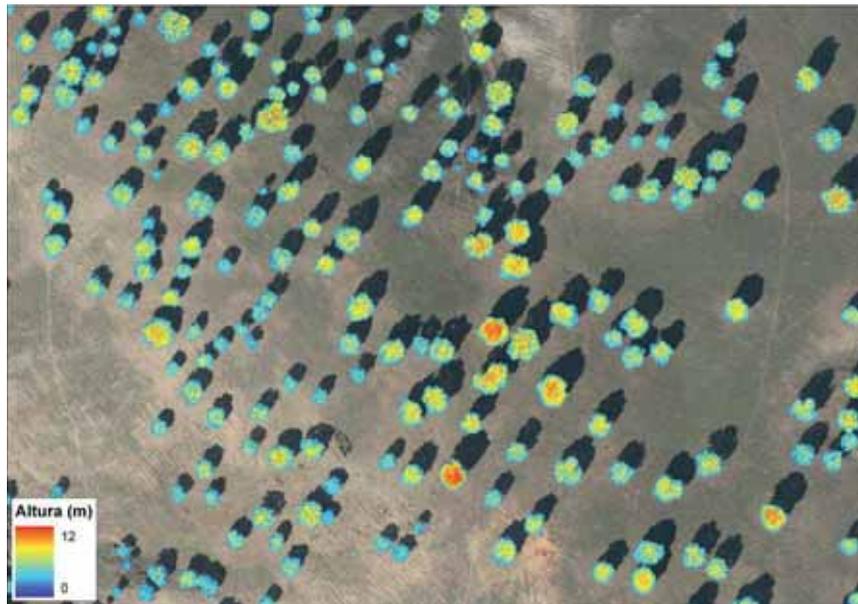
**Figura 6:** Modelo digital de terreno original (izquierda) y con sombreado de relieve (derecha)

Dado que el MDT describe la configuración del terreno, este producto tiene gran valor para su aprovechamiento de cara a la caracterización geomorfológica del Parque.

### 3.1.5.3 Modelo digital de vegetación (MDV)

El modelo digital de vegetación se obtiene mediante la interpolación de los puntos clasificados como suelo y vegetación. Este modelo aporta información acerca de la altura absoluta de la vegetación presente en la zona. A partir de él se puede generar un modelo digital de altura de

la cubierta vegetal, al sustraerle un modelo digital del terreno. El resultado es un modelo que expresa la altura relativa de los puntos con vegetación.



**Figura 7:** Modelo digital de altura de la cubierta vegetal en una zona de dehesa, indicando mediante un gradiente de colores la altura de cada uno de los árboles

A partir del modelo digital de altura de la cubierta vegetal se pueden crear subproductos referidos a intervalos de altura concretos (vegetación baja, media y alta).

#### **3.1.5.4 Modelo digital de edificaciones (MDEd)**

El modelo digital de edificaciones se obtiene mediante la diferencia entre un modelo de superficies y el modelo digital de vegetación. Este modelo aporta información acerca de la altura de las estructuras artificiales presentes en la zona.



**Figura 8:** Modelo digital de edificaciones

## 3.2 Explotación de datos LiDAR

Los datos LiDAR obtenidos en el Parque Nacional de Monfragüe han sido utilizados en los trabajos realizados para la generación de la cartografía de los sistemas naturales del Parque Nacional de Monfragüe. Fundamentalmente, ha sido a través de dos enfoques. Por una parte, a través de la explotación de los datos para extraer variables sobre el estado de la vegetación. Por otra parte, como apoyo a la fotointerpretación, permitiendo realizar una teselización de mayor detalle al ayudar a diferenciar mejor ciertas formaciones en base a criterios no visibles en las ortofotografías.

### 3.2.1 Variables de vegetación

Los sistemas LiDAR son capaces de proporcionar densas nubes de puntos en tres dimensiones proporcionando información horizontal y vertical con una alta resolución espacial y precisión describiendo detalladamente la superficie terrestre, y por tanto permiten obtener atributos forestales. Entre los atributos que pueden obtenerse a partir de los datos LiDAR podemos citar la altura del dosel, la topografía subyacente al dosel, la biomasa aérea, área basimétrica, diámetro medio del tronco, volumen de copa o distribución vertical de los doseles. Algunos de estos atributos pueden obtenerse de manera directa a partir de los datos (X, Y, Z) proporcionados por los sistemas LiDAR como por ejemplo la altura de la vegetación; otros se obtienen de manera indirecta mediante el establecimiento de modelos estadísticos o relaciones empíricas. A pesar de que, como se ha mencionado, algunas variables se obtienen de manera relativamente directa, es necesario un pre-procesamiento de los datos que incluye el filtrado de los puntos (normalmente identificación de retornos correspondientes a suelo y de retornos sobre objetos situados sobre el terreno como mínimo), la generación de un modelo digital de elevaciones (MDE), y normalización de las alturas de cada retorno con respecto al terreno por ejemplo.

La estimación de las diversas características forestales a partir de datos LiDAR puede realizarse siguiendo dos enfoques distintos en función de la densidad de los datos empleados. El primer enfoque consiste en trabajar a nivel de árbol individual, el cual requiere datos con alta densidad de puntos, mientras que el segundo se basa en estimaciones a nivel de área a partir de la distribución de alturas de los retornos del dosel empleando datos con baja densidad de puntos. La principal diferencia entre estos dos enfoques consiste en que el primero se apoya en la detección y delineación de árboles individuales y la aplicación de ecuaciones alométricas a nivel de árbol mientras que el segundo emplea directamente los retornos dentro de una parcela, rodal o masa arbórea para establecer relaciones que permitan estimar las características de interés. Dado que según la bibliografía consultada para una delineación exitosa de los árboles individuales se requieren densidades de puntos de más de 5 puntos/m<sup>2</sup>, se ha preferido optar por el segundo enfoque. Además, los métodos basados en árboles individuales tienen el principal inconveniente de que sólo los árboles dominantes o aquellos árboles aislados se pueden identificar correctamente. Las condiciones de la vegetación del Parque Nacional de Monfragüe se alejan de estas condiciones, salvo en las zonas más adeshadas.

Con respecto al tratamiento de los datos podemos considerar otros dos enfoques en función de cómo se sintetice la información proporcionada por los sistemas LiDAR. El primero consiste en derivar variables a partir de funciones de distribuciones de alturas derivadas de la nube de puntos, mientras que el segundo consiste en sintetizar la información mediante la generación de capas ráster. El segundo enfoque tiene la principal ventaja de que se reduce considerablemente el volumen de datos y por tanto, el tiempo de procesamiento, lo que es de gran interés para grandes áreas. Como inconveniente, se produce una pérdida de información disponible. Diversos estudios han demostrado que las precisiones de ambos enfoques son

similares. Para los trabajos involucrados en la experiencia piloto en el Parque Nacional de Monfragüe se ha optado por el segundo enfoque.

### 3.2.2 Obtención de información sobre variables

La extracción de variables del estado de los sistemas vegetales se realizó a partir del modelo digital de vegetación. Se generaron 4 modelos digitales de altura de vegetación, de resolución 0,5 metros de tamaño de píxel, considerando distintos estratos:

- Vegetación baja: de 0,15 a 0,5 metros (asimilable a pastizal)
- Vegetación media: de 0,5 a 2 metros (asimilable a matorral)
- Vegetación media-alta: de 2 a 4 metros (asimilable al estrato arbustivo)
- Vegetación alta: > 4 metros (asimilable al estrato arbóreo)

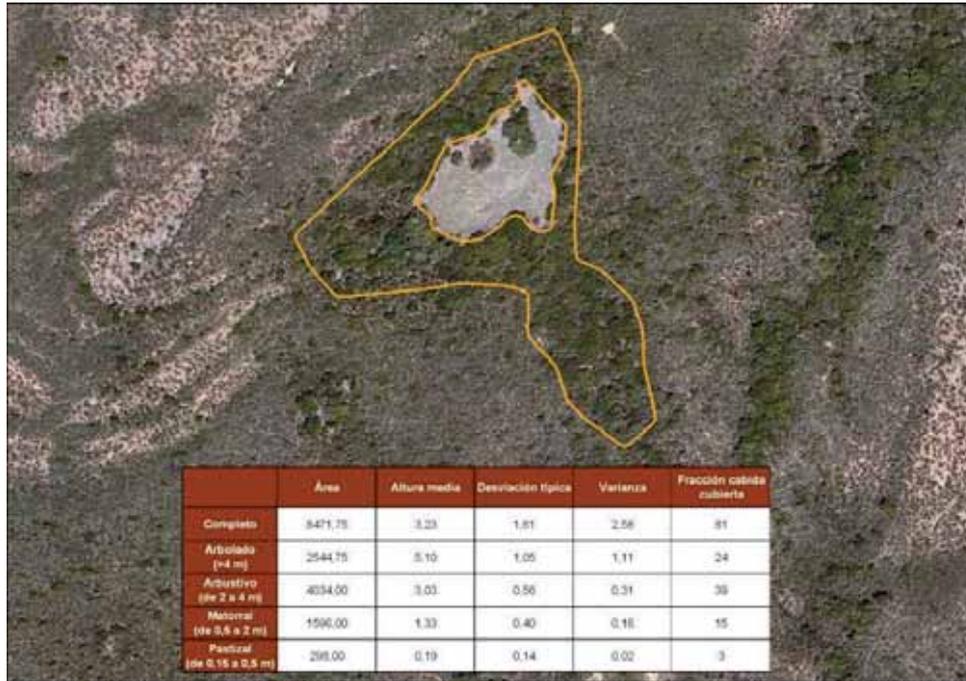
Estos estratos de alturas se establecieron de forma específica para Monfragüe, a través del análisis de la información obtenida mediante el trabajo de campo que se había realizado en el Parque.

A partir de estos modelos de altura de vegetación por estratos se calcularon varios parámetros forestales. Para cada tesela de la cartografía de SNV mediante análisis estadístico con SIG:

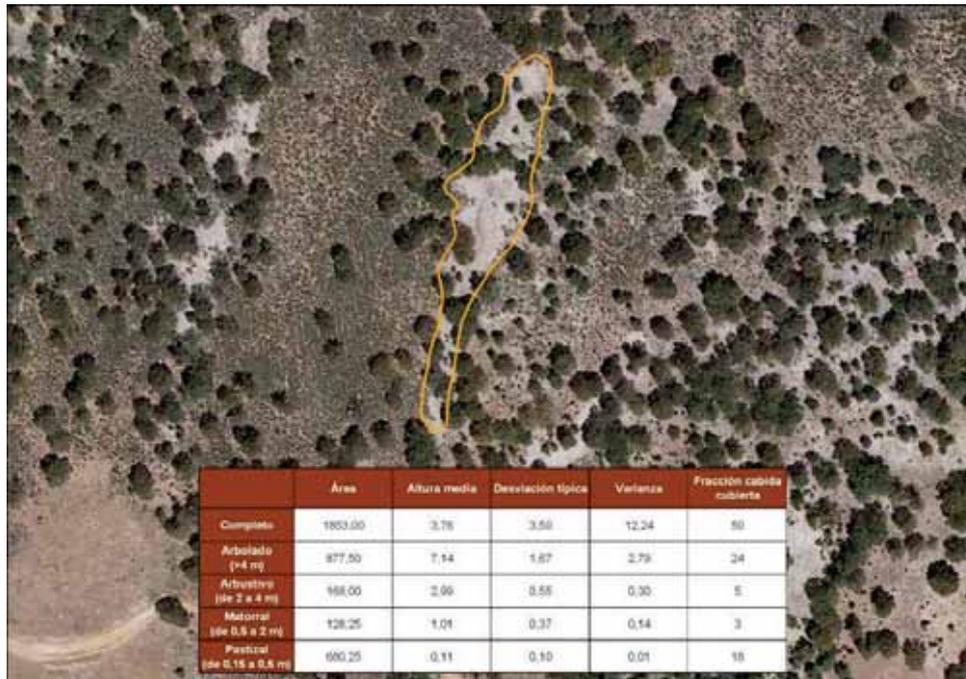
- **Altura de la vegetación por estrato:** se ha calculado la altura media por cada uno de los estratos de vegetación establecidos, además de para toda la vegetación completa, en cada una de las teselas que conforman la cartografía de los sistemas naturales vegetales. Además de la media, se ha calculado su desviación estándar y su varianza. Estas variables son las que nos aportan la características de “Variabilidad de la estructura vertical”
- **Fración de cabida cubierta (FCC):** se ha calculado la FCC en cada tesela por cada uno de los estratos de vegetación establecidos, además de para toda la vegetación completa. En este caso la FCC indica la proporción de suelo cubierta por la proyección vertical de cada uno de los estratos de vegetación definidos; de este modo se ha calculado, para cada tesela de la cartografía de los sistemas de vegetación, el porcentaje de su superficie que queda cubierta por cada uno de los estratos anteriormente definidos.
- **Complejidad de la estructura vertical de la vegetación:** indica la configuración sobre el terreno, desde arriba hacia abajo, de la vegetación dentro de una masa forestal. Esta caracterización se ha realizado sólo en las teselas que contiene información del estrato de bosque y, además, se ha calculado para todas las teselas sin diferenciar ningún estrato a partir del modelo de alturas de vegetación completo. Para definir la complejidad de la estructura vertical de la vegetación muchos autores utilizan el estadístico de varianza o de desviación estándar. En este caso se ha empleado la referencia indicada por Zimble et al. (2003)<sup>1</sup> que establece un valor de varianza  $\geq 1,54$  para indicar estructuras complejas. De este modo, para esta caracterización se ha calculado la varianza de alturas de vegetación para cada tesela de la cartografía de los sistemas naturales vegetales, quedando éstas clasificadas en simples o complejas según su estructura. El dato de complejidad de la estructura vertical de la vegetación se ha calculado en el caso de la vegetación más alta (bosque) y para el modelo digital de altura de la cubierta vegetal general.

---

<sup>1</sup> Zimble, D.A., Evans, D.L., Carlson, G.C., Parker, R.C., Grado, S.C., & Gerard, P.D. (2003). Characterizing vertical forest structure using small-footprint airborne LiDAR. *Remote Sensing of Environment*, 87, 171-182



**Figura 9:** Tesela con sistema 211200000 - Madroñales con olivillas, aladiernos y brezos (*Erica australis*, *E. scoparia*, *E. arborea*)



**Figura 10:** Tesela con sistema 125220000 - Vegetación ligada a pedregales o gleras móviles

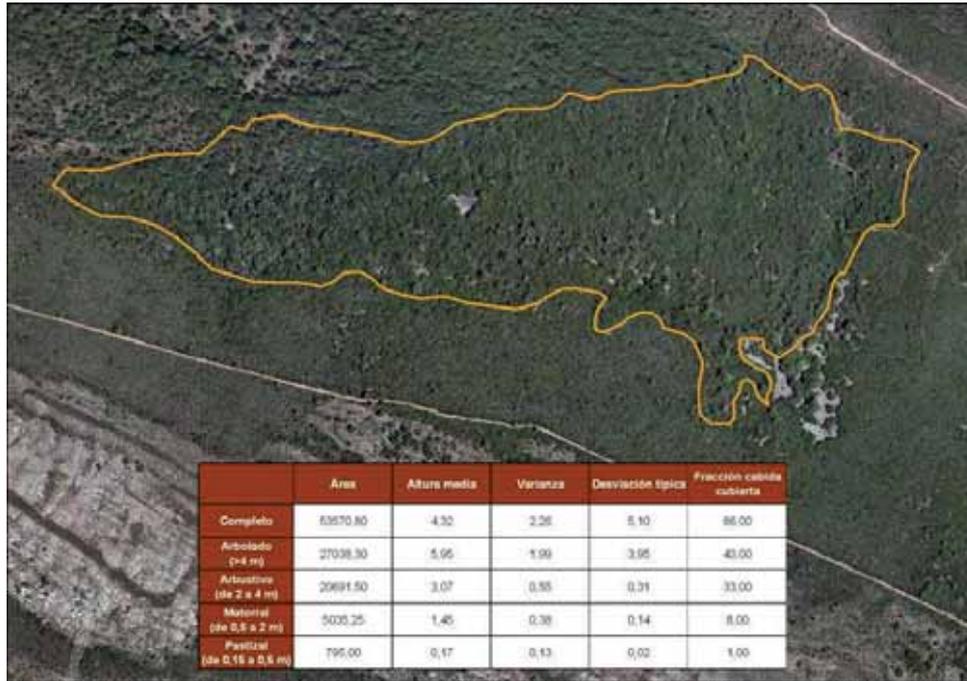


Figura 11: Tesela con sistema 111431000 - Alcornocales luso-extremadurenses

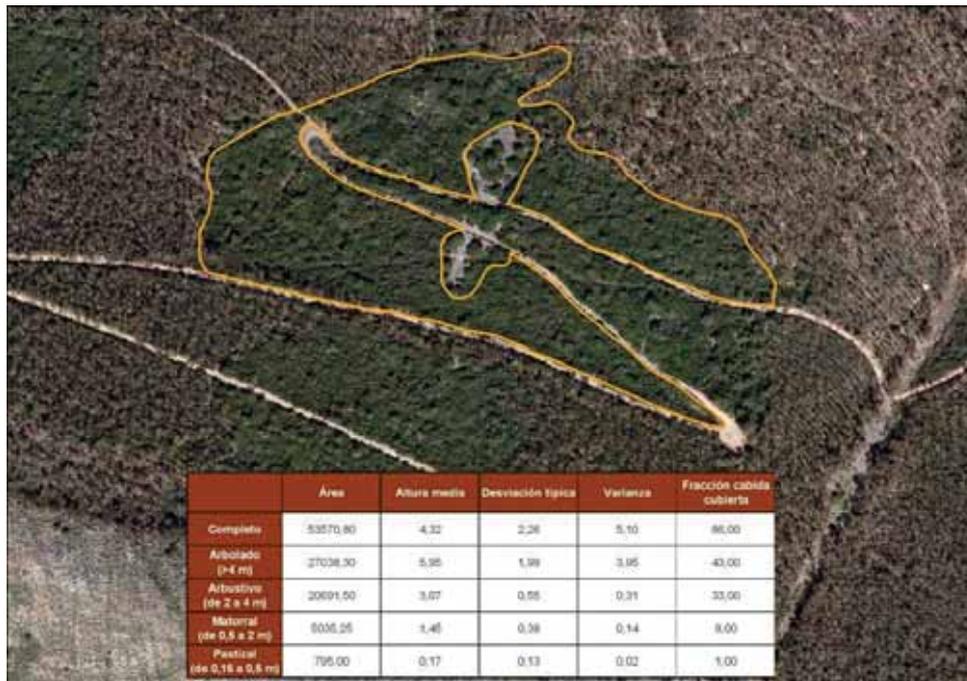


Figura 12: Tesela con sistema 111431000 - Alcornocales luso-extremadurenses

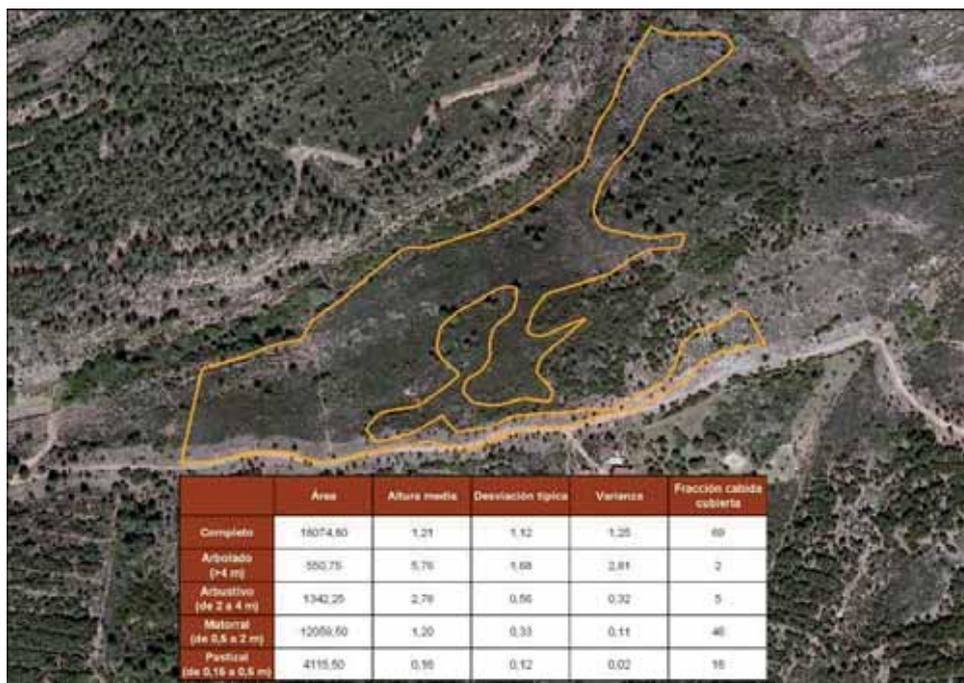


Figura 13: Tesela con sistema 212112410 - Jaral-breza de *Cistus ladanifer* y *Erica australis*, *E. scoparia* y/o *E. arborea*

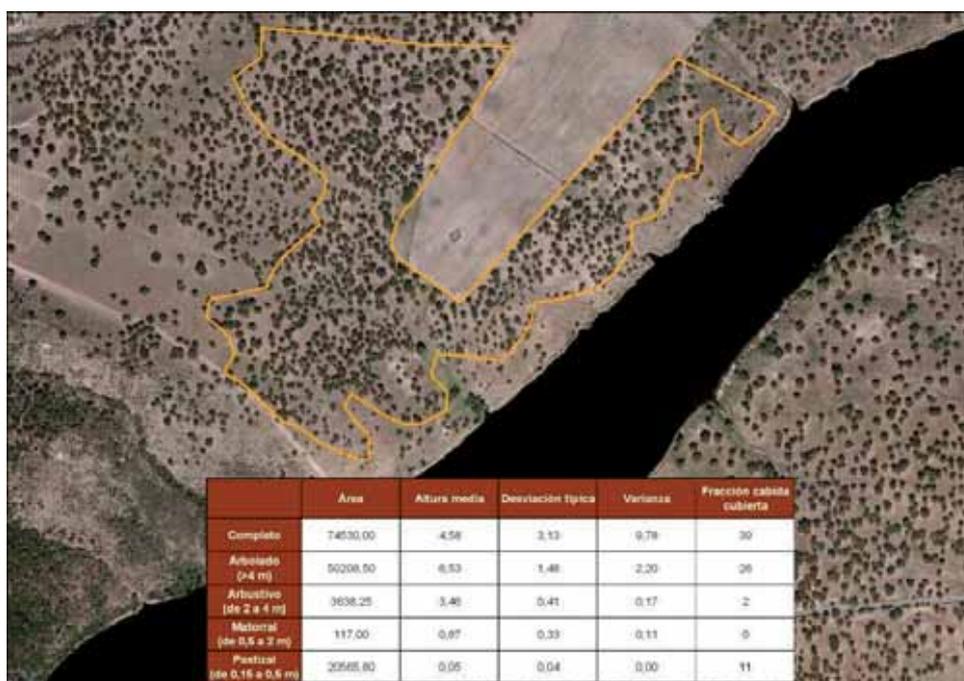


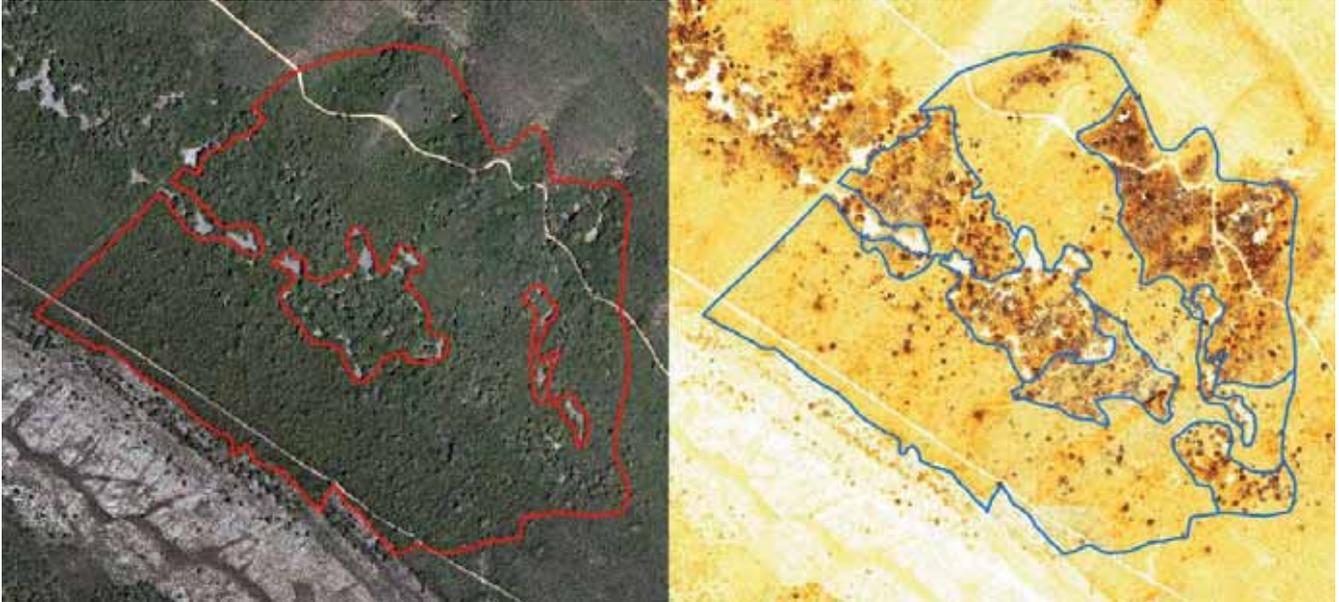
Figura 14: Tesela con sistema 313000000 - Dehesas de encina y alcornoque, 213114000 - Majadales sobre sustratos silicios, 212112310 - Jarales luso-extremadurenses dominados por jara pringosa con o sin *Genista hirsuta* y *Lavandula pedunculata* y 213111000 - Pastos terofíticos

### 3.2.3 Apoyo a la fotointerpretación

Tradicionalmente, la fotointerpretación de imágenes ha buscado realizar una discriminación visual de recintos con diferentes usos y estructuras, mediante la distinción de las coberturas a

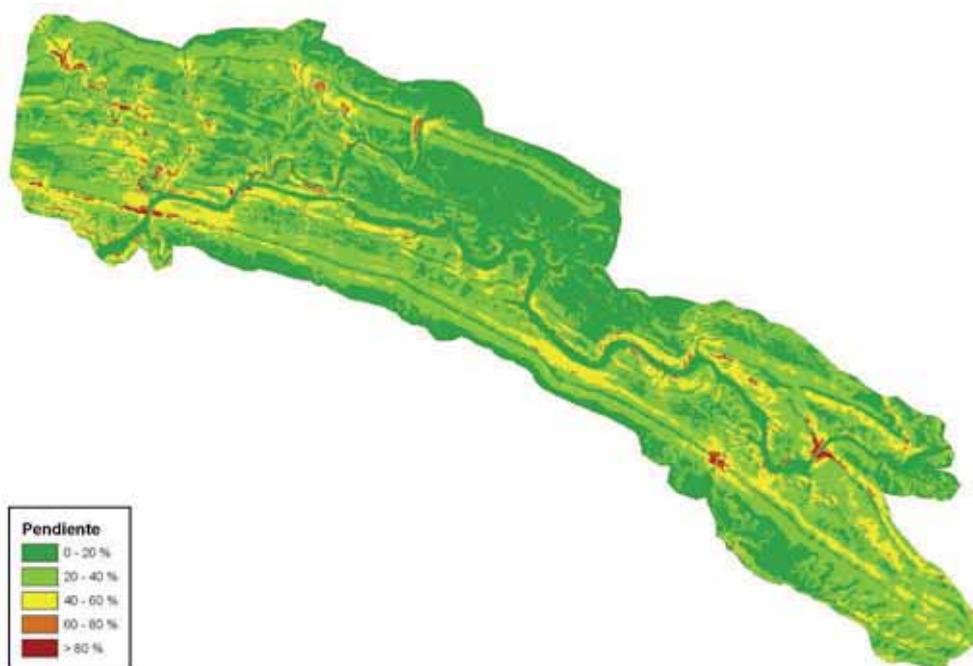
través de las diferencias en propiedades como el tamaño, la forma o el color. La limitación de esta técnica hace que si entre las distintas coberturas se producen variaciones que no se traducen en diferencias de las citadas propiedades, el fotointérprete no percibe el cambio.

Los productos LiDAR permiten incorporar nueva información a la hora de definir las teselas de vegetación. Concretamente, el modelo digital de vegetación aporta información visual de gran valor sobre la homogeneidad en altura y cobertura de la vegetación. Gracias a esto, se ha podido realizar una discriminación de más detalle en ciertas zonas de vegetación aparentemente homogénea.



**Figura 15:** Aumento de la teselización a través del modelo digital de vegetación del Parque Nacional de Monfragüe. La tesela original (izquierda) se divide en varias distintas, en función de la distinta configuración espacial, que se puede percibir con los datos LiDAR, aun presentando el mismo sistema natural vegetal

La utilización de modelos LiDAR también ha contribuido a generar una teselización de mayor detalle en la cartografía de sistemas geológicos del Parque Nacional de Monfragüe. A partir del modelo digital del terreno se han podido crear dos modelos de pendientes, a dos resoluciones diferentes (5 metros por píxel y 25 metros por píxel) que han sido de gran utilidad para la fotointerpretación de ese tipo de sistemas.



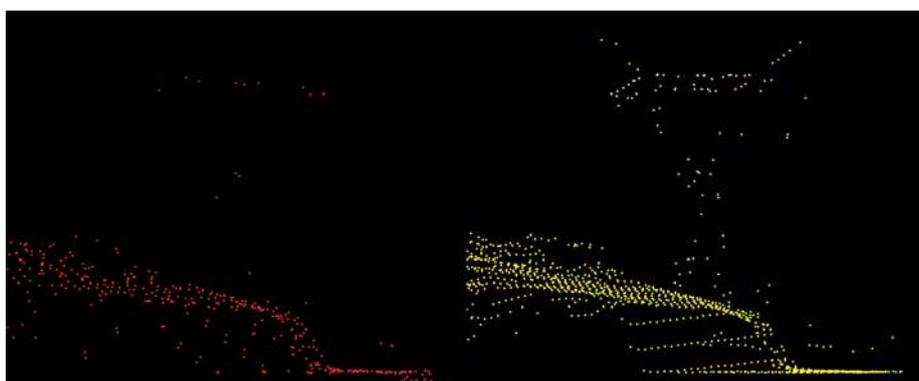
**Figura 16:** Modelo de pendientes del Parque Nacional de Monfragüe (25 metros/píxel)

#### 4. COMPARACIÓN DEL VUELO PROPIO REALIZADO EN MONFRAGÜE CON EL VUELO DE PNOA2

Con objeto de evaluar las ventajas que aporta generar un vuelo LiDAR de la Red de Parques Nacionales propio dentro del Plan de Seguimiento, se ha realizado una comparación de los datos del vuelo realizado en el Parque Nacional de Monfragüe con los datos del vuelo del PNOA.

Los vuelos LiDAR analizados cumplen con las especificaciones técnicas que se han definido para cada vuelo. De la comparación de los dos sets de datos, se ha podido concluir que la precisión altimétrica de la nube de puntos LiDAR no es proporcional a la densidad de puntos, si bien en vuelos con densidades de puntos muy bajas o terreno montañoso, la distancia promedio entre puntos será mayor y el error de interpolación influirá de forma más notoria.

Por otra parte, se ha podido evidenciar la mayor penetración que el LiDAR del vuelo propio ha tenido en las superficies, debido a la mayor densidad de puntos/m<sup>2</sup> con respecto a la densidad de PNOA, permitiendo contar con una representación de la vegetación más detallada, sobre todo de los estratos menos superficiales.

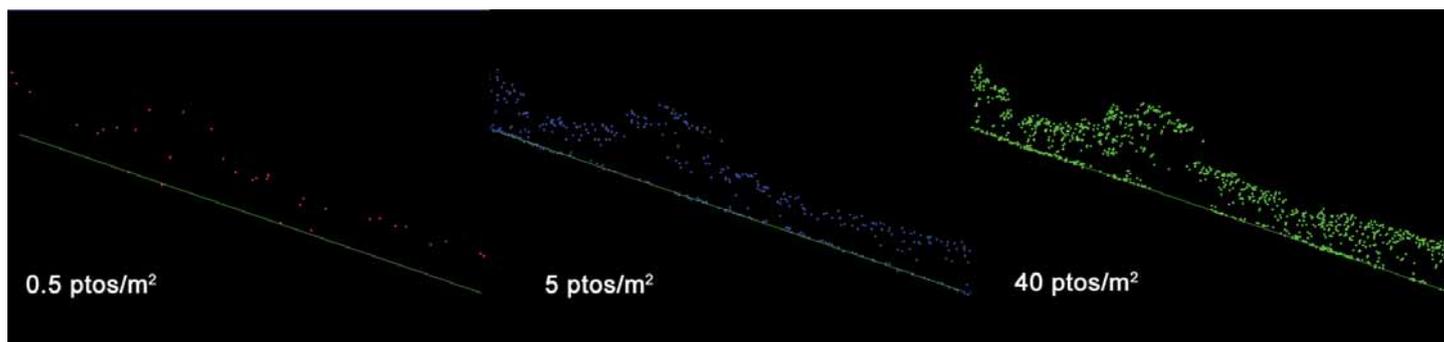


---

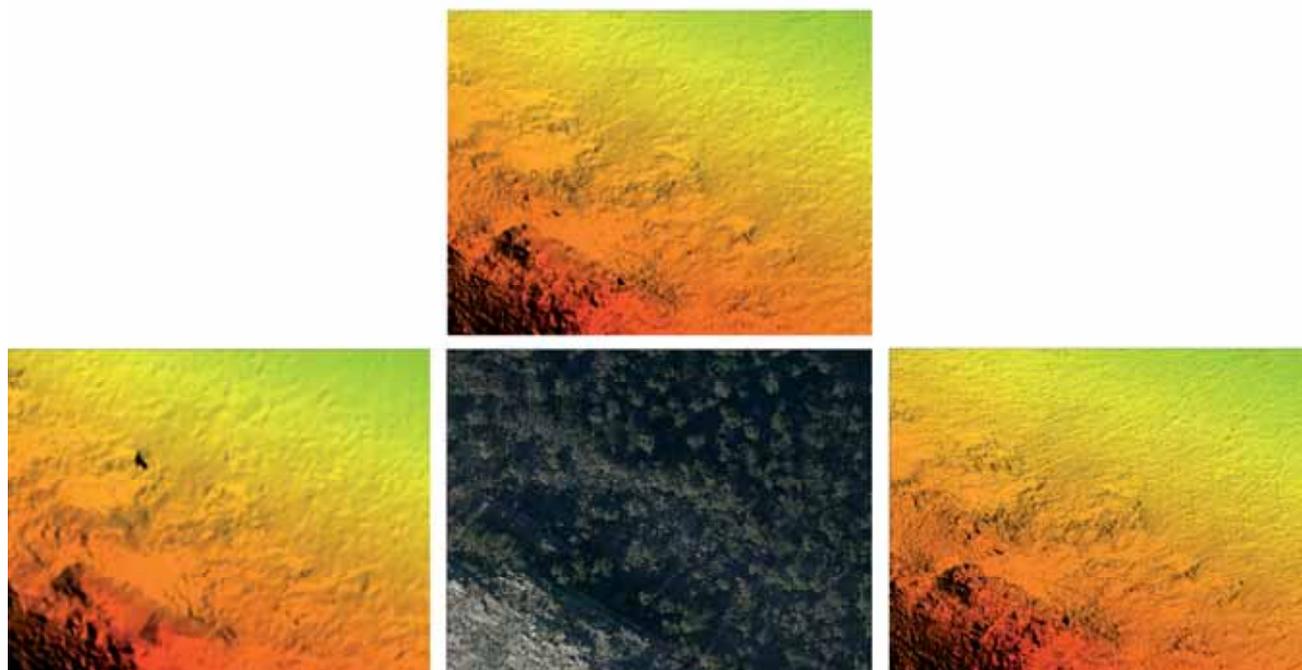
<sup>2</sup> Se proporciona adjunto a este documento una geodatabase de ficheros (ArcGIS 10.1) con cinco MDAV generados en el estudio, y con los resultados de los análisis de vegetación realizados para cada tesela de la cartografía de sistemas de vegetación del Parque Nacional de Monfragüe.



**Figura 17:** Comparación para un mismo perfil de vegetación entre la nube de puntos del vuelo PNOA de 0,5 pto/m<sup>2</sup> (a la izquierda) y el vuelo general de 5 pto/m<sup>2</sup> realizado en el Parque Nacional de Monfragüe (a la derecha)



**Figura 18:** Comparación para un mismo perfil de vegetación entre la nube de puntos del vuelo PNOA (en rojo, a la izquierda), el vuelo general realizado en el Parque Nacional de Monfragüe (en azul, centro) y el vuelo de detalle (en verde, a la derecha)



**Figura 19:** Comparación para una zona del Parque Nacional de Monfragüe del modelo digital de superficie que genera cada uno de los vuelos (Izquierda, PNOA 0,5 pto/m<sup>2</sup>; arriba, vuelo general propio de 5 pto/m<sup>2</sup>; derecha, vuelo propio de detalle 40 pto/m<sup>2</sup>)

Por otra parte, a partir de las precisiones que se han exigido para ambos vuelos, se ha comprobado que los vuelos analizados son perfectamente “superponibles” tanto a nivel de

planimetría como de altimetría, gracias a las prestaciones de la tecnología actual y a una metodología/especificación común, lo que permite integrar datos multitemporales.

#### 4.1 LiDAR PNOA: Datos

Los datos Lidar empleado para este análisis, y en su posterior comparación con los resultados del análisis Lidar realizado con los datos del vuelo propio, proceden del PNOA incluido en el Plan Nacional de Observación del Territorio (PNOT). Este plan, está concebido en acuerdo con distintos organismos de la Administración General del Estado (AGE) y las CCAA para producir las coberturas de imágenes del territorio e integrar y armonizar las Bases de Datos de Ocupación del Suelo producidas por las CCAA y la AGE, a las que accederán las distintas organizaciones peticionarias de datos según las directrices INSPIRE de la UE. Los vuelos Lidar de PNOA se empezaron a realizar en el año 2008. En el siguiente cuadro se presentan las zonas voladas por año de vuelo:



Figura 20: Cobertura LiDAR PNOA (2008-2012) Fuente IGN.

El Lidar del PNOA es un producto gratuito, con una densidad de 0,5 puntos por metro cuadrado (con una separación media entre puntos 1.4m). Su precisión altimétrica es de 20 cm. Se distribuye en ficheros \*.LAS en cuadrados UTM de 2x2 km, utilizando como sistema geodésico de referencia ETRS89.

En la actualidad, el Lidar PNOA está totalmente procesado pero no se ha realizado una clasificación de la nube de puntos, por lo que se requiere una labor de preparación de los datos.

Con objeto de evaluar las ventajas que aporta generar un vuelo Lidar de la Red de Parques Nacionales propio dentro del Plan de Seguimiento, se ha realizado una comparación de los datos del vuelo realizado en el Parque Nacional de Monfragüe con los datos del vuelo del

PNOA, mediante el análisis de los datos y el cálculo de parámetros de vegetación, con ambas colecciones de datos.

A continuación se presentan las características concretas de cada uno de los vuelos:

	<b>PNOA 2010 (Lote 8)</b>	<b>Vuelo propio Parque Nacional Monfragüe</b>	
	<b>0.5 ptos/m<sup>2</sup></b>	<b>5 ptos/m<sup>2</sup></b>	<b>40 ptos/m<sup>2</sup></b>
Separación entre puntos	1.41 m	0.63 m	0.16 m
Sensor LiDAR	ALS 50 - II	Top Eye MK III	Top Eye MK III
FOV	50º	60º	45º
PRF (Khz)	89.9	100	240
Frec. Barrido (Hz)	33.2	45	70
Hv (AGL)	2200	700	350
Velocidad (nudos)	148	58	20
Velocidad (Km/h)	274	108	36
Rec. Transversal	15%	56%	0%

Con respecto al tratamiento de los datos podemos considerar dos enfoques en función de cómo se sintetice la información proporcionada por los sistemas LiDAR. El primero consiste en derivar variables a partir de funciones de distribuciones de alturas derivadas de la nube de puntos, mientras que el segundo consiste en sintetizar la información de altura de los puntos Lidar mediante la generación de capas ráster. El segundo enfoque tiene la principal ventaja de que se reduce considerablemente el volumen de datos y por tanto, el tiempo de procesamiento, lo que es de gran interés para grandes áreas. Como inconveniente, se produce una pérdida de información disponible. Diversos estudios han demostrado que las precisiones de ambos enfoques son similares.

Para los trabajos involucrados en la experiencia piloto en el Parque Nacional de Monfragüe se ha optado por el segundo enfoque de generación de modelos digitales (capas ráster), para sintetizar la información original y facilitar su manejo. Para generar las capas ráster se emplea una interpolación de los valores de los puntos Lidar, asignando a cada píxel el valor en altura de la media de los puntos Lidar que se localizan en dicha celda.

Los ficheros Lidar empleados como punto de partida para este estudio, han sido proporcionados por el IGN en formato .LAS, cada fichero cubre una extensión de 2x2km. La información se proporciona sin ningún tipo de clasificación, con alturas elipsoidales, sistema geodésico de referencia ETRS89 y proyección UTM. En total son 18 ficheros de datos Lidar en huso 29 y 61 ficheros en huso 30, que cubren la totalidad del Parque Nacional de Monfragüe.

## 4.2 Trabajo y análisis realizados

A continuación se enumeran y explican las fases seguidas en el análisis de datos Lidar PNOA. Las herramientas empleadas en este trabajo han sido ArcGIS 10.1 y LASTOOLS.

1. Datos de partida: ficheros LAS en H29 y H30. (Hay que trabajar con ellos por separado, hasta generar los modelos digitales).
2. Clasificación automática de los puntos suelo en los ficheros .LAS.
3. Cálculo de las alturas de todos los puntos sobre el terreno en los ficheros .LAS.
4. Clasificación automática de los puntos de vegetación y edificios en los ficheros .LAS

Tanto la clasificación de suelo como de vegetación en los ficheros .LAS se ha realizado aplicando algoritmos de manera automática, una posterior revisión y depuración manual de estos datos, permite obtener mejores resultados y corregir errores en la clasificación de puntos. Este trabajo laborioso no se ha realizado ya que conlleva una gran carga de horas de trabajo, por lo que se asumen pequeños errores de clasificación que puedan tener los puntos como pueden ser algunas edificaciones o puntos en zonas de roquedos o acantilados que pueden ser confundidos con vegetación, principalmente con vegetación alta. La clasificación automática de los datos Lidar (suelo, vegetación, edificaciones,) se considera suficiente para representar correctamente el territorio en zonas naturales.

5. Normalización de las alturas de todos los puntos sobre el suelo en los ficheros .LAS.
6. Estratificación de la vegetación según intervalos de altura (se siguen los mismos que se emplearon en los datos del vuelo propio de Monfragüe) en los ficheros .LAS:
  - Clase 2: Suelo
  - Clase 3: Pastizal (0/0.15 – 0.5m)
  - Clase 4: Matorral (0.5 – 2m)
  - Clase 5: Arbusto (2 – 4m)
  - Clase 8: Bosque (>4m)

## 7. Generación de modelos de altura de vegetación (MDAV)

A partir de los ficheros .LAS clasificados y normalizados en 4 estratos de vegetación se han generado distintos modelos de altura de vegetación (MDAV), según los husos geográficos en los que se encuentra la información original.

Se ha realizado un estudio para decidir el tamaño de píxel más adecuado y representativo para los datos disponibles. Para ello se han generado diferentes modelos digitales (MDAV\_completo) con distintos tamaños de píxel (1m, 1.5m, 2m, y 5m) a partir de los cuales se ha analizado y decidido la mejor opción. Se tiene en cuenta que la densidad de los puntos Lidar PNOA es de 0.5ptos/m<sup>2</sup>, aunque la separación media lineal entre puntos es de 1.4m. Se han analizado también una muestra de diferentes pixeles elegidos de manera aleatoria, y se han comparado sus valores de altura de vegetación con los correspondientes píxeles de los modelos de altura de vegetación generados en el proyecto de vuelo propio del Parque Nacional de Monfragüe.

A partir de estas premisas, se ha decidido emplear un tamaño de píxel de 2m para la generación de todos los modelos de altura de vegetación, ya que los datos que recogen son los más parecidos a los del vuelo propio, y con este tamaño de píxel queda cubierta la distancia mínima lineal de separación entre puntos PNOA, por lo que los errores de interpolación en la generación de los modelos digitales serán menores.

Los MDAV generados a partir de los ficheros .LAS clasificados y normalizados, y según las clases seleccionadas por diferentes filtros, con tamaño de píxel de 2m, son los siguientes:

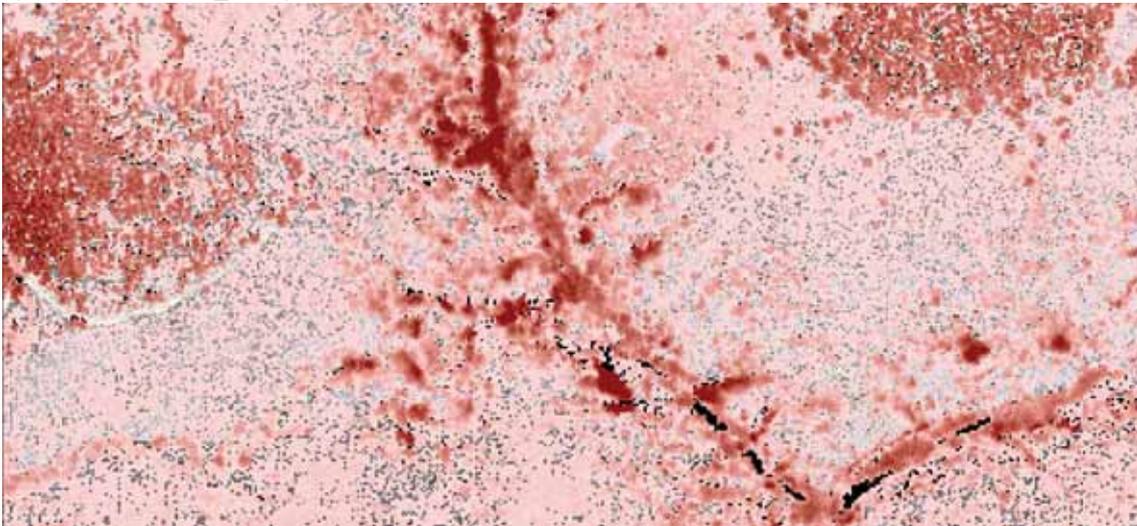
- MDAV\_completo: generado a partir de los datos lidar de las clases 3, 4, 5 y 8.
- MDAV\_pastizal: generado a partir de los datos lidar de la clase 3
- MDAV\_matorral: generado a partir de los datos lidar de la clase 4
- MDAV\_arbusto: generado a partir de los datos lidar de la clase 5
- MDAV\_bosque: generado a partir de los datos lidar de la clase 8

Los MDAVs se generan asignando a cada píxel el valor medio de la altura de los puntos Lidar clasificados como vegetación (o de cada clase de vegetación) que hay en cada celda del ráster definido (según el tamaño de celda dado). Para las zonas sin datos no se realiza ningún tipo de interpolación, ya que la vegetación no se encuentra en toda la superficie del terreno, y de esta manera los datos proporcionados son más reales. (Ver imágenes de ejemplo a continuación).

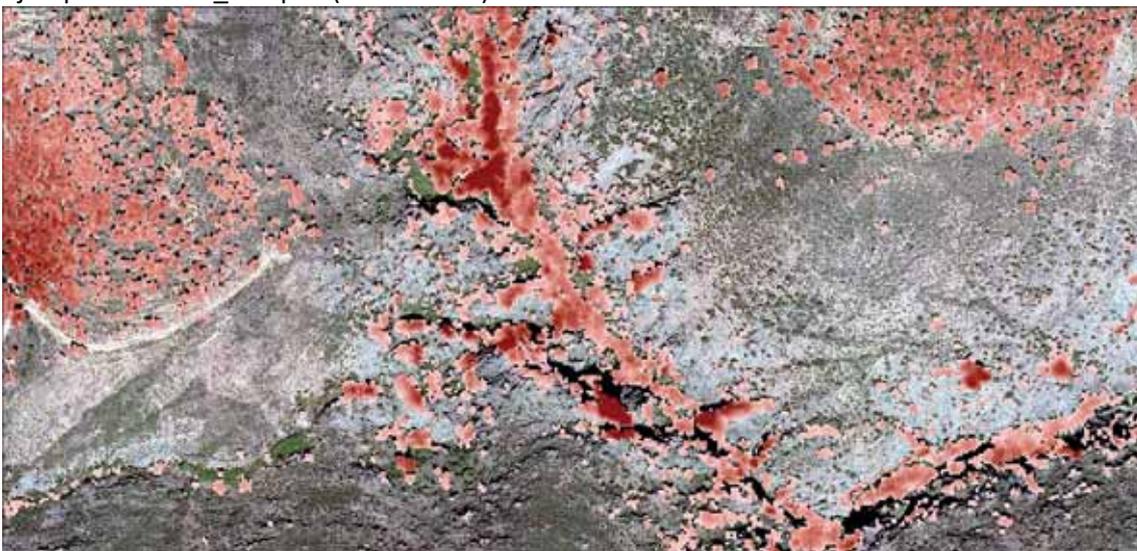
Ejemplo 1. ORTO:



Ejemplo 1. MDAV\_Completo:



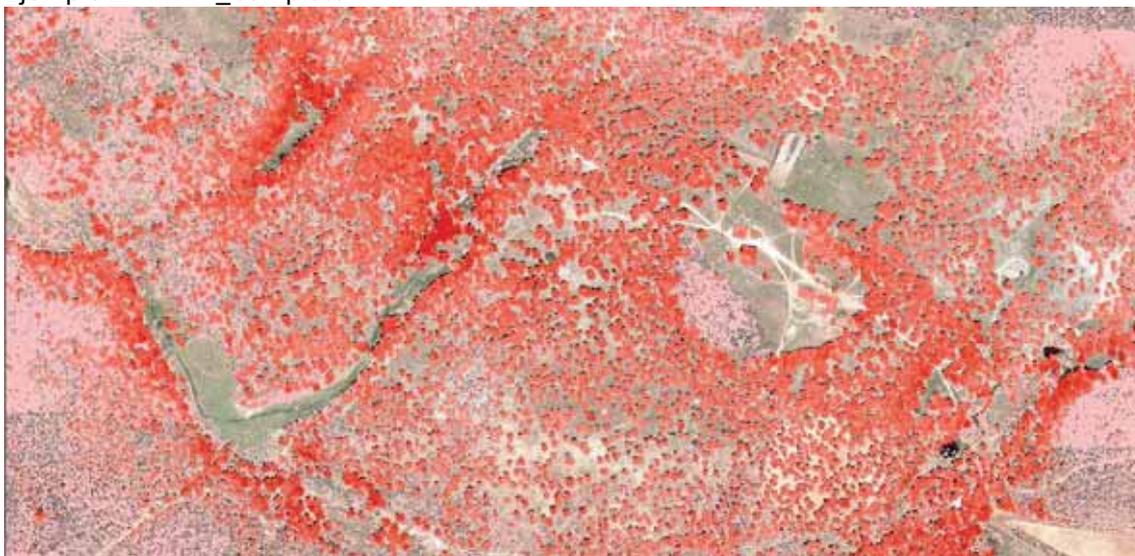
Ejemplo 1. MDAV\_Bosque: (Altura > 4m):



Ejemplo 2. ORTO:



Ejemplo 2. MDAV\_Completo:



Ejemplo 2. MDAV\_Bosque: (Altura > 4m):



Ejemplo 2. MDAV\_Arbusto: (Altura 2 - 4m):



Ejemplo 2. MDAV\_Matorral: (Altura 0.5 - 2m):



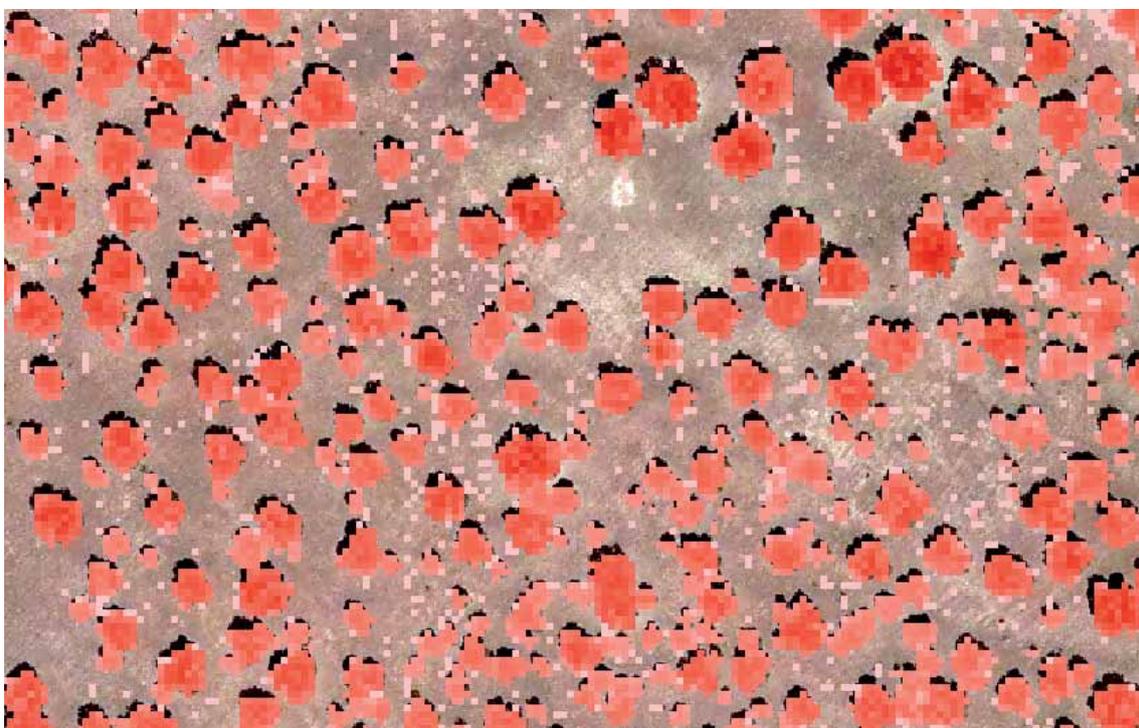
Ejemplo 2. MDAV\_Pastizal: (Altura 0.5 - 2m):



Ejemplo 3. DETALLE árboles zona de dehesa. Orto y MDVA\_Completo:



Orto



MDVA\_Completo

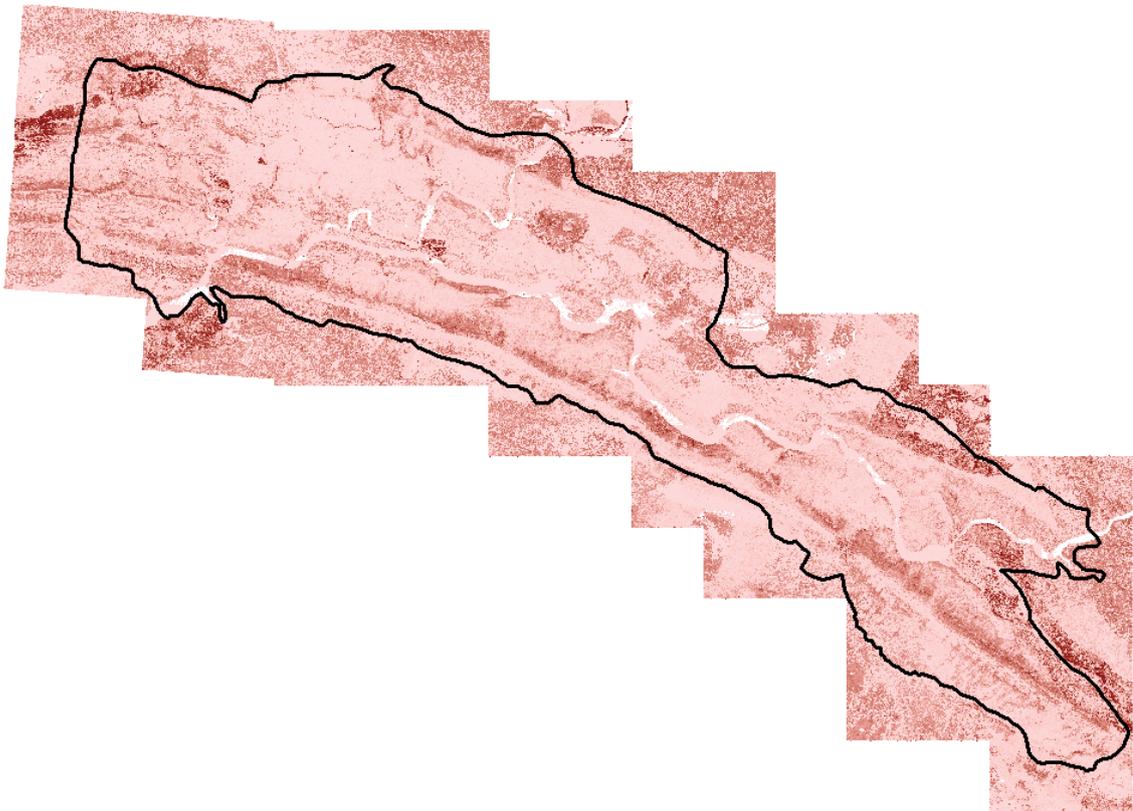
Ejemplo 4. Detalle (Orto y MDVA\_Completo):



8. Unión de los modelos digitales generados en distintos husos geográficos.

Se re proyectan al huso 30 los modelos digitales generados en H29, se recortarán las zonas de solape con los modelos del huso 30 y se unirán generándose un único modelo digital por estrato de altura de vegetación, con proyección ETRS89, huso 30 y que cubre la totalidad del Parque Nacional de Monfragüe.

Ejemplo. MDAV\_completo



#### 9. Cálculo de estadísticos Lidar por tesela de vegetación.

Usando como referencia la cartografía de sistemas naturales vegetales del Parque Nacional de Monfragüe, y a partir de los diferentes modelos de altura de vegetación generados, se calculan una serie de estadísticos, mediante análisis estadístico SIG, que se traducen en parámetros forestales, por tesela, que permitirán la caracterización de la vegetación en función de datos Lidar PNOA.

- **Altura de la vegetación por estrato:** se ha calculado la altura media por cada uno de los estratos de vegetación establecidos, además de para toda la vegetación completa, en cada una de las teselas que conforman la cartografía de los sistemas naturales vegetales. Además de la media, se ha calculado su desviación estándar y su varianza. Estas variables son las que nos aportan la características de “Variabilidad de la estructura vertical”
- **Fracción de cabida cubierta (FCC):** se ha calculado la FCC en cada tesela por cada uno de los estratos de vegetación establecidos, además de para toda la vegetación completa. En este caso la FCC indica la proporción de suelo cubierta por la proyección vertical de cada uno de los estratos de vegetación definidos; de este modo se ha calculado, para cada tesela de la cartografía de los sistemas de vegetación, el porcentaje de su superficie que queda cubierta por cada uno de los estratos anteriormente definidos.
- **Complejidad de la estructura vertical de la vegetación:** indica la configuración sobre el terreno, desde arriba hacia abajo, de la vegetación dentro de una masa forestal. Esta caracterización se ha realizado sólo en las teselas que contiene información del estrato de bosque y, además, se ha calculado para

todas las teselas sin diferenciar ningún estrato a partir del modelo de alturas de vegetación completo. Para definir la complejidad de la estructura vertical de la vegetación muchos autores utilizan el estadístico de varianza o de desviación estándar. En este caso se ha empleado la referencia indicada por Zimble et al. (2003)<sup>3</sup> que establece un valor de varianza  $\geq 1,54$  para indicar estructuras complejas. De este modo, para esta caracterización se ha calculado la varianza de alturas de vegetación para cada tesela de la cartografía de los sistemas naturales vegetales, quedando éstas clasificadas en simples o complejas según su estructura. El dato de complejidad de la estructura vertical de la vegetación se ha calculado en el caso de la vegetación más alta (bosque) y para el modelo digital de altura de la cubierta vegetal general.

### 4.3 Resultado de la comparativa LIDAR PNOA vs LIDAR propio

#### 4.3.1 Comparación de análisis estadístico de parámetros de vegetación

- **Pastizal (0/0.15 – 0.5m):** Diferencias entre Lidar PNOA y Lidar Propio, en valores de altura media y FCC del estrato pastizal.
  - **Altura Media.** Al hacer la comparación por Tesela entre los valores de altura media obtenidos a partir de los datos de Lidar PNOA y los valores obtenidos del análisis del vuelo propio, se observa que 71% de las teselas tiene una diferencia menor a 10cm ; y el 99.9% de las teselas tiene una diferencia menor a 20cm.
  - En general el Lidar PNOA hace una sobreestimación de la altura media sobre el estrato de Pastizal, sólo en el 0.5% de las teselas (17 teselas) es mayor la altura media obtenida con el vuelo propio que con el vuelo PNOA. (Hay que tener en cuenta que el estrato de vegetación está definido entre 0 y 0.5 m de altura, y la precisión del Lidar en Z está entorno a los 20cm).

<b>PASTIZAL Alt.Medía</b> (valor absoluto)	Nº Teselas	%
Diferencias L.PNOA - L.Propio < 0,10 m	2453	71
Diferencias L.PNOA - L.Propio < 0,20 m	3453	100
Diferencias L.PNOA - L.Propio < 0,30 m	3455	100

- **FCC:** Al hacer la comparación por Tesela entre los valores FCC obtenidos a partir de los datos de Lidar PNOA y los valores obtenidos del análisis del vuelo propio, se observa que hay una sobreestimación de la FCC por parte del Lidar PNOA. Sólo en el 17% de las teselas tienen un valor de FCC mayor en el cálculo del vuelo propio que en el vuelo PNOA, y el 1.8 % de las teselas tienen el mismo valor de FCC calculado con Lidar PNOA y con Lidar Propio.
- El 25% de las teselas tienen una diferencia menor al 5% entre el valor asignado a la FCC de pastizal a partir del Lidar PNOA y el valor de FCC del Lidar Propio. (Se incluye tabla con algunos estadísticos)

<sup>3</sup> Zimble, D.A., Evans, D.L., Carlson, G.C., Parker, R.C., Grado, S.C., & Gerard, P.D. (2003). Characterizing vertical forest structure using small-footprint airborne LiDAR. *Remote Sensing of Environment*, 87, 171-182

<b>PASTIZAL FCC</b>	Nº Teselas	%
Diferencias L.PNOA - L.Propio < 0 (Nº Teselas FCC de vuelo propio es mayor que la de PNOA)	583	16,9
Diferencias L.PNOA - L.Propio < 50	3182	92
Diferencias L.PNOA - L.Propio < 40	2773	80
Diferencias L.PNOA - L.Propio < 30	2252	65
Diferencias L.PNOA - L.Propio < 20	1642	48
Diferencias L.PNOA - L.Propio < 10	1082	31
Diferencias L.PNOA - L.Propio < 5	856	25
Diferencias L.PNOA - L.Propio = 0	61	1,8

- **Matorral (0.5 – 2m):** Diferencias entre Lidar PNOA y Lidar Propio, en valores de altura media y FCC del estrato matorral.
  - Altura Media. Al hacer la comparación por Tesela entre los valores de altura media obtenidos a partir de los datos de Lidar PNOA y los valores obtenidos del análisis del vuelo propio, se observa que el 50% de las teselas tiene una diferencia menor a 10cm ; y el 87% de las teselas tiene una diferencia menor a 20cm.
  - En este caso, el lidar PNOA hace una infravaloración de la altura media sobre el estrato de Matorral, ya que en el 76.6% de las teselas es mayor la altura media obtenida con el vuelo propio que con el vuelo PNOA.

<b>MATORRAL Alt.Medía</b> (valor absoluto)	Nº Teselas	%
Diferencias L.PNOA - L.Propio < 0,10 m	1724	50
Diferencias L.PNOA - L.Propio < 0,20 m	3002	87
Diferencias L.PNOA - L.Propio < 0,30 m	3386	98

- FCC: Al hacer la comparación por Tesela entre los valores FCC obtenidos a partir de los datos de Lidar PNOA y los valores obtenidos del análisis del vuelo propio, se observa que hay una sobreestimación de la FCC por parte del Lidar PNOA. Sólo en el 17% de las teselas tienen un valor de FCC mayor en el cálculo del vuelo propio que en el vuelo PNOA, y el 6.4% de las teselas tienen el mismo valor de FCC calculado con Lidar PNOA y con Lidar Propio.
- El 40% de las teselas tienen una diferencia menor al 5% entre el valor asignado a la FCC de matorral a partir del Lidar PNOA y el valor de FCC del Lidar Propio. (Se incluye tabla con algunos estadísticos)

<b>MATORRAL FCC</b>	Nº Teselas	%
Diferencias L.PNOA - L.Propio < 0 (Nº Teselas FCC de vuelo propio es mayor que la de PNOA)	579	17
Diferencias L.PNOA - L.Propio < 50	3434	99
Diferencias L.PNOA - L.Propio < 40	3338	97
Diferencias L.PNOA - L.Propio < 30	3124	90
Diferencias L.PNOA - L.Propio < 20	2644	76
Diferencias L.PNOA - L.Propio < 10	1940	56
Diferencias L.PNOA - L.Propio < 5	1378	40
Diferencias L.PNOA - L.Propio = 0	220	6,4

- **Arbustivo (2 – 4m):** Diferencias entre Lidar PNOA y Lidar Propio, en valores de altura media y FCC del estrato arbustivo.
  - Altura Media. Al hacer la comparación por Tesela entre los valores de altura media obtenidos a partir de los datos de Lidar PNOA y los valores obtenidos del análisis del vuelo propio, se observa que el 78% de las teselas tiene una diferencia menor a 10cm ; y el 95% de las teselas tiene una diferencia menor a 20cm.
  - En este caso, el Lidar PNOA hace una infravaloración de la altura media sobre el estrato de Matorral, ya que en el 60.7% de las teselas es mayor la altura media obtenida con el vuelo propio que con el vuelo PNOA.

<b>ARBUSTO</b> Alt.Media (valor absoluto)	Nº Teselas	%
Diferencias L.PNOA - L.Propio < 0,10 m	2698	78
Diferencias L.PNOA - L.Propio < 0,20 m	3271	95
Diferencias L.PNOA - L.Propio < 0,30 m	3363	97

- FCC: Al hacer la comparación por Tesela entre los valores FCC obtenidos a partir de los datos de Lidar PNOA y los valores obtenidos del análisis del vuelo propio, se observa que hay una sobreestimación de la FCC por parte del Lidar PNOA. Sólo en el 4.7% de las teselas tienen un valor de FCC mayor en el cálculo del vuelo propio que en el vuelo PNOA, y el 7.1% de las teselas tienen el mismo valor de FCC calculado con Lidar PNOA y con Lidar Propio.
- El 38% de las teselas tienen una diferencia menor al 5% entre el valor asignado a la FCC de arbusto a partir del Lidar PNOA y el valor de FCC del Lidar Propio. (Se incluye tabla con algunos estadísticos)

<b>ARBUSTO FCC</b>	Nº Teselas	%
Diferencias L.PNOA - L.Propio < 0 (Nº Teselas FCC de vuelo propio es mayor que la de PNOA)	163	4,7
Diferencias L.PNOA - L.Propio < 50	3456	100
Diferencias L.PNOA - L.Propio < 40	3438	99
Diferencias L.PNOA - L.Propio < 30	3293	95
Diferencias L.PNOA - L.Propio < 20	2821	82
Diferencias L.PNOA - L.Propio < 10	1981	57
Diferencias L.PNOA - L.Propio < 5	1310	38
Diferencias L.PNOA - L.Propio = 0	245	7,1

- **Bosque (>4m):** Diferencias entre Lidar PNOA y Lidar Propio, en valores de altura media, FCC y estructura vertical des estrato de bosque
  - Altura Media. Al hacer la comparación por Tesela entre los valores de altura media obtenidos a partir de los datos de Lidar PNOA y los valores obtenidos del análisis del vuelo propio, se observa que el 18% de las teselas tiene una diferencia menor a 10cm, el 46% de las teselas tiene una diferencia menor a 20cm y el 89% de las teselas tienen una diferencia menor a 50cm.

- En este caso, el Lidar PNOA hace una infravaloración de la altura media sobre el estrato de Matorral, ya que en el 85,7% de las teselas es mayor la altura media obtenida con el vuelo propio que con el vuelo PNOA.

<b>BOSQUE Alt.Media</b> (valor absoluto)	Nº Teselas	%
Diferencias L.PNOA - L.Propio < 0,10 m	631	18
Diferencias L.PNOA - L.Propio < 0,20 m	1592	46
Diferencias L.PNOA - L.Propio < 0,30 m	2485	72
Diferencias L.PNOA - L.Propio < 0,50 m	3074	89
Diferencias L.PNOA - L.Propio < 1 m	3318	96
Diferencias L.PNOA - L.Propio < 2 m	3387	98
Diferencias L.PNOA - L.Propio < 3 m	3402	98
Diferencias L.PNOA - L.Propio < 5 m	3430	99

- FCC: Al hacer la comparación por Tesela entre los valores FCC obtenidos a partir de los datos de Lidar PNOA y los valores obtenidos del análisis del vuelo propio, se observa que hay una sobreestimación de la FCC por parte del Lidar PNOA. Sólo en el 1.7% de las teselas tienen un valor de FCC mayor en el cálculo del vuelo propio que en el vuelo PNOA, y el 15 % de las teselas tienen el mismo valor de FCC calculado con Lidar PNOA y con Lidar Propio.
- El 52% de las teselas tienen una diferencia menor al 5% entre el valor asignado a la FCC de bosque a partir del Lidar PNOA y el valor de FCC del Lidar Propio. (Se incluye tabla con algunos estadísticos)

<b>BOSQUE FCC</b>	Nº Teselas	%
Diferencias L.PNOA - L.Propio < 0 (Nº Teselas FCC de vuelo propio es mayor que la de PNOA)	58	1,7
Diferencias L.PNOA - L.Propio < 50	3456	100
Diferencias L.PNOA - L.Propio < 40	3440	100
Diferencias L.PNOA - L.Propio < 30	3362	97
Diferencias L.PNOA - L.Propio < 20	3093	89
Diferencias L.PNOA - L.Propio < 10	2390	69
Diferencias L.PNOA - L.Propio < 5	1785	52
Diferencias L.PNOA - L.Propio = 0	525	15

- Estructura Vertical:
  - El 88% de las teselas identifican la misma estructura vertical con Lidar PNOA que la calculada con Lidar propio.
  - En 430 teselas no coincide la estructura vertical calculada con Lidar PNOA, con la calculada con el Lidar propio.
- **MDVA\_Completo:** Diferencias entre Lidar PNOA y Lidar Propio, en valores de altura media, FCC y estructura vertical de la vegetación:
  - Altura Media. Al hacer la comparación por Tesela entre los valores de altura media obtenidos a partir de los datos de Lidar PNOA y los valores obtenidos del análisis del vuelo propio, se observa que el 15% de las teselas tiene una diferencia menor a 10cm, el 32% de las teselas tiene una diferencia menor a 20cm y el 78% de las teselas tienen una diferencia menor a 50cm.

- En este caso, el Lidar PNOA hace una infravaloración de la altura media sobre el estrato de Matorral, ya que en el 69% de las teselas es mayor la altura media obtenida con el vuelo propio que con el vuelo PNOA.

<b>VEGETACIÓN Alt.Media</b> (valor absoluto)	Nº Teselas	%
Diferencias L.PNOA - L.Propio < 0,10 m	528	15
Diferencias L.PNOA - L.Propio < 0,20 m	1114	32
Diferencias L.PNOA - L.Propio < 0,30 m	1811	52
Diferencias L.PNOA - L.Propio < 0,50 m	2697	78
Diferencias L.PNOA - L.Propio < 1 m	3291	95
Diferencias L.PNOA - L.Propio < 2 m	3433	99

- FCC: Al hacer la comparación por Tesela entre los valores FCC obtenidos a partir de los datos de Lidar PNOA y los valores obtenidos del análisis del vuelo propio, se observa que hay una sobreestimación de la FCC por parte del Lidar PNOA. Sólo en el 19% de las teselas tienen un valor de FCC mayor en el cálculo del vuelo propio que en el vuelo PNOA, y el 1,1 % de las teselas tienen el mismo valor de FCC calculado con Lidar PNOA y con Lidar Propio.
- El 25% de las teselas tienen una diferencia menor al 5% entre el valor asignado a la FCC de vegetación a partir del Lidar PNOA y el valor de FCC del Lidar Propio. (Se incluye tabla con algunos estadísticos)

<b>VEGETACIÓN FCC</b>	Nº Teselas	%
Diferencias L.PNOA - L.Propio < 0 (Nº Teselas FCC de vuelo propio es mayor que la de PNOA)	659	19
Diferencias L.PNOA - L.Propio < 50	3432	99
Diferencias L.PNOA - L.Propio < 40	3347	97
Diferencias L.PNOA - L.Propio < 30	2960	86
Diferencias L.PNOA - L.Propio < 20	2003	58
Diferencias L.PNOA - L.Propio < 10	1126	33
Diferencias L.PNOA - L.Propio < 5	877	25
Diferencias L.PNOA - L.Propio = 0	38	1,1

- Estructura Vertical:
- El 94% de las teselas identifican la misma estructura vertical con Lidar PNOA que la calculada con Lidar propio.
- En 212 teselas no coincide la estructura vertical calculada con Lidar PNOA, con la calculada con el Lidar propio.

#### **4.3.2 Valoración de los modelos de altura de vegetación generados a partir de los datos Lidar**

Se han generado cinco modelos digitales de altura de vegetación para el Parque nacional de Monfragüe, uno de ellos con toda la información de vegetación (MDAV\_completo), y cuatro modelos de vegetación por estratos, según la definición de alturas definidas en el proyecto (MDAV\_pastos, MDAV\_matorral, MDAV\_Arbusto, MDAV\_bosque).

Al comparar de manera visual los modelos digitales de altura de vegetación con la imagen de la ortofotografía PNOA, se ve que encajan y coinciden perfectamente con la vegetación que aparece en las imágenes, por lo que los cinco modelos digitales generados pueden resultar de gran utilidad tanto para fotointerpretación como para el análisis de parámetros de vegetación,

e incluso permitir la identificación de árboles aislados, a partir del modelo digital de alturas de vegetación del estrato bosque.

#### **4.4 CONCLUSIONES**

Es importante hacer una buena selección del tamaño del píxel para generar los modelos digitales necesarios para el análisis Lidar, ya que está directamente relacionado con los resultados obtenidos. Cuanto mayor sea el tamaño del píxel, mayor será la interpolación a realizar para dotarle de valor Z en el modelo digital, por lo que los modelos digitales pueden tener datos distorsionados.

Tras el estudio realizado, se concluye que el tamaño de píxel de 2m es el adecuado para la generación de los modelos digitales.

Los modelos digitales de altura de la vegetación generados se adaptan por lo general bien a la vegetación vista en la ortofotografía, la información Lidar hace posible la identificación con bastante precisión de las cotas superiores de la vegetación (estrato bosque), aunque hay que destacar que para los estratos de vegetación más baja, las diferencias con la orto son mayores, esto puede ser debido a la precisión altimétrica del Lidar, y a la no revisión de la clasificación automática, ya que puede ocurrir que puntos clasificados como pastizal en realidad sea suelo, y viceversa, produciendo así una sobreestimación del estrato de pastizal.

Las diferencias, tanto en altura de vegetación como en FCC, entre los resultados obtenidos con Lidar PNOA y el Lidar propio, están claramente relacionadas con el tamaño del píxel de los MDAV, el cual está ligado a la densidad de puntos Lidar. A mayor densidad de puntos, el tamaño de píxel para los MDAV puede ser menor y se consigue mayor precisión en los datos, pues la interpolación de la información a asignar al MD es menor. Otro factor a tener en cuenta, y otra línea de estudio, sería valorar el número de puntos Lidar que hay en cada píxel (a menor nº de puntos Lidar en un píxel, mayor interpolación de los datos), lo que permitiría dotar de diferente peso a cada uno de los píxeles y así ajustar más el cálculo de las variables de vegetación.

En todos los estratos las diferencias en altitud se encuentran entre 10-20cm, menos en el estrato bosque donde estas diferencias llegaban hasta los 50cm, siendo los datos obtenidos de PNOA menores que los del vuelo propio.

En los valores de FCC de PNOA, todos los estratos menos pastizal, tienen una sobreestimación de entre un 5% y un 30% de los valores de FCC obtenidos con el Lidar, debido principalmente al tamaño del píxel. En el pastizal estos valores son mayores llegando hasta casi el 50%, esto puede deberse fundamentalmente a la precisión altimétrica del Lidar y la falta de depuración de la clasificación automática.

En cuanto al cálculo de la estructura vertical de la vegetación, cabe destacar la similitud entre los resultados obtenidos con Lidar PNOA y Lidar propio.

Los modelos digitales obtenidos en el estudio pueden ser de gran utilidad para el control de la vegetación en un futuro, y aunque con una mayor densidad de puntos Lidar, los resultados son mucho más precisos, los datos PNOA de libre distribución y gratuitos, proporcionan unos buenos resultados para obtener parámetros de vegetación y representación de la misma.

#### 4.5 ANEXO. Imágenes comparación LiDAR

Imágenes que muestran la comparación de datos Lidar con distinta resolución: Lidar PNOA (0.5 ptos/m<sup>2</sup>), Lidar vuelo propio (5ptos/m<sup>2</sup>), Lidar vuelo propio alta densidad (40ptos/m<sup>2</sup>).

La simbología empleada en todas las imágenes que a continuación se incluyen es: puntos suelo representados en color Siena, puntos de vegetación, representados en color verde.

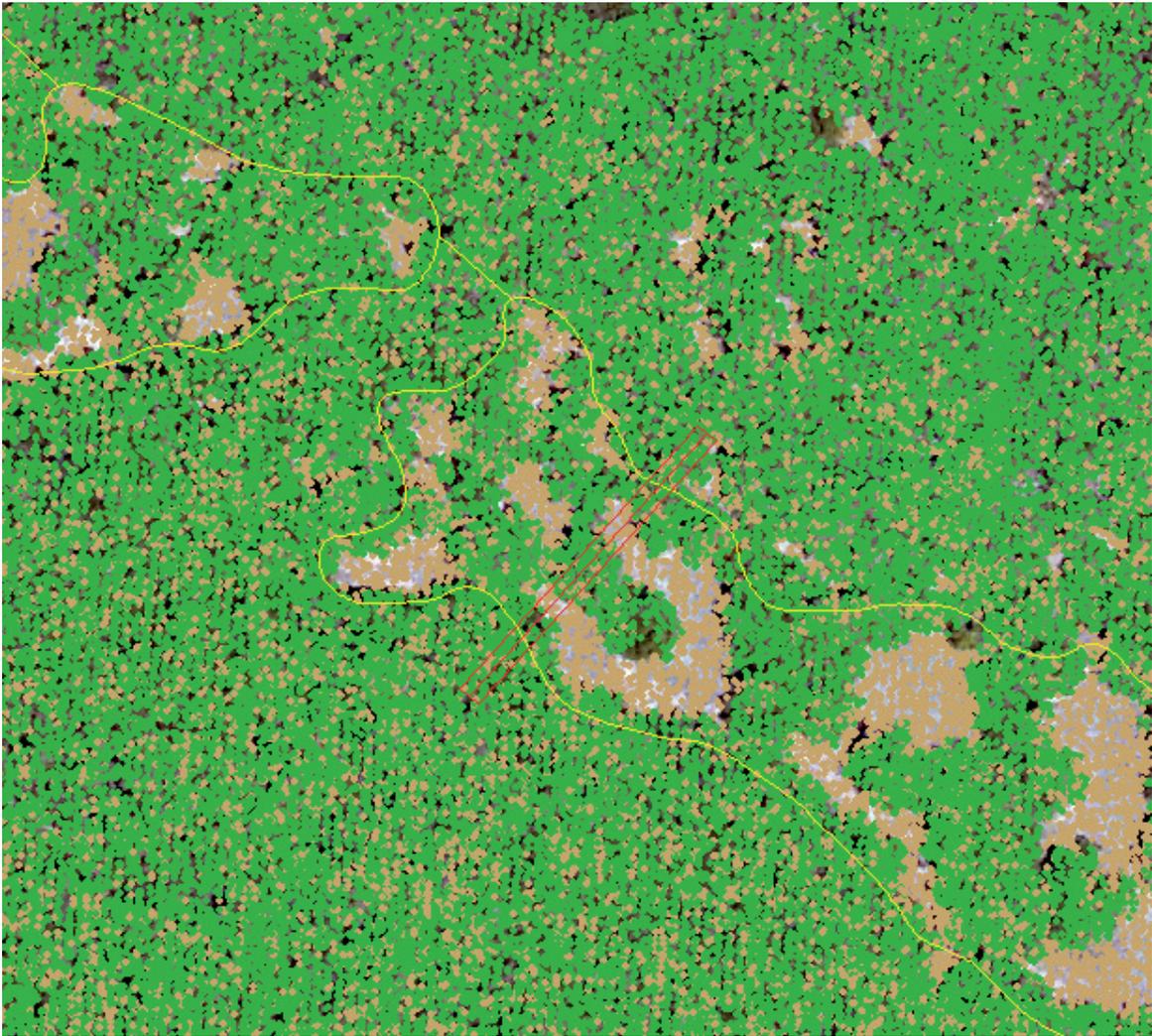
##### ZONA 1.

- ORTO



Localización: 259534,858 4403044,632 Meters

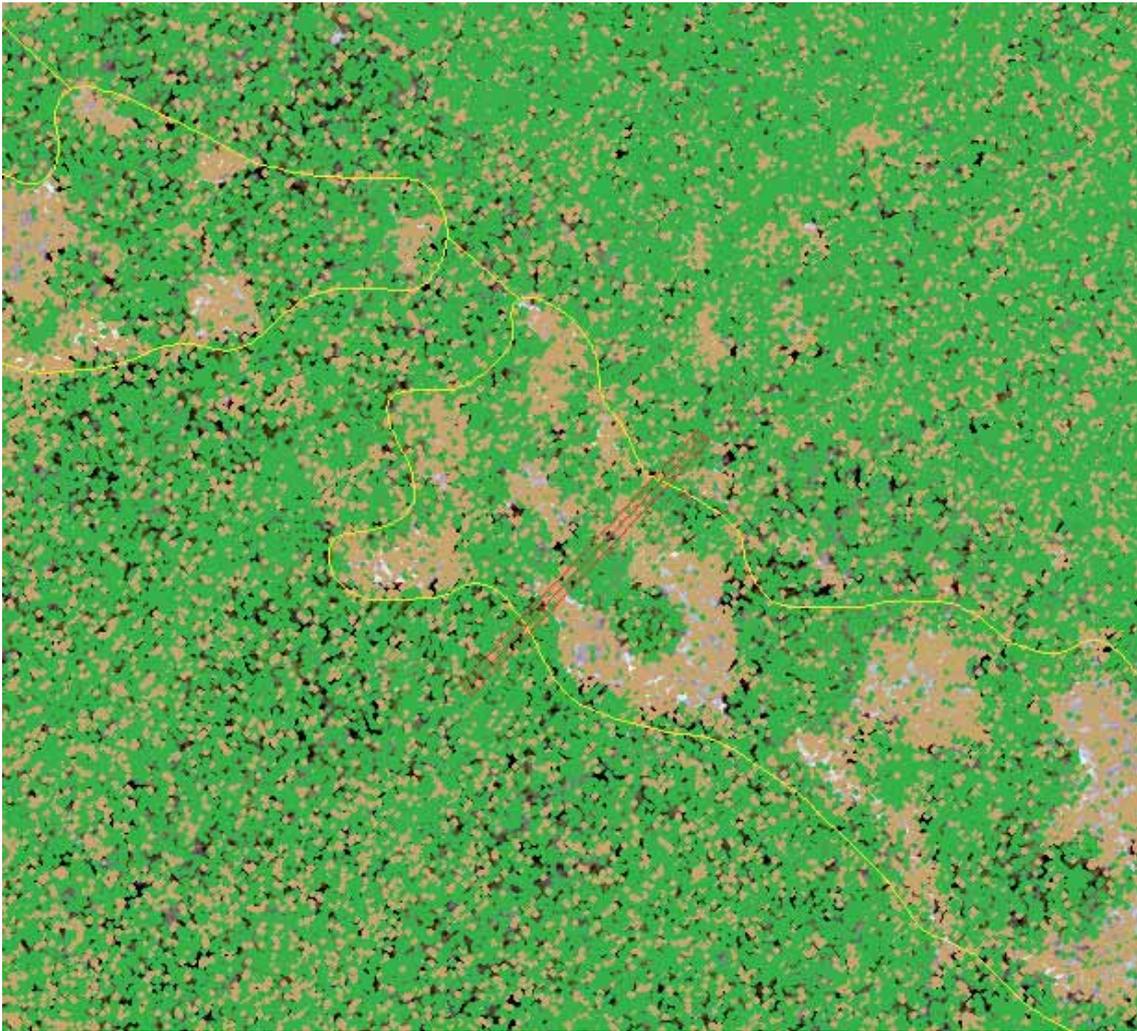
- LIDAR PNOA (sobre orto PNOA)



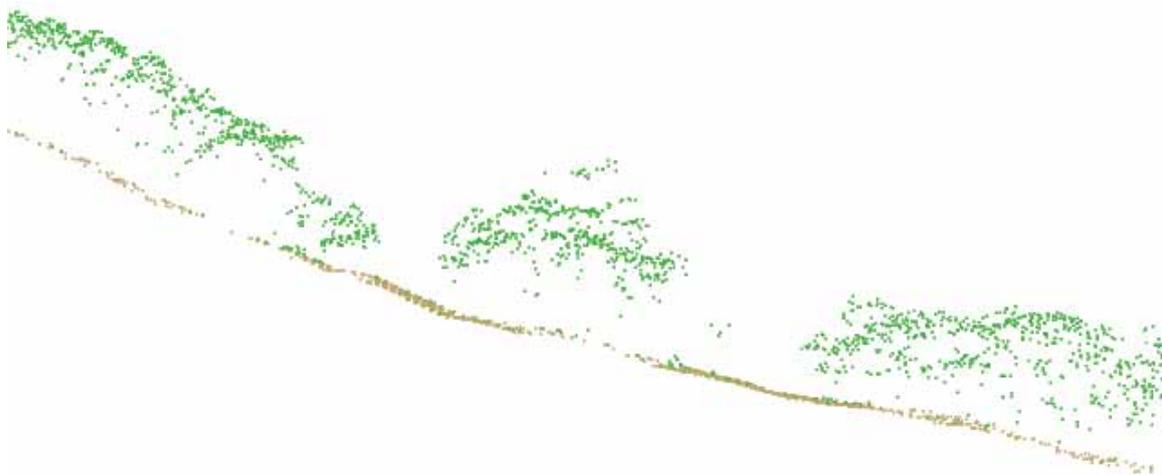
Perfil:



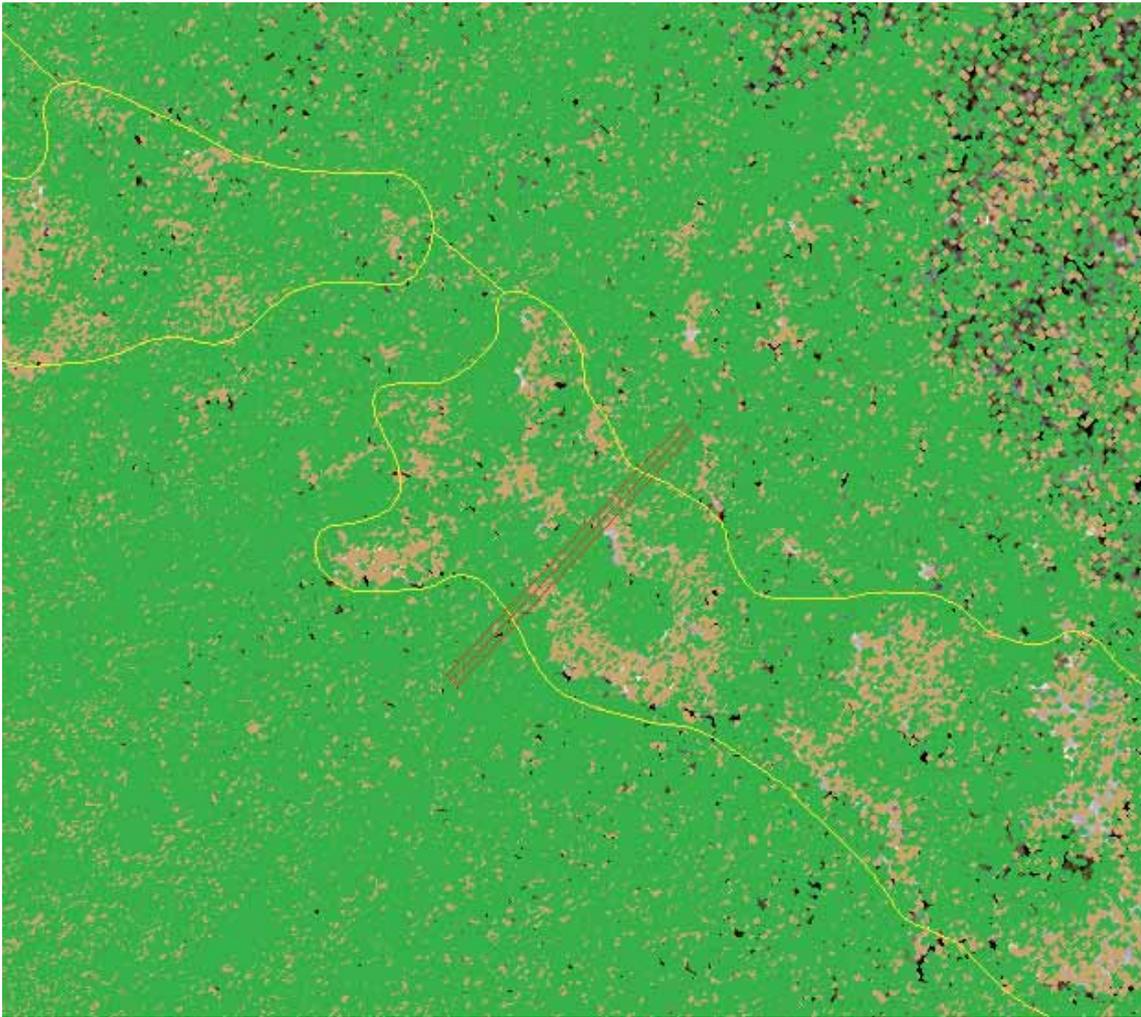
- LIDAR vuelo propio 5ptos/m2 (sobre orto PNOA)



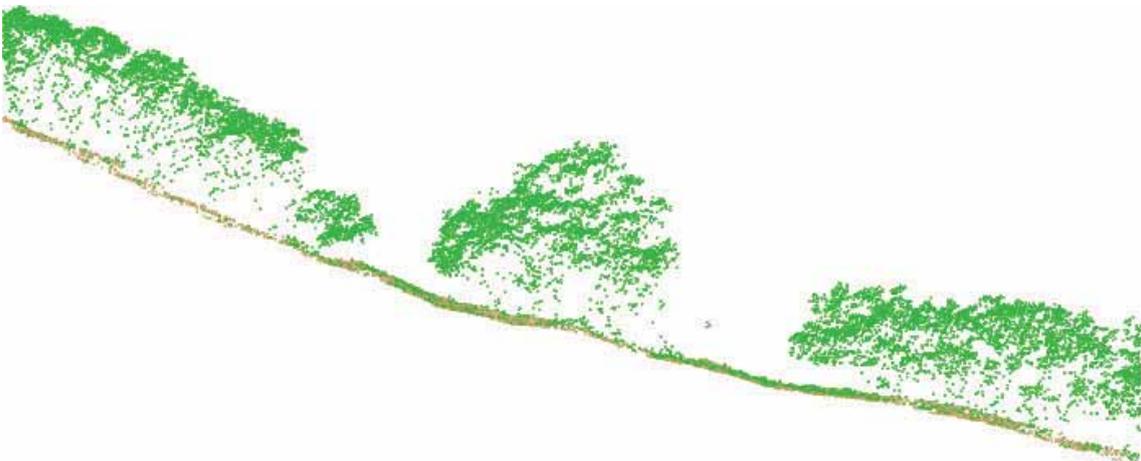
Perfil:



- LIDAR vuelo propio 40ptos/m2 (sobre orto PNOA)

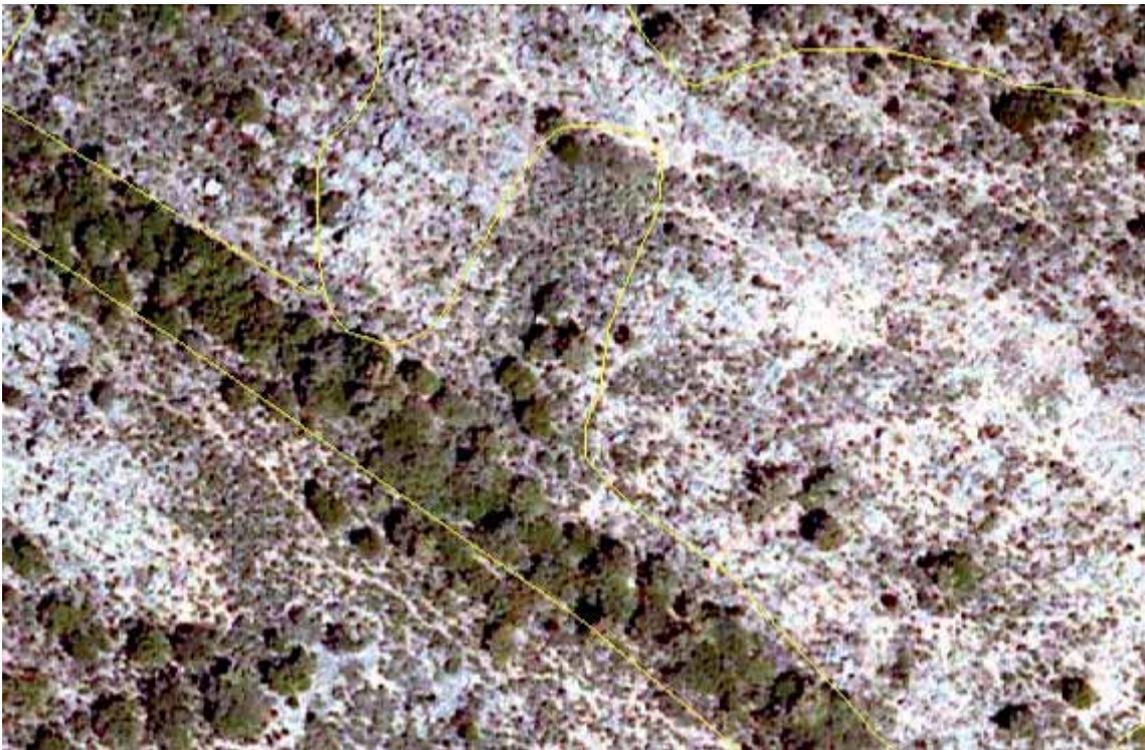


Perfil:



**ZONA 2.**

- ORTO



259432,888 4402629,495 Meters

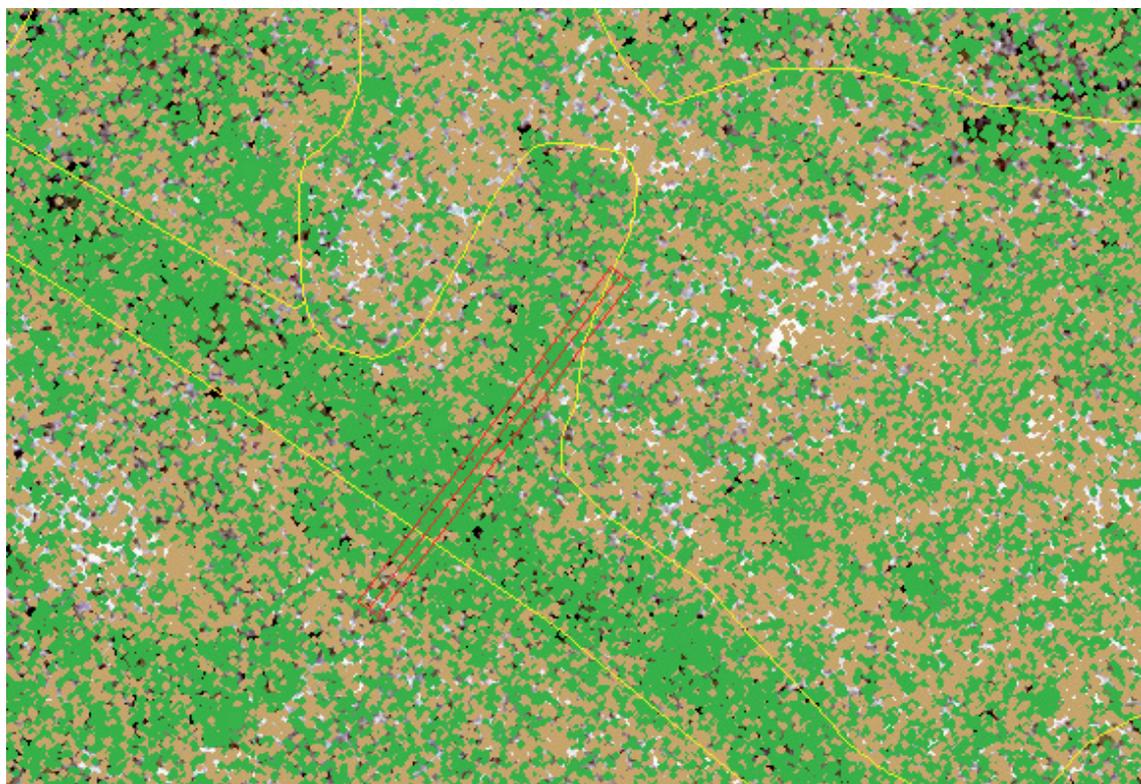
- LIDAR PNOA



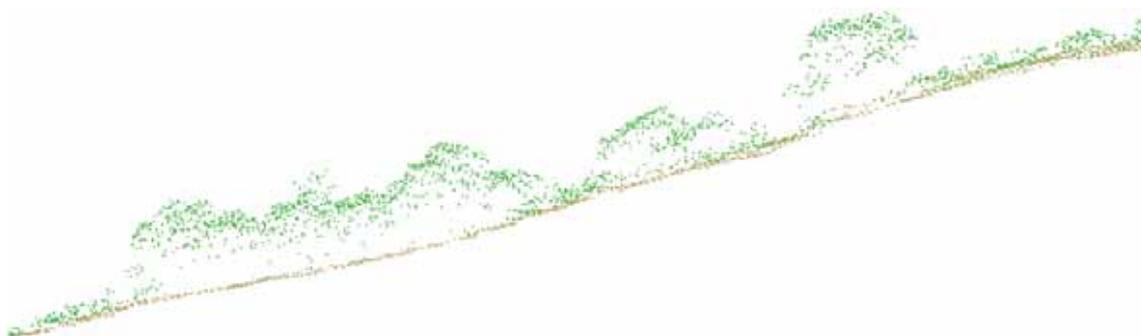
Perfil:



- LIDAR vuelo propio 5ptos/m2



Perfil:



- LIDAR vuelo propio 40ptos/m2



Perfil:



**ZONA 3.**

- ORTO

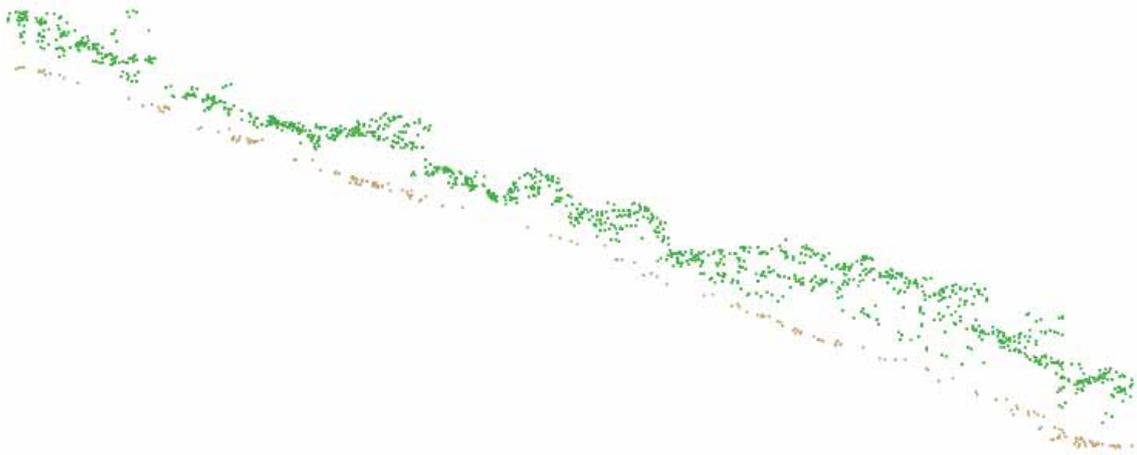


257841,558 4404571,741 Meters

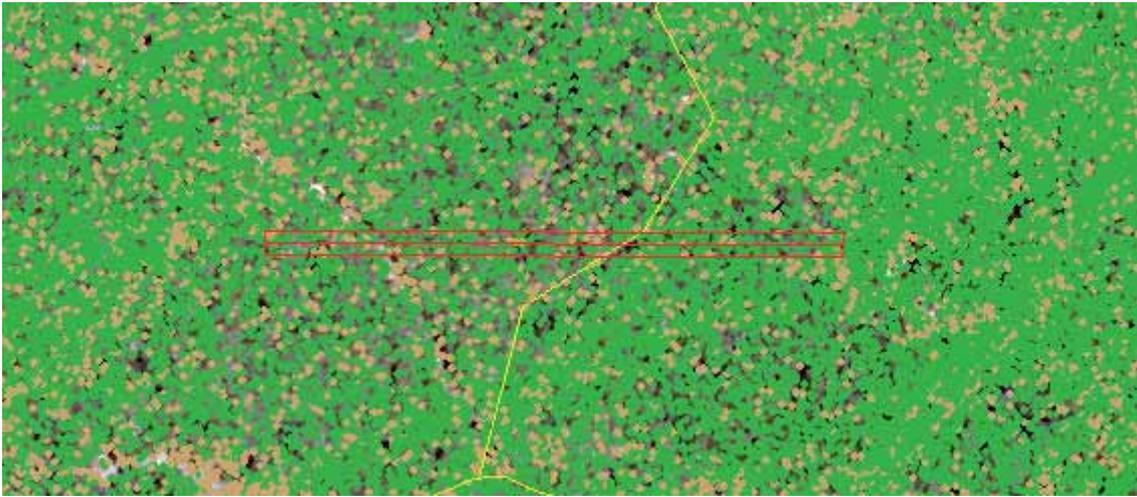
- LIDAR PNOA



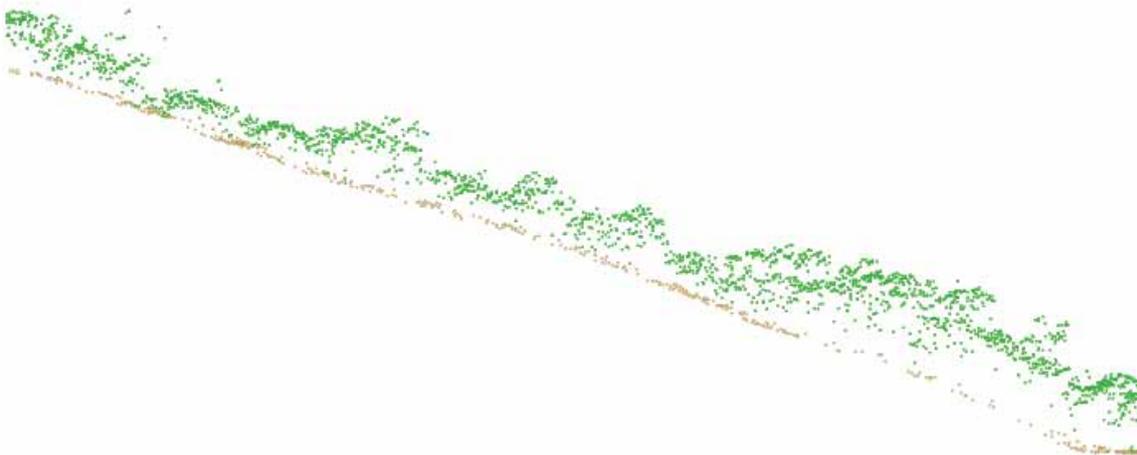
Perfil:



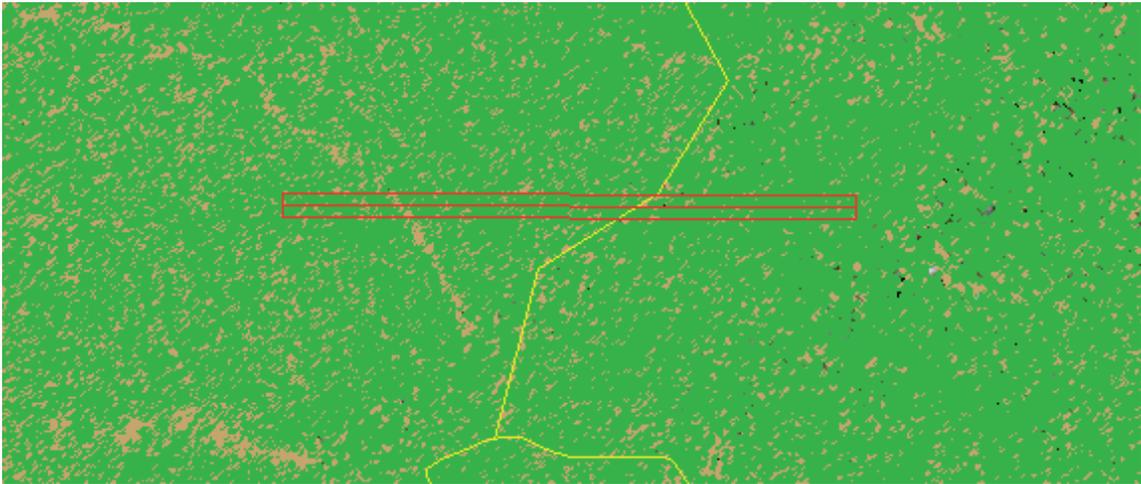
- LIDAR vuelo propio 5ptos/m2



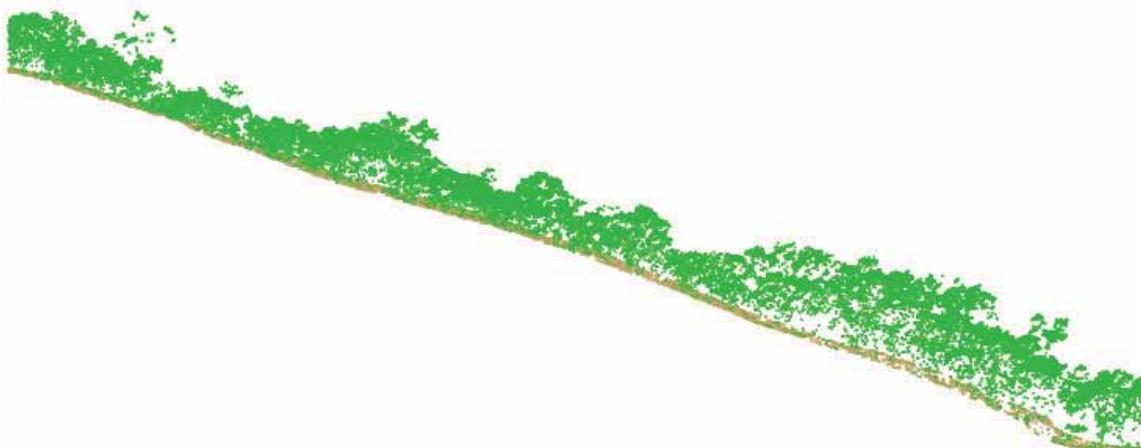
Perfil:



- LIDAR vuelo propio 40ptos/m2



Perfil:



**ZONA 4.**

- ORTO

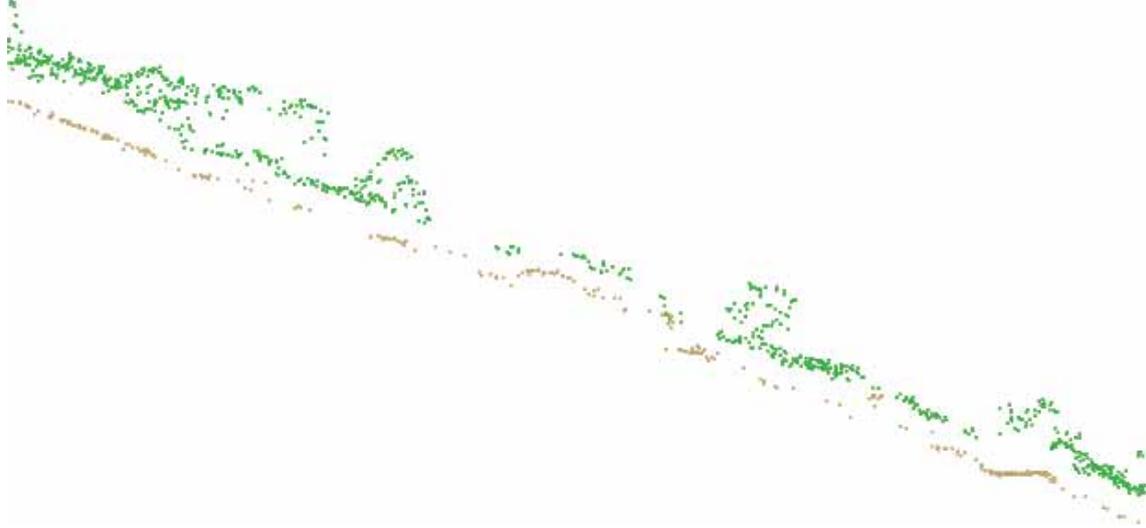


261464,205 4401489,898 Meters

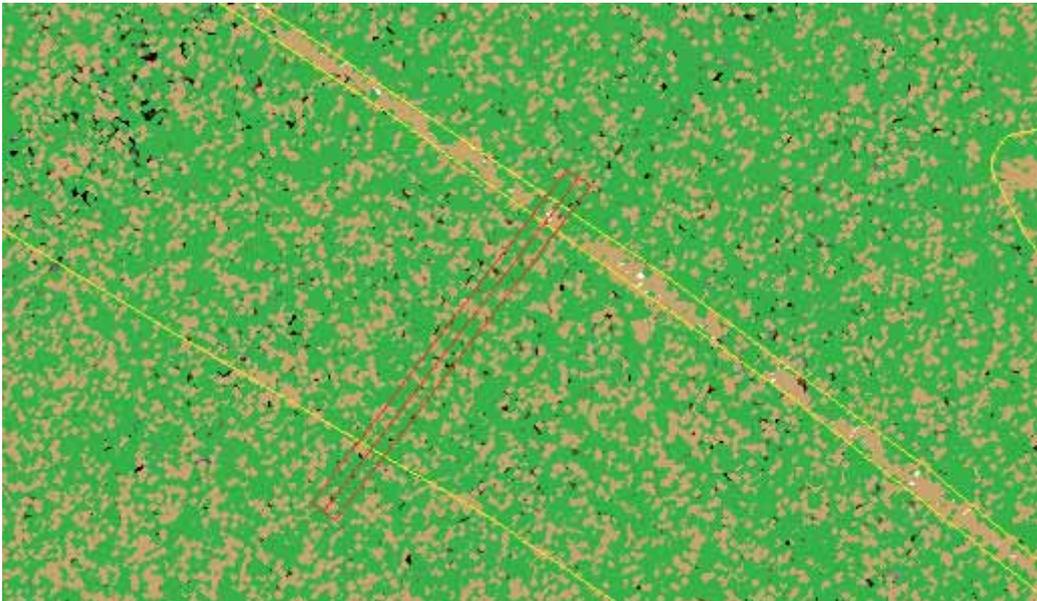
- LIDAR PNOA



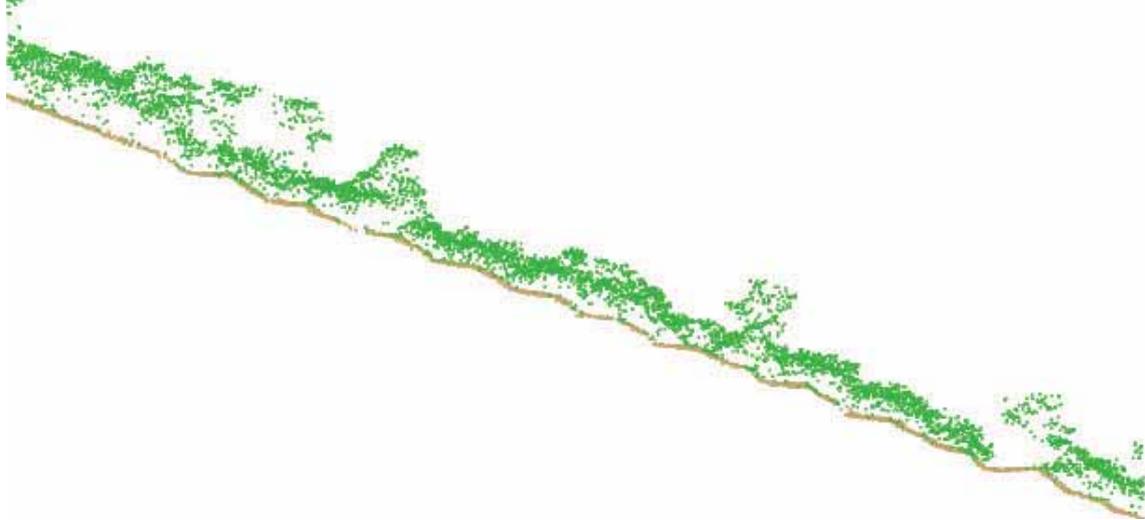
Perfil:



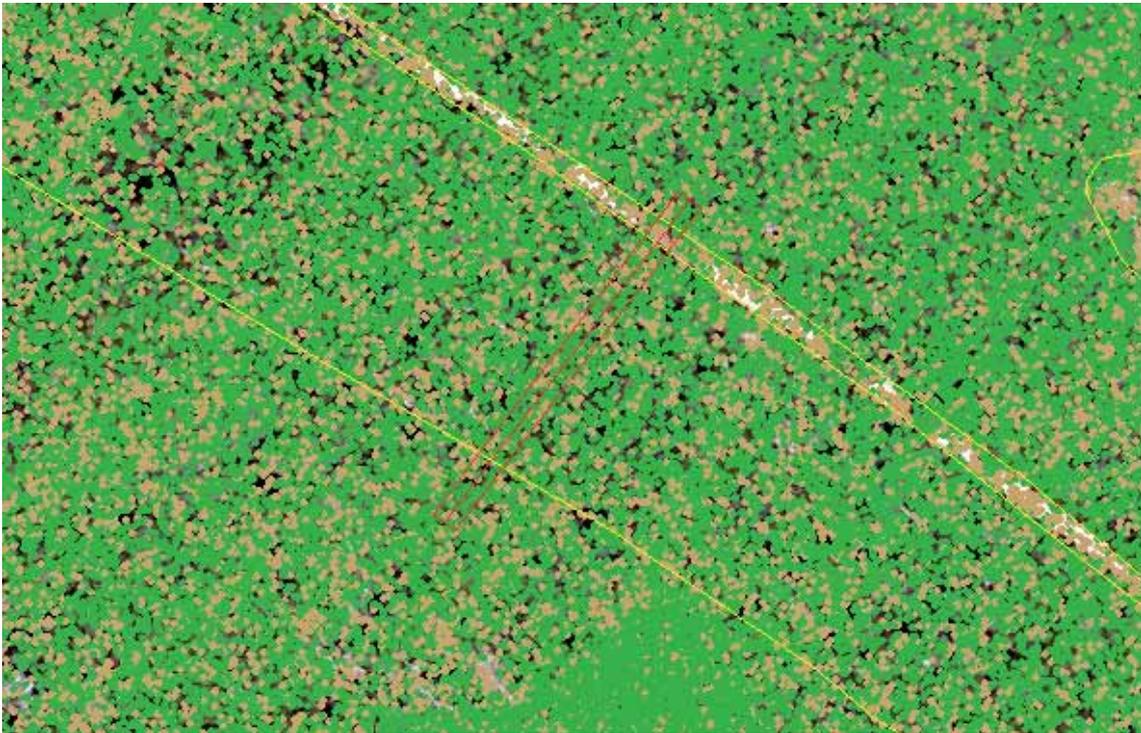
- LIDAR vuelo propio 5ptos/m2



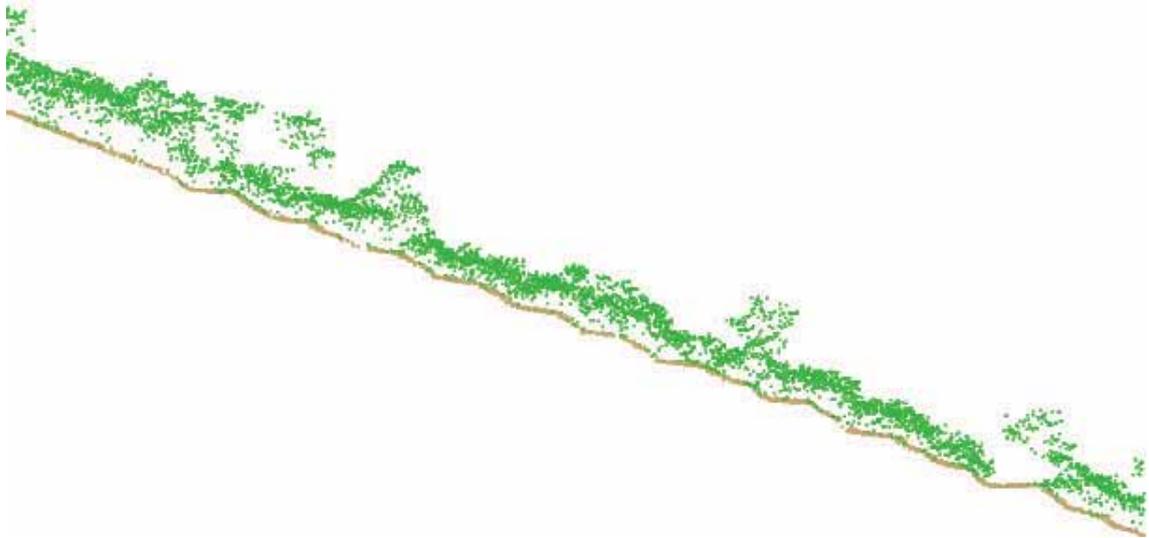
Perfil:



- LIDAR vuelo propio 40ptos/m2



Perfil:



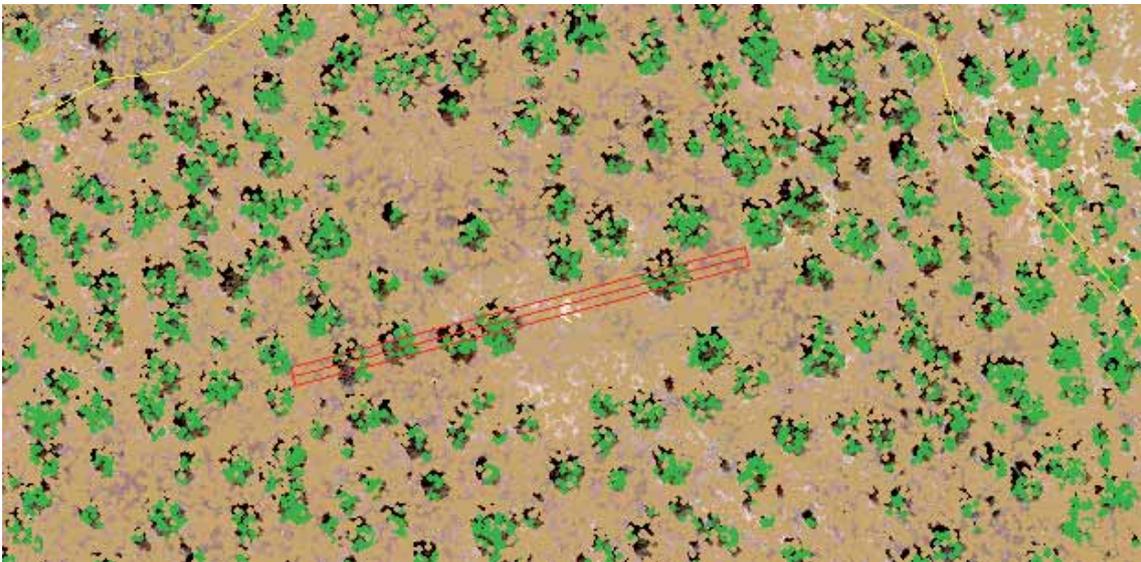
**ZONA 5.**

- ORTO



251175,412 4413094,856 Meters

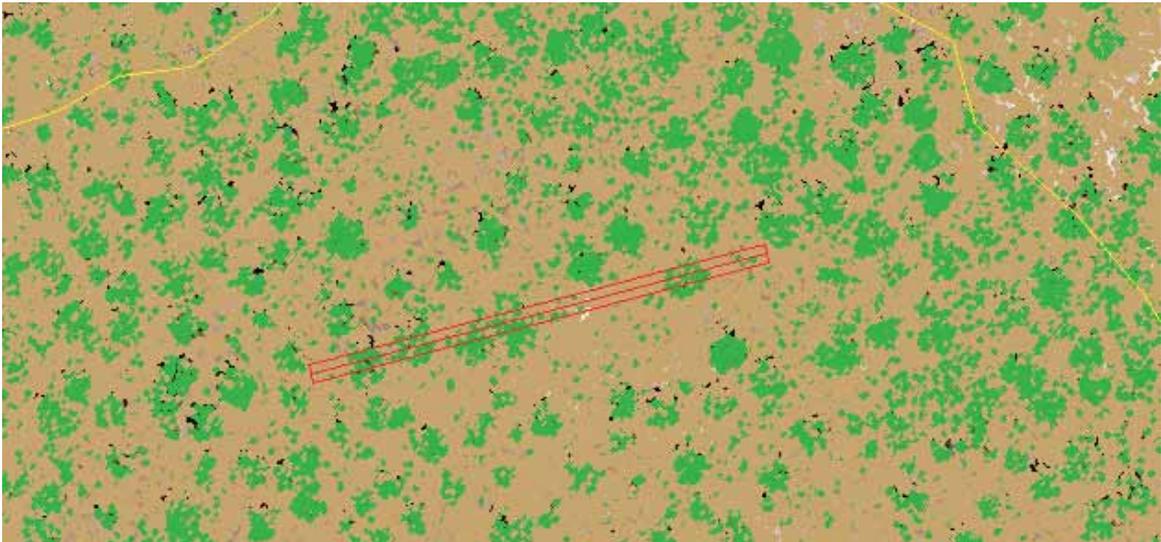
- LIDAR PNOA



Perfil:



- LIDAR vuelo propio 5ptos/m2



Perfil:

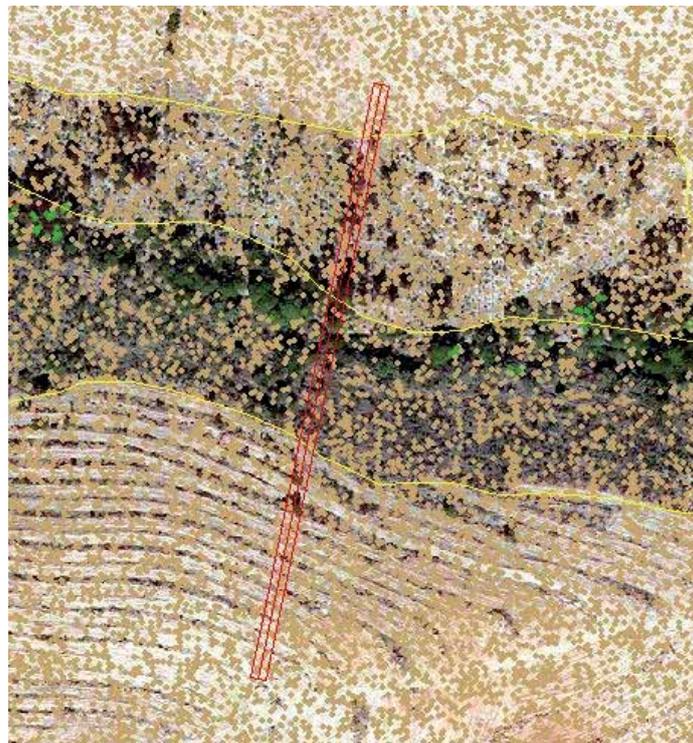


**ZONA 6.**

- ORTO



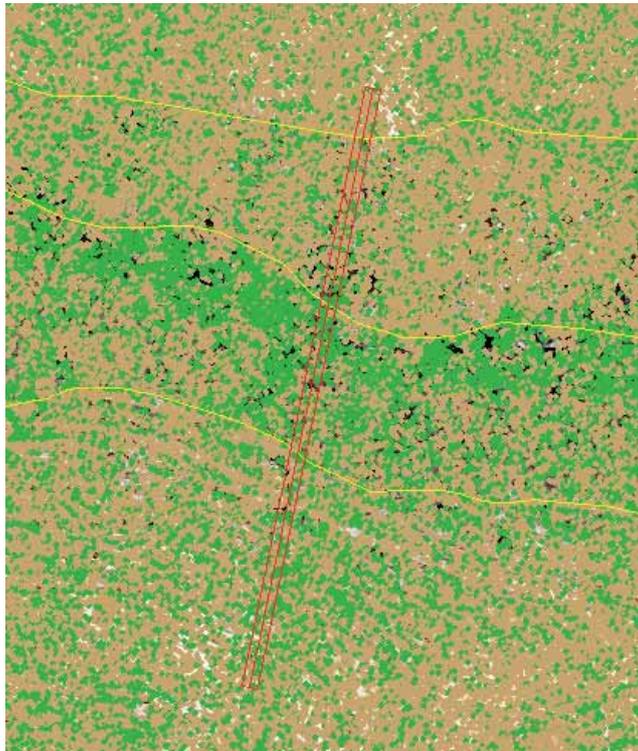
- LIDAR PNOA



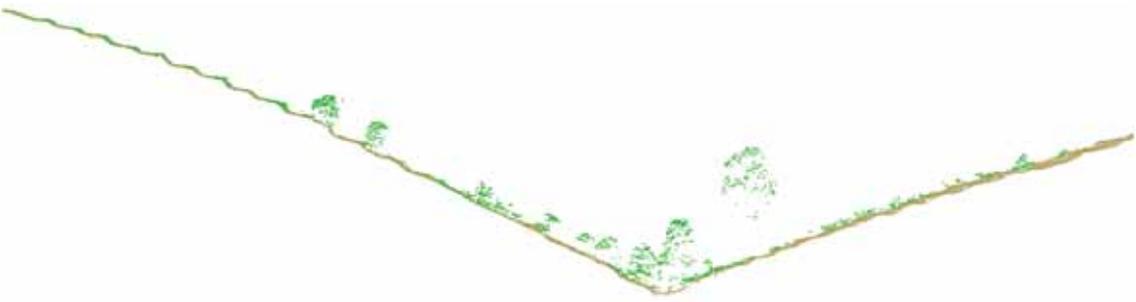
Perfil:



- LIDAR vuelo propio 5ptos/m2



Perfil:



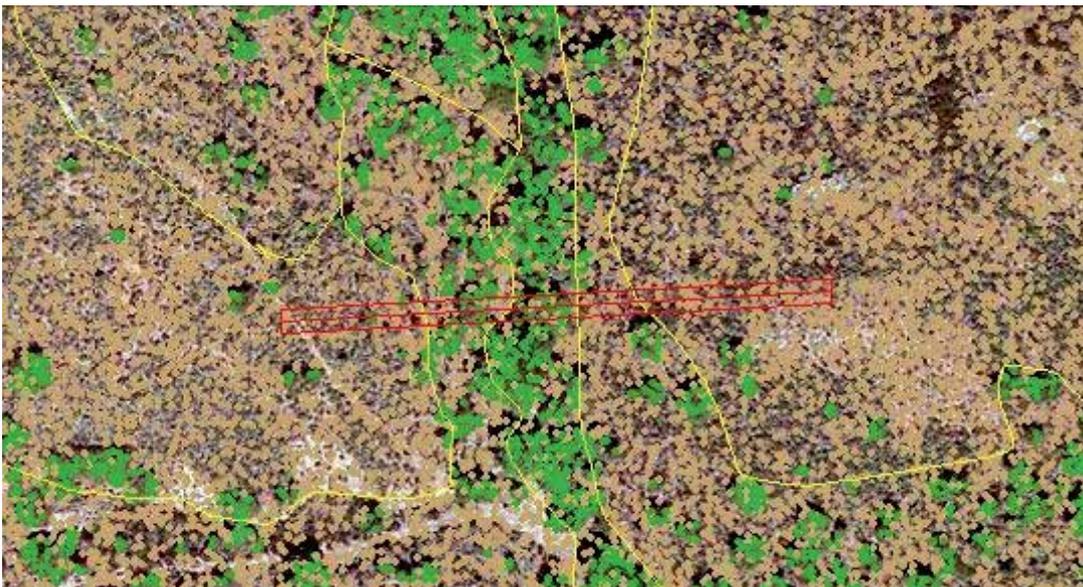
**ZONA 7.**

- ORTO



243079,923 4413214,363 Meters

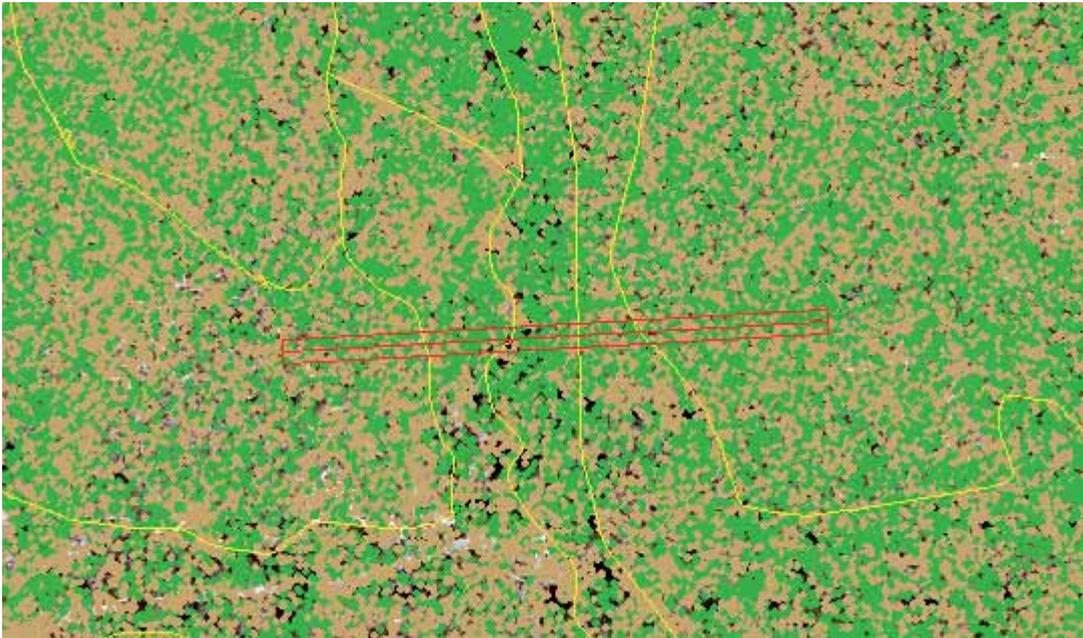
- LIDAR PNOA



Perfil:



- LIDAR vuelo propio 5ptos/m2

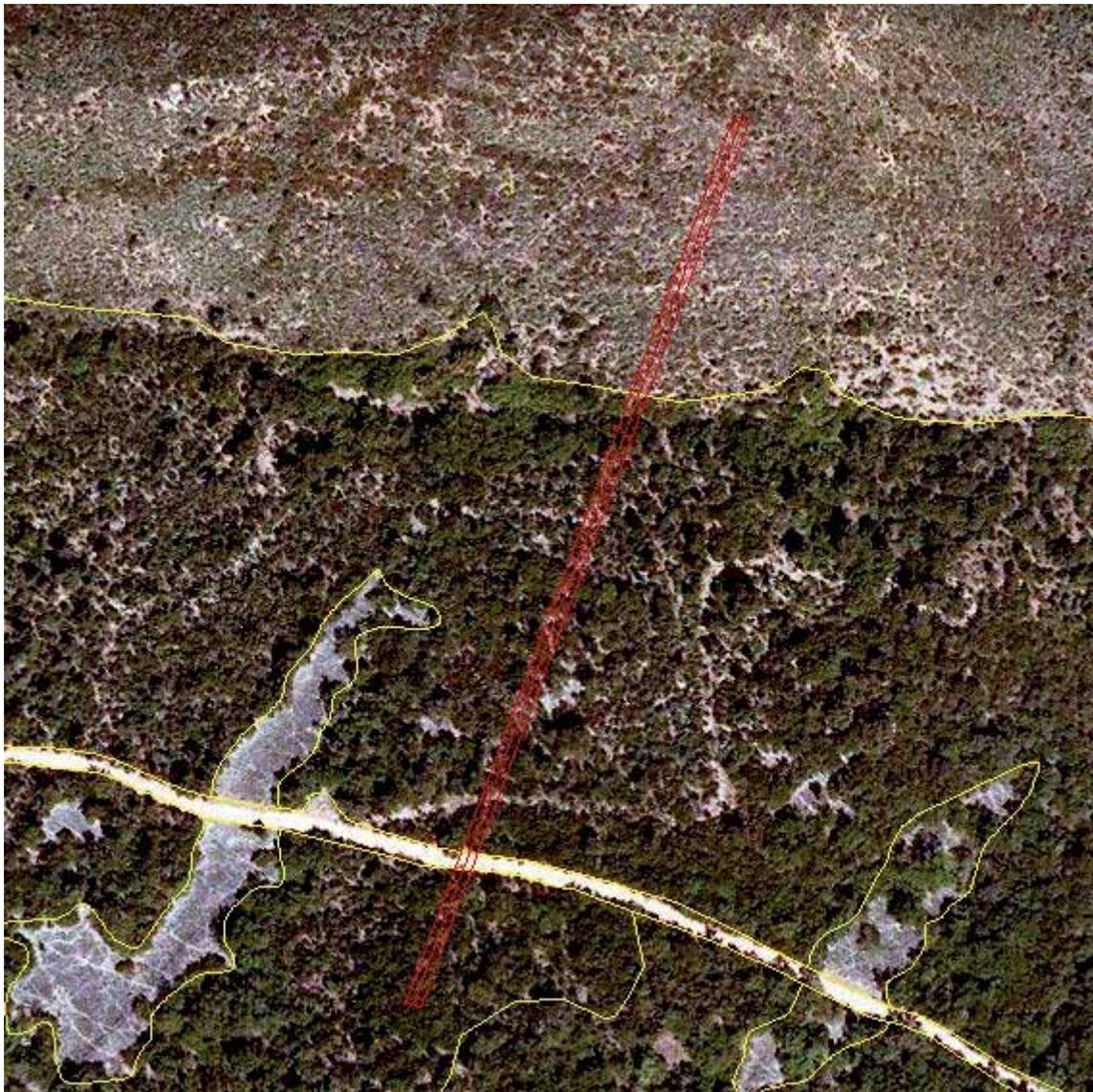


Perfil:



**ZONA 8.**

- ORTO

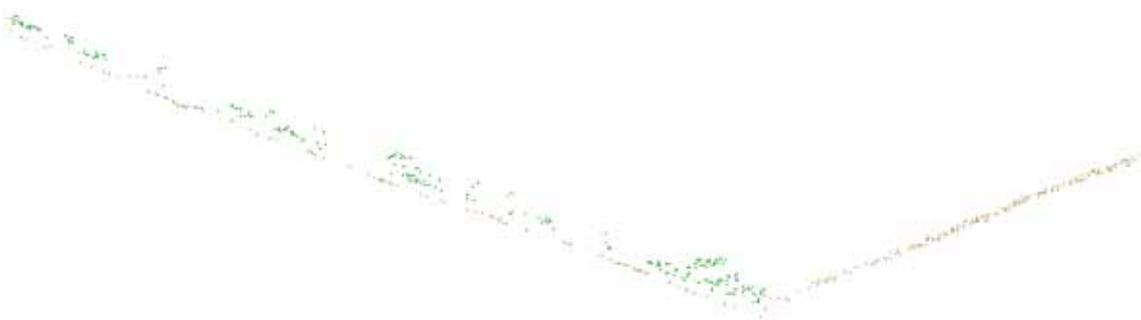


751062,962 4413624,654 Meters

- LIDAR PNOA



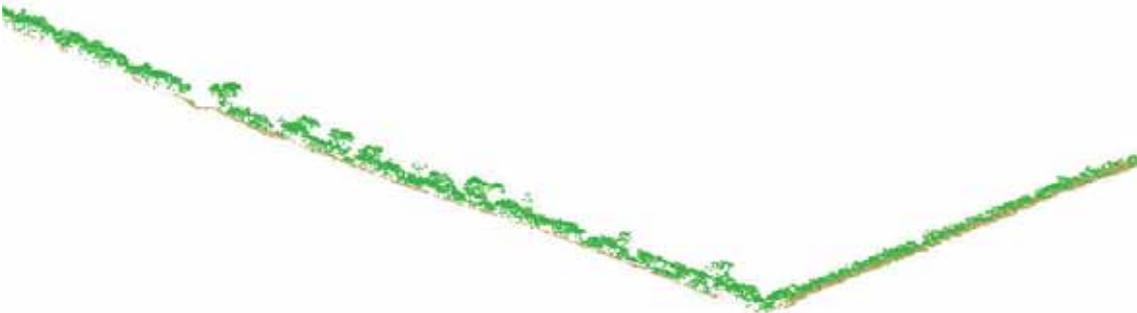
Perfil:



- LIDAR vuelo propio 5ptos/m2



Perfil:



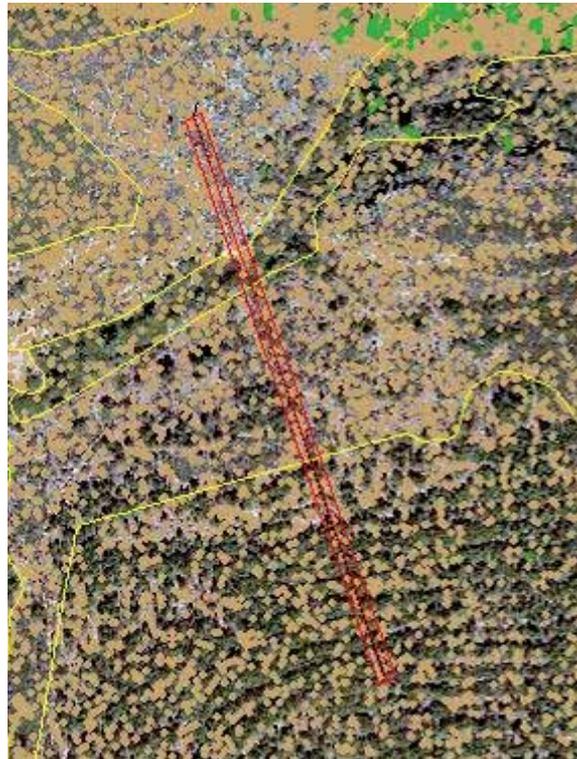
**ZONA 9.**

- ORTO



235639,999 4417522,344 Meters

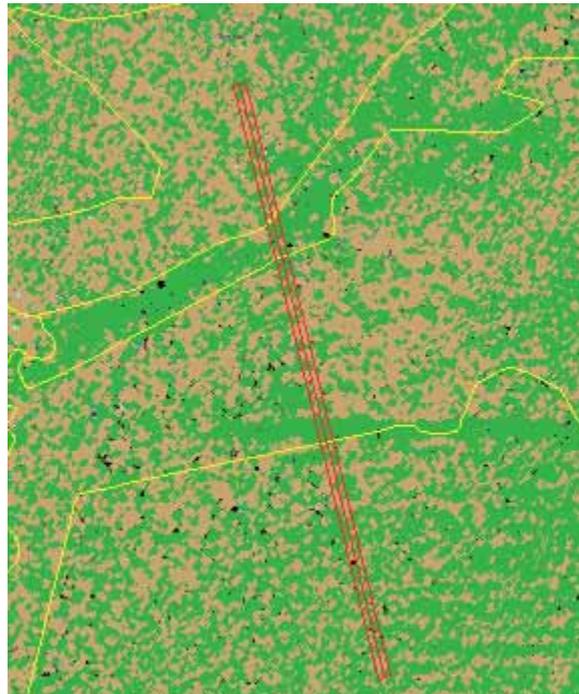
- LIDAR PNOA



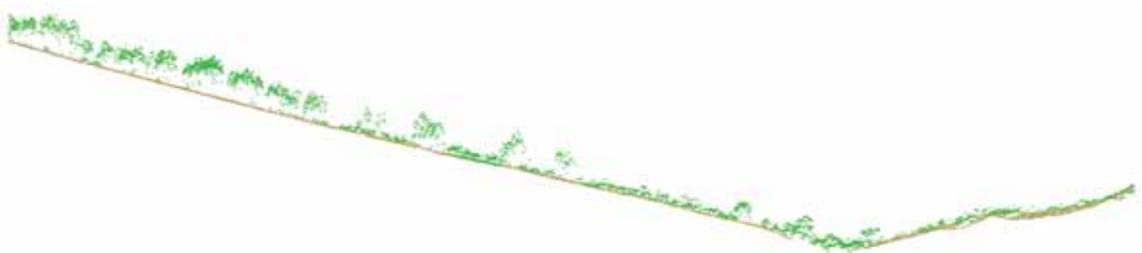
Perfil:



- LIDAR vuelo propio 5ptos/m2



Perfil:



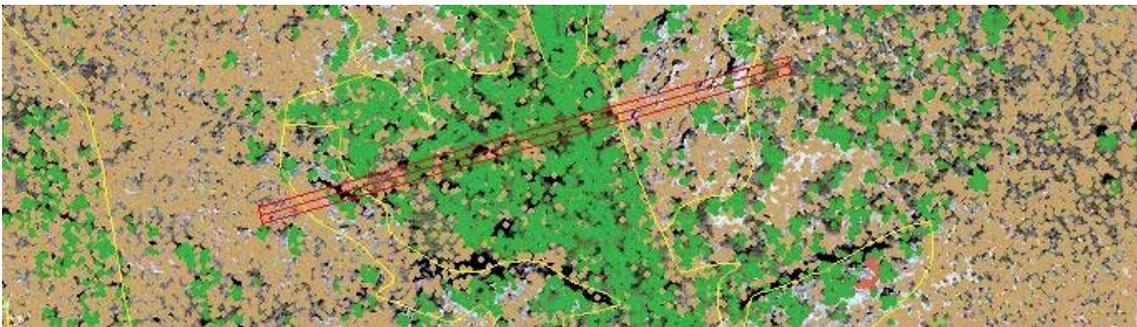
**ZONA 10.**

- ORTO

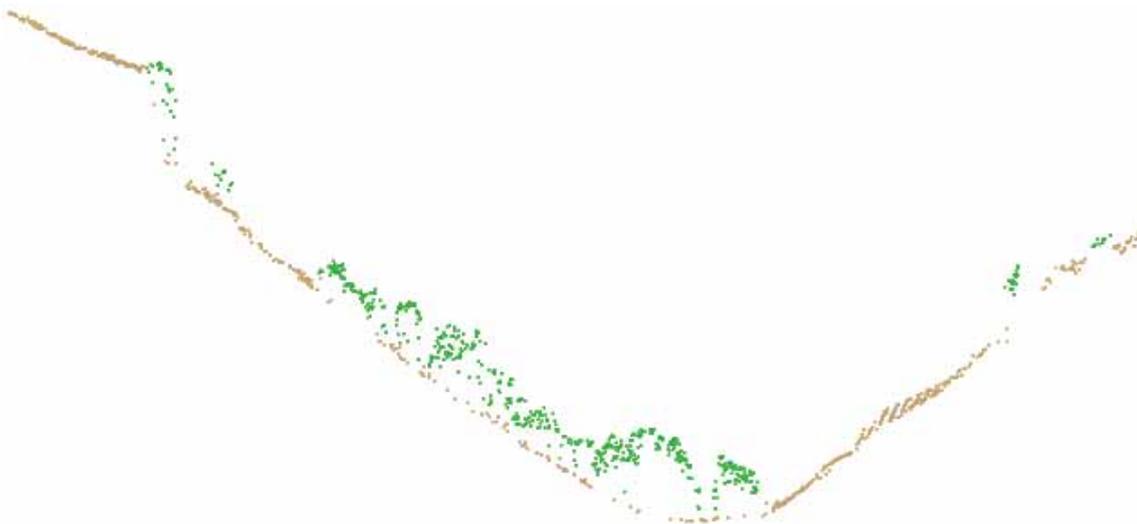


748669,25 4417510,549 Meters

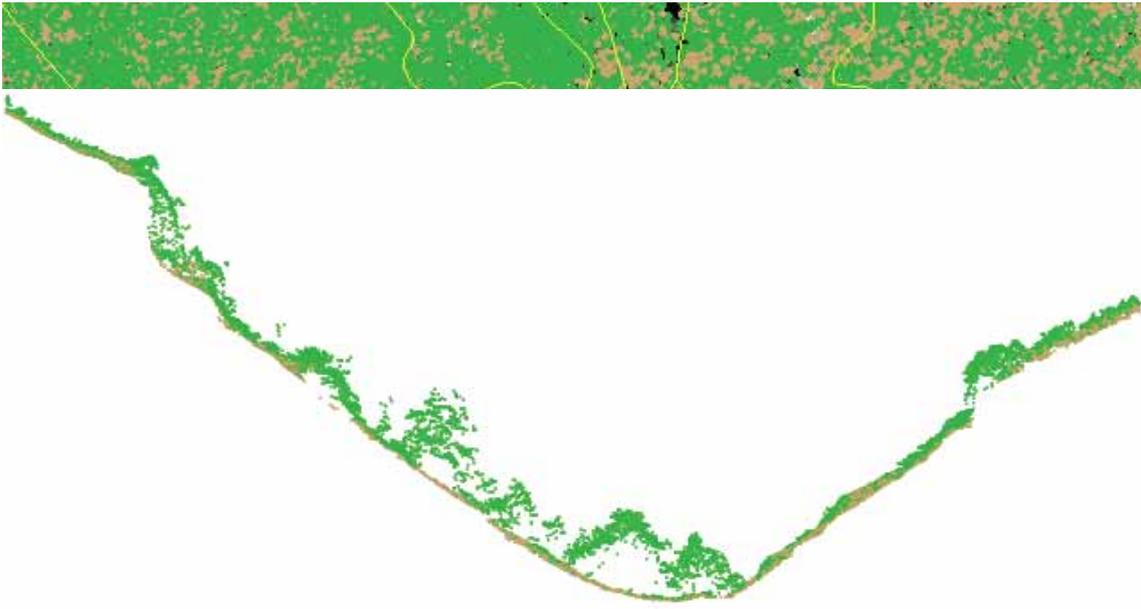
- LIDAR PNOA



Perfil:



- LIDAR vuelo propio 5ptos/m2



## 5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andersen, H.-E., McGaughey, R.J., & Reutebuch, S.E. (2005). Estimating forest canopy fuel parameters using LIDAR data. *Remote Sensing of Environment*, 94, 441-449
- Andersen, H.E., Reutebuch, S.E., & McGaughey, R.J. (2006). A rigorous assessment of tree height measurements obtained using airborne lidar and conventional field methods. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 32, 355-366
- Baltsavias, E.P. (1999). Airborne laser scanning: basic relations and formulas. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 54, 199-214
- Brokaw, N.V.L., & Lent, R.A. (Eds.) (1999). *Vertical structure*: Hunter, M.L. (Ed.), Maintaining biodiversity in forest ecosystems (pp.373-399). Cambridge, UK: Cambridge University Press
- Coren, F., & Sterzai, P. (2006). Radiometric correction in laser scanning. *International Journal of Remote Sensing*, 27, 3097-3104
- Danson, F.M., Hetherington, D., Morsdorf, F., Koetz, B., & Allgöwer, B. (2007). Forest Canopy Gap Fraction From Terrestrial Laser Scanning. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 4, 157-160
- Dubayah, R., & Drake, J.B. (2000). Lidar Remote Sensing for Forestry Applications. *Journal of Forestry*, Volume 98, Number 6, 1 June 2000, pp. 44-46
- Frazer, G., Trofymow, J., & Lertzman, K. (1997). A method for estimating canopy openness, effective leaf area index and photosynthetically active photon flux density using hemispherical photography and computerized image analysis techniques. In. Tech. rep., Information Report BC-X-373, Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Pacific Forestry Centre, Victoria, BC
- García, M., Danson, F.M., Riaño, D., Chuvieco, E., Ramirez, F.A., & Bandugula, V. (2011b). Terrestrial laser scanning to estimate plot-level forest canopy fuel properties. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13, 636-645
- García, M., Riaño, D., Chuvieco, E., & Danson, F.M. (2010). Estimating biomass carbon stocks for a Mediterranean forest in Spain using height and intensity LiDAR data. *Remote Sensing of Environment*, 114, 816-830
- García, M., Riaño, D., Chuvieco, E., Salas, F.J., & Danson, F.M. (2011). Multispectral and LiDAR data fusion for fuel type mapping using Support Vector Machine and decision rules. *Remote Sensing of Environment*, 115, 1369-1379
- Gaveau, D.L.A., & Hill, R.A. (2003). Quantifying canopy height underestimation by laser pulse penetration in small-footprint airborne laser scanning data. *Canadian Journal of Forest Research*, 29, 650-657
- Harding, D.J., Lefsky, M.A., Parker, G.G., & Blair, J.B. (2001). Laser altimeter canopy height profiles: methods and validation for closed-canopy, broadleaf forests. *Remote Sensing of Environment*, 76, 283-297

- Höfle, B., & Pfeifer, N. (2007). Correction of laser scanning intensity data: Data and model-driven approaches. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 62, 415-433
- Holmgren, J., Johansson, F., Olofsson, K., Olsson, H., & Glimskär, A. (2008). Estimation of crown coverage using airborne laser scanning. In Hill, R., Rosette, J. & Suárez, J. (Eds.) *8th international conference on LiDAR applications in forest assessment and inventory. SilviLaser*. Heriot-Watt University, Edinburgh, UK, pp. 50-57
- Hollaus, M., Wagner, W., Eberhöfer, C., & Karel, W. (2006). Accuracy of large-scale canopy heights derived from LiDAR data under operational constraints in a complex alpine environment. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 60, 323-338
- Hopkinson, C., & Chasmer, L. (2009). Testing LiDAR models of fractional cover across multiple forest ecozones. *Remote Sensing of Environment*, 113, 275-288
- Huising, E.J., & Gomes Pereira, L.M. (1998). Errors and accuracy estimates of laser data acquired by various laser scanning systems for topographic applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 53, 241-261
- Hyyppä, I., Hyyppä, H., Litkey, P., Yu, X., Haggrén, H., Ronnholm, P., Pyysalo, U., Pitkanen, J., & Maltamo, M. (2004). Algorithms and methods of airborne laser-scanning for forest measurements. In M. Thies, B. Koch, H. Spiecker, & H. Weinacker (Eds.), *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing, and the Spatial Information Sciences, Vol. XXXVI-w2*.
- Hyyppä, J., & Inkinen, M. (1999). Detecting and estimating attributes for single trees using laser scanner. *The Photogrammetric Journal of Finland*, 16, 27-42
- Hyyppä, J., Kelle, O., Lehikoinen, M., & Inkinen, M. (2001). A Segmentation-Based Method to Retrieve Stem Volume Estimates from 3-D Tree Height Models Produced by Laser Scanners. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39, 969 - 975
- Leckie, D., Gougeon, F., Hill, D., R., Q., Armstrong, L., & R., S. (2003). Combined high-density lidar and multispectral imagery for individual tree crown analysis. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 29, 633-649
- Lefsky, M.A., Cohen, W.B., Acker, S.A., Parker, G.G., Spies, T.A., & Harding, D. (1999). Lidar Remote Sensing of the Canopy Structure and Biophysical Properties of Douglas-Fir Western Hemlock Forests. *Remote Sensing of Environment*, 70, 339-361
- Lim, K., Treitz, P., Wulder, M., St-Onge, B., & Flood, M. (2003). LiDAR remote sensing of forest structure. *Progress in Physical Geography*, 27, 88-106
- Lin, Y., Jaakkola, A., Hyyppä, J., & Kaartinen, H. (2010). From TLS to VLS: Biomass Estimation at Individual Tree Level. *Remote Sensing*, 2, 1864-1879;doi:1810.3390/rs2081864
- Lovell, J.L., Jupp, D.L.B., Culvenor, D.S., & Coops, N.C. (2003). Using airborne and ground-based ranging lidar to measure canopy structure in Australian forests. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 29, 607-622

- Maas, H.-G. (2001). On the use of reflectance data for laserscanner strip adjustment. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34, 53-56
- Maier, B., Tiede, D., & Dorren, L. (2008). Characterising Mountain Forest Structure using Landscape metrics on LiDAR-based Canopy Surface Models. In T. Blaschke, S. Lang, & G. Hay (Eds.), *Object-Based Image Analysis - Spatial concepts for knowledge-driven remote sensing applications*. Berlin: Springer, 625-643
- Maltamo, M., Eerikainen, K., Pitkanen, J., Hyyppa, J., & Vehmas, M. (2004). Estimation of timber volume and stem density based on scanning laser altimetry and expected tree size distribution functions. *Remote Sensing of Environment*, 90, 319-330
- Mallet, C., & Bretar, F. (2009). Full-waveform topographic lidar: State-of-the-art. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64, 1-16
- Morsdorf, F., Kotz, B., Meier, E., Itten, K.I., & Allgower, B. (2006). Estimation of LAI and fractional cover from small footprint airborne laser scanning data based on gap fraction. *Remote Sensing of Environment*, 104, 50-61
- Næsset, E. (1997). Determination of mean tree height of forest stands using airborne laser scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 52, 49-56
- Naesset, E. (2004). Practical Large-scale Forest Stand Inventory Using a Smallfootprint Airborne Scanning Laser. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 19, 167-179
- Naesset, E., & Bjercknes, K.-O. (2001). Estimating tree heights and number of stems in young forest stands using airborne laser scanner data. *Remote Sensing of Environment*, 78, 328-340
- Nelson, R., Krabill, W., & MacLean, G. (1984). Determining forest canopy characteristics using airborne laser data. *Remote Sensing of Environment*, 15, 201-212
- Nelson, R., Valenti, M.A., Short, A., & Keller, C. (2003). A multiple resource inventory of Delaware using airborne laser data. *Bioscience*, 35, 981-992
- Packalén, P., Pitkänen, J., & Maltamo, M. (2008). Comparison of individual tree detection and canopy height distribution approaches: a case study in Finland. In R. Hill, J. Rosette, & J. Suárez (Eds.), *8th international conference on LiDAR applications in forest assessment and inventory*. SilviLaser. Heriot-Watt University, Edinburgh, UK, pp. 22-29
- Page, L.M., & Cameron, A.D. (2006). Regeneration dynamics of Sitka spruce in artificially created forest gap. *Forest Ecology and Management*, 221, 260-266
- Pascual, C., García-Abril, A., Cohen, W.B., & Martín-Fernández, S. (2010). Relationship between LiDAR-derived forest canopy height and Landsat images. *International Journal of Remote Sensing*, 31, 1261-1280
- Persson, A., Holmgren, J., & Soderman, U. (2002). Detecting and measuring individual trees using an airborne laser scanner. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 68, 925-932

- Popescu, S.C., Wynne, R.H., & Nelson, R.F. (2002). Estimating plot-level tree heights with lidar: local filtering with a canopy-height based variable window size. *Computers and Electronics in Agriculture*, 37, 71-95
- Reutebuch, S.E., McGaughey, R.J., Andersen, H.-E., & Carson, W.W. (2003). Accuracy of a high-resolution lidar terrain model under a conifer forest canopy. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 29, 527-535
- Riaño, D., Valladares, F., Condes, S., & Chuvieco, E. (2004). Estimation of leaf area index and covered ground from airborne laser scanner (Lidar) in two contrasting forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 124, 269-275
- Ritchie, J.C., Evans, D.L., Jacobs, D., Everitt, J.H., & Weltz, M.A. (1993). Measuring canopy structure with an airborne laser altimeter. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 36, 1235-1238
- Solberg, S., Brunner, A., Hanssen, K.H., Lange, H., Naesset, E., Rautiainen, M., & Stenberg, P. (2009). Mapping LAI in a Norway spruce forest using airborne laser scanning. *Remote Sensing of Environment*
- Vain, A., Yu, X., Kaasalainen, S., & Hyypä, J. (2010). Correcting Airborne Laser Scanning Intensity Data for Automatic Gain Control Effect. *IEEE GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING LETTERS*, 7, 511-514. doi:510.1109/LGRS.2010.2040578
- Wang, C., & Glenn, N.F. (2008). A linear regression method for tree canopy height estimation using airborne lidar data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 34, S217-S227
- Wehr, A., & Lohr, U. (1999). Airborne laser scanning—an introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 54, 68-82
- Wing, M., Solmie, D., & Kellogg, L. (2004). Comparing digital range finders for forestry applications. *Journal of Forestry*, 102, 16-20
- Yu, X., Hyypä, J., Kaartinen, H., & Maltamo, M. (2004). Automatic detection of harvested trees and determination of forest growth using airborne laser scanning. *Remote Sensing of Environment*, 90, 451-462
- Zhang, Y., Chen, J., & Miller, J. (2005). Determining digital hemispherical photograph exposure for leaf area index estimation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 133, 166-181
- Zhao, K., Popescu, S., & Nelson, R. (2008). Lidar remote sensing of forest biomass: A scale-invariant estimation approach using airborne lasers. *Remote Sensing of Environment*, 113, 182-196
- Zimble, D.A., Evans, D.L., Carlson, G.C., Parker, R.C., Grado, S.C., & Gerard, P.D. (2003). Characterizing vertical forest structure using small-footprint airborne LiDAR. *Remote Sensing of Environment*, 87, 171-182