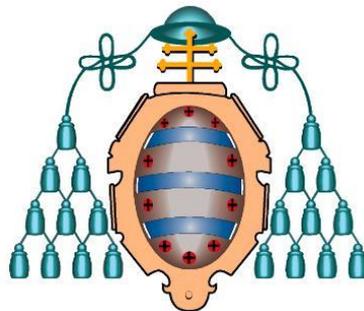


# UNIVERSIDAD DE OVIEDO



## ESCUELA POLITÉCNICA DE MIERES

Departamento de Biología de organismos y sistemas

Área de ingeniería agroforestal

## MÁSTER EN TELEDETECCIÓN Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

TRABAJO FIN DE MÁSTER

## LOCALIZACIÓN DE ÁRBOL INDIVIDUAL A PARTIR DE DATOS LiDAR

Autora: Alejandra Álvarez Junco

Directores: Elena Canga Líbano

Pedro Álvarez Álvarez

JULIO, 2016

## ÍNDICE

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>   | <b>1</b>  |
| <b>1.1. JUSTIFICACIÓN.....</b>  | <b>1</b>  |
| <b>1.2. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL LIDAR.....</b>  | <b>1</b>  |
| <b>1.3. USO DE LA TECNOLOGÍA LIDAR EN LA ESTIMACIÓN DE RECURSOS FORESTALES.....</b>               | <b>5</b>  |
| 1.3.1. Metodologías para la extracción de variables dasométricas a nivel de rodal... 5            |           |
| 1.3.2. Metodologías para la extracción de variables dasométricas a nivel de árbol individual..... | 5         |
| <b>2. OBJETIVOS.....</b>  | <b>7</b>  |
| <b>3. PROCEDIMIENTO.....</b>  | <b>8</b>  |
| <b>3.1. TOMA DE DATOS.....</b>  | <b>8</b>  |
| 3.1.1. Zona de estudio.....   | 8         |
| 3.1.2. Dispositivo experimental.....  | 9         |
| 3.1.3. Inventario forestal.....   | 10        |
| 3.1.4. Toma de datos LÍDAR.....   | 10        |
| 3.1.5. Posicionamiento de árboles.....  | 11        |
| <b>3.2. TRATAMIENTO DE DATOS.....</b>   | <b>12</b> |
| <b>4. RESULTADOS.....</b>   | <b>18</b> |
| <b>5. CONCLUSIONES.....</b>   | <b>27</b> |
| <b>6. BIBLIOGRAFÍA.....</b>   | <b>28</b> |
| <b>ANEXO I. FIGURAS.....</b>  | <b>30</b> |

## RESUMEN

El objetivo general de este proyecto fue la detección de árbol individual en dos parcelas de una masa de *Pinus pinaster* ubicadas dentro de un monte en el Principado de Asturias. La primera es una parcela de control mientras que la segunda ha sido sometida a una clara baja fuerte. Para ello se utilizaron dos metodologías de detección basadas en la individualización de árboles a partir de modelos de copas creados con datos LiDAR. Dichos datos fueron tomados en el marco del Proyecto Europeo FORRISK con una densidad de 16 pulsos/m<sup>2</sup>. A partir de ellos, se generaron diferentes capas de información (Modelo Digital del Terreno, Modelo Digital de Superficie normalizado, semillas/máximos locales y posibles positivos) que sirvieron como datos de entrada en las dos metodologías de detección de árbol individual evaluadas: *individualización por delineación de cuencas* (Metodología 1) e *individualización con CanopyMaxima* (Metodología 2).

Los resultados obtenidos fueron clasificados en “detectados” y “no detectados”. En ambas parcelas de ensayo el porcentaje de “detectados” fue mayor mediante la Metodología 1 con un promedio de 48% frente a la Metodología 2 con un 33%. A su vez, los “detectados” se subdividieron en “positivos” y “falsos positivos”. El porcentaje de árboles “positivos” fue más elevado en las clases de mayor altura. Para cualquiera de las metodologías en la parcela de clara baja fuerte se detectó un porcentaje de “positivos” superior, al existir mayor separación de los árboles permitiendo una mejor localización de los ápices. El número de “falsos positivos” sólo computó un 2,54% respecto del número real de árboles a partir de ambas metodologías.

## ABSTRACT

The overall objective of this project was the detection of individual tree in two plots of *Pinus pinaster* contained in a forest area of the Principality of Asturias. The first one is a control plot and the second one was cleared through a strong low thinning. For that purpose, two detection methods based in the trees individualization using canopy models created with LiDAR data, were assessed. That data were acquired within the frame of the European Project FORRISK with a 16 points/m<sup>2</sup> density. Different information layers were generated from the LiDAR data (Digital Terrain Model, Normalized Digital Surface Model, seeds/local maximums and possible positives) which were used as inputs in the two detection methods evaluated: *individualization by basin delineation* (Method 1) and *CanopyMaxima individualization* (Method 2).

The results obtained were classified into "detected" and "not detected" trees. In both test plots the percentage of "detected" trees was higher by Method 1 with an average of 48% against Method 2 with 33%. In the same way, the "detected" trees were classified into "positives" and "false positives". The percentage of “positives” was higher in the classes with bigger trees. For both methods in the plot strong low thinning a higher percentage of “positives” trees was detected because of the greater separation of trees which allows a better detection of the apexes. The number of "false positives" computed only 2.54% over the real number of trees for both methods.

## **ÍNDICE DE FIGURAS**

|  |    |
|--|----|
| FIGURA 1. COBERTURA LÍDAR EN ESPAÑA DURANTE EL PERÍODO 2008-2015.....  | 2  |
| FIGURA 2. ESQUEMA DE LA “HUELLA”.....  | 3  |
| FIGURA 3. ESQUEMA DE MÚLTIPLES REBOTES PARA UN PULSO.....  | 3  |
| FIGURA 4. PLATAFORMA CON LOS MOVIMIENTOS DE ALABEO, CABECEO Y GIRO.....  | 4  |
| FIGURA 5. ESQUEMA DE TRABAJO LÍDAR.....  | 4  |
| FIGURA 6. MODELO DE COPAS VS NUBE DE PUNTOS.....   | 6  |
| FIGURA 7. MAPA DE VEGETACIÓN DEL M.U.P MONTEAGUDO.....   | 8  |
| FIGURA 8. PARCELA CONTROL DE PINUS PINASTER EN EL M.U.P. MONTEAGUDO.....   | 9  |
| FIGURA 9. PARCELA BAJA FUERTE DE PINUS PINASTER EN EL M.U.P. MONTEAGUDO..  | 9  |
| FIGURA 10. UBICACIÓN DE LAS PARCELAS DE ENSAYO EN EL M.U.P. MONTEAGUDO..   | 10 |
| FIGURA 11. TRABAJOS DE POSICIONAMIENTO DE ÁRBOL INDIVIDUAL CON ESTACIÓN<br>TOTAL.....  | 12 |
| FIGURA 12. ALGORITMO DE FILTRADO.....  | 14 |
| FIGURA 13. UBICACIÓN DE LOS DATOS DE CAMPO EN LAS PARCELAS CONTROL Y<br>BAJA FUERTE.....   | 18 |
| FIGURA 14. RECORTE CON AMBAS PARCELAS DE TRABAJO (CONTROL LA DE COLOR<br>AMARILLO, BAJA FUERTE LA DE COLOR ROJO).....                            | 19 |
| FIGURA 15. FILTRADO DE LOS PUNTOS DEL TERRENO.....   | 19 |
| FIGURA 16. MDT CON PARCELAS DE CONTROL (IZQDA.) Y BAJA FUERTE (DRCHA.)<br>SUPERPUESTAS.....  | 20 |
| FIGURA 17. NMDS CON RESOLUCIÓN DE 0,25 RECORTADO PARA AMBAS PARCELAS<br>DE TRABAJO (CONTROL A LA IZQDA, BAJA FUERTE A LA DRCHA).....             | 21 |
| FIGURA 18. NMDS CON RESOLUCIÓN DE 0,5 Y SUAVIZADO.....   | 22 |
| FIGURA 19. SEMILLAS DE LA PARCELA CONTROL OBTENIDAS MEDIANTE WATERSHED<br>SEGMENTATION CON UNA RESOLUCIÓN DE 0,5 METROS Y SUAVIZADO.....         | 23 |
| FIGURA 20. SEMILLAS DE LA PARCELA CONTROL OBTENIDAS MEDIANTE<br>CANOPYMAXIMA CON UNA RESOLUCIÓN DE 0,25 METROS.....                              | 23 |
| FIGURA 21. POSIBLES POSITIVOS DE LA PARCELA CONTROL OBTENIDOS MEDIANTE<br>WATERSHED SEGMENTATION.....  | 24 |
| FIGURA 22. PORCENTAJE DE POSITIVOS EN FUNCIÓN DE LA METODOLOGÍA Y TIPO DE<br>PARCELA.....  | 25 |
| FIGURA 23. PORCENTAJE DE ÁRBOLES NO DETECTADOS POR CLASE DE ALTURA EN<br>FUNCIÓN DE LA PARCELA Y LA METODOLOGÍA UTILIZADA.....                   | 26 |
| FIGURA I.I. SEMILLAS DE LA PARCELA BAJA FUERTE OBTENIDAS MEDIANTE<br>WATERSHED SEGMENTATION CON UNA RESOLUCIÓN DE 0,5 METROS Y<br>SUAVIZADO..... | 31 |
| FIGURA I.II. SEMILLAS DE LA PARCELA BAJA FUERTE OBTENIDAS MEDIANTE<br>CANOPYMAXIMA CON UNA RESOLUCIÓN DE 0,25 METROS.....                        | 30 |
| FIGURA I.III. POSIBLES POSITIVOS DE LA PARCELA BAJA FUERTE OBTENIDOS<br>MEDIANTE WATERSHED SEGMENTATION.....                                     | 31 |
| FIGURA I.IV. POSIBLES POSITIVOS DE LA PARCELA CONTROL OBTENIDOS MEDIANTE<br>CANOPYMAXIMA.....  | 31 |
| FIGURA I.V. POSIBLES POSITIVOS DE LA PARCELA BAJA FUERTE OBTENIDOS<br>MEDIANTE CANOPYMAXIMA.....   | 32 |

## **ÍNDICE DE TABLAS**

|   |    |
|---|----|
| TABLA 1. LÍDAR VERSUS FOTOGRAMETRÍA.....  | 1  |
| TABLA 2. CARACTERÍSTICAS DEL PROYECTO VUELO LÍDAR EN ASTURIAS.....                              | 11 |
| TABLA 3. CARACTERÍSTICAS DEL VUELO LÍDAR EN ASTURIAS.....                                       | 11 |
| TABLA 4. PROMEDIO DE LOS DATOS DEL INVENTARIO FORESTAL.....                                     | 18 |
| TABLA 5. PARÁMETROS EMPLEADOS EN EL FILTRADO DE LOS PUNTOS DEL<br>TERRENO.....                  | 19 |
| TABLA 6. TABLA DE RESULTADOS EN LA DETECCIÓN DE ÁRBOL INDIVIDUAL POR<br>AMBAS METODOLOGÍAS..... | 24 |
| TABLA 7. DETECCIÓN DE ALTURAS DE ÁRBOL INDIVIDUAL (DIFERENCIA DE ALTURAS<br>EN METROS).....     | 26 |

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. JUSTIFICACIÓN

La importancia actual de la gestión forestal lleva asociada una continua demanda de herramientas que permitan un fácil manejo de los recursos naturales, y una explotación rentable y sostenible de las masas forestales con una significativa reducción de tiempo, porcentaje de muestreo y costes.

En concreto, la caracterización dasométrica de las masas forestales a nivel de rodal y árbol individual son tareas imprescindibles en la toma de decisiones, aunque las técnicas tradicionales de inventario forestal suponen un elevado coste tanto económico como de tiempo. En este sentido, es necesaria la incorporación de nuevas tecnologías de teledetección, como el caso concreto de la tecnología LiDAR (*Light Detection and Ranging*), encargada de generar información digitalizada y georreferenciada de la masa forestal. Se presenta como un complemento efectivo a las técnicas clásicas de muestreo, planificación y gestión permitiendo obtener una aproximación de la realidad, suponiendo costes más reducidos que los empleados en la metodología tradicional.

En este proyecto, se evaluaron distintas metodologías a partir de datos LiDAR, para la detección de árbol individual en masas de *Pinus pinaster* Ait. con distinta gestión selvícola, ubicadas en el Monte de Utilidad Pública (M.U.P) Monteagudo, situado entre los concejos de Pravia y Muros de Nalón.

### 1.2. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL LiDAR

Hasta la aparición de la técnica LiDAR, los métodos fotogramétricos han sido los más empleados para la obtención de parámetros forestales. Algunas de las ventajas del LiDAR frente a la fotogrametría quedan descritas en la Tabla 1.

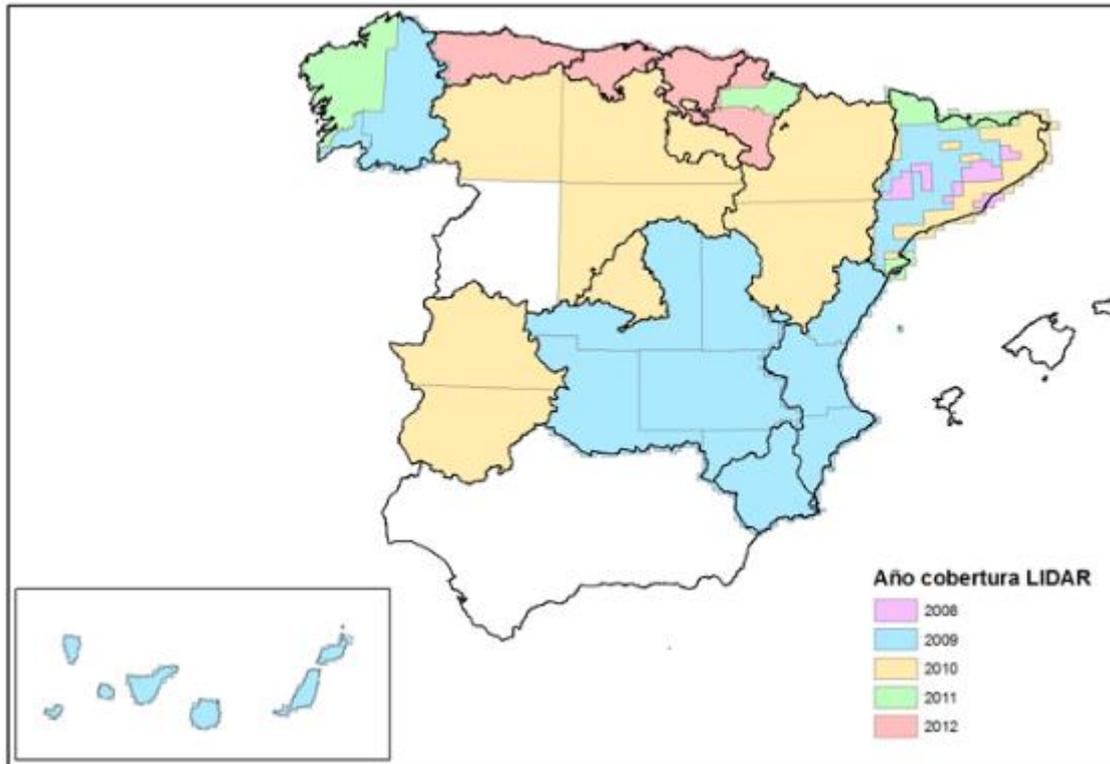
**Tabla 1.** LiDAR versus Fotogrametría (Fuente: Rodríguez y Fernández, 2013)

| LiDAR   | Fotogrametría   |
|---|---|
| Captura de día y de noche   | Captura solo de día   |
| Captura directa de información en 3D  | Procesado complicado para la obtención de información 3D  |
| Precisión vertical es menor que la precisión en planimetría   | La precisión en planimetría es mejor que la vertical  |
| Información de la estructura de la vegetación, describe la configuración de los diferentes estratos de vegetación además del suelo. | Información de la distribución horizontal de la vegetación, no nos da información de estructura |

Aunque el LiDAR surge en los laboratorios de la NASA en los años 70, no es hasta 1988 cuando se convierte en una alternativa a la cartografía. En España aún su

## INTRODUCCIÓN

cobertura no abarca todo el territorio nacional, datando de 2008 los primeros vuelos realizados. Concretamente, en el Principado de Asturias los vuelos se realizaron en el año 2012. En la Figura 1 se muestra un mapa con la cobertura en España durante el período 2008-2015 proporcionado por el PNOA.



**Figura 1.** Cobertura LiDAR en España durante el período 2008-2015 (Fuente: <http://pnoa.ign.es/coberturalidar>).

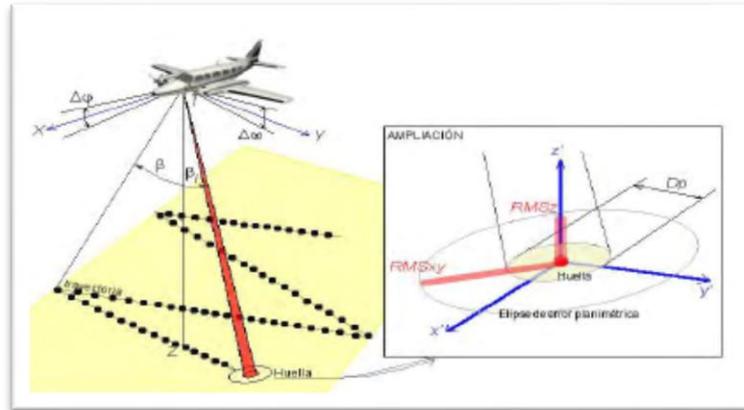
LiDAR (*Light Detection and Ranging*) es una técnica basada en la combinación de tecnologías GPS y el sensor láser. Consiste en un sensor activo de detección remota basado en un escáner láser aerotransportado (*Aerial Laser Scanning, ALS*). Este último se compone de un sensor láser, un sistema de navegación inercial (INS) y un receptor GPS diferencial colocado sobre una plataforma móvil (helicóptero, avión o dron). A su vez, en tierra se dispone de una red GPS para trabajar de forma conjunta con el receptor GPS de la plataforma (Rabadán-Valbuena, 2014).

El sensor emite pulsos discretos regularmente y mide el tiempo que la luz láser emitida tarda en ir y volver hasta él, registrando el espacio recorrido por cada pulso y las coordenadas (x,y,z) de cada rebote láser en las diferentes superficies impactadas. Trabaja con longitudes de onda comprendidas entre los  $10^{-3}$  y  $10^{-6}$  m, correspondientes a la banda del infrarrojo.

En un principio el pulso emitido es puntual, pero conforme se aleja del sensor adquiere forma cónica. Tal y como se percibe en la Figura 2 la superficie impactada queda representada por un círculo, conocido como “huella” dentro del cual se ubica el punto de interés.

## INTRODUCCIÓN

Los pulsos son enviados en una dirección única, pero un espejo oscilante los desvía para conseguir el barrido de una franja de terreno.



**Figura 2.** Esquema de la "huella" (Fuente: Rabadán-Valbuena, 2014).

El número de retornos o rebotes por pulso dependerá de la superficie de impacto. En *superficies sólidas* (caminos desnudos, pastizales bajos...) se produce un único retorno; en *cubiertas vegetales altas* los pulsos emitidos impactarán contra varios obstáculos por lo que por cada pulso se obtendrá más de un retorno adjudicándose el primero a la parte más alta de la vegetación y el último a la superficie del suelo como se contempla en la Figura 3; en el *agua* no existen ecos.

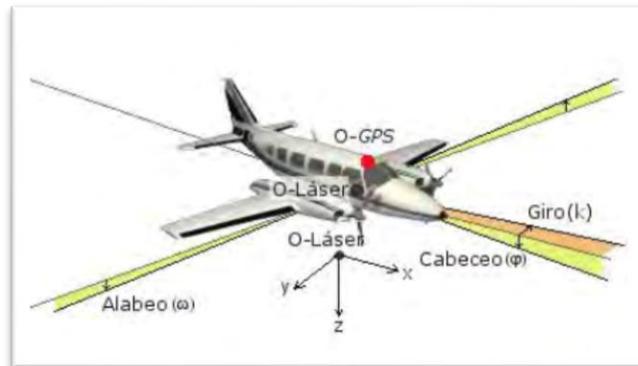


**Figura 3.** Esquema de múltiples rebotes para un pulso (Fuente: MAGRAMA, 2011).

El sensor que recibe la señal se encuentra solidario al emisor. Su función se basa en medir de modo continuo la potencia de retorno de la señal.

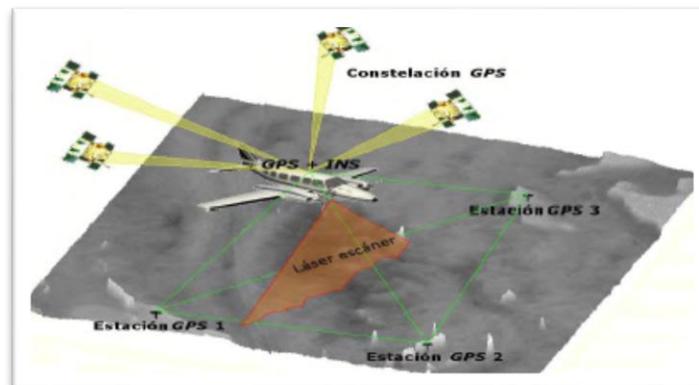
Junto al sensor láser se coloca el sistema de navegación inercial (INS) encargado de compensar los posibles errores de posicionamiento producidos por los movimientos de alabeo, cabeceo y giro de la plataforma (Figura 4).

## INTRODUCCIÓN



**Figura 4.** Plataforma con los movimientos de alabeo, cabeceo y giro (Fuente: Rabadán-Valbuena, 2014).

El sistema queda completado con un GPS encargado de detectar la posición en tiempo real del emisor. En tierra se coloca una red de aparatos en posiciones conocidas para utilizar sus registros en la corrección diferencial en tiempo real o en postproceso de los datos adquiridos por el receptor aéreo tal y como se observa en la Figura 5.



**Figura 5.** Esquema de trabajo LiDAR (Fuente: Rabadán-Valbuena, 2014).

La óptima altura de vuelo para evitar cometer grandes errores en la determinación planimétrica de los puntos queda definida en un rango entre los 500 y los 3.000 metros.

En un proyecto LiDAR existen dos bloques claramente diferenciados definidos como *adquisición de datos* y *procesado de los mismos*. Éste último es el más importante dando lugar a diferentes productos finales tales como nube de puntos brutos, modelo digital del terreno (MDT), modelo digital de superficie (MDS) e imagen de intensidades.

Una de las principales razones por las que la tecnología LiDAR es implantada en la generación de modelos de elevaciones es su capacidad de medir la altura del terreno en zonas totalmente cubiertas por arbolado o matorral no denso. Además, garantiza una reducción de los plazos de entrega de trabajos y de los costes gracias a la

## INTRODUCCIÓN

obtención de la información en formato digital y georreferenciada. Sin embargo, debe hacerse especial referencia a su dificultad para identificar el cuerpo sobre el que impacta el láser, motivo por el cual suele acompañarse de la adquisición de imágenes del área levantada.

### 1.3. USO DE LA TECNOLOGÍA LIDAR EN LA ESTIMACIÓN DE RECURSOS FORESTALES

#### 1.3.1. Metodologías para la extracción de variables dasométricas a nivel de rodal

Cuando el objetivo principal es adquirir información útil sobre la cubierta vegetal pueden utilizarse dos metodologías, *a nivel de masa o de árbol individual*. La primera de ellas es la metodología enfocada a realizar inventarios forestales a gran escala, que utiliza los percentiles y otras características de las alturas de la nube de puntos normalizada para calcular variables como altura media, diámetro medio, diámetro medio cuadrático, área basimétrica, altura dominante, número de pies por hectárea y biomasa del área total.

Se considera la alternativa de menor coste en la que una densidad de 1 punto por metro cuadrado o incluso menos suele ser suficiente, pero necesita datos de campo representativos, precisos y extensivos que encarecen el coste.

#### 1.3.2. Metodologías para la extracción de variables dasométricas a nivel de árbol individual

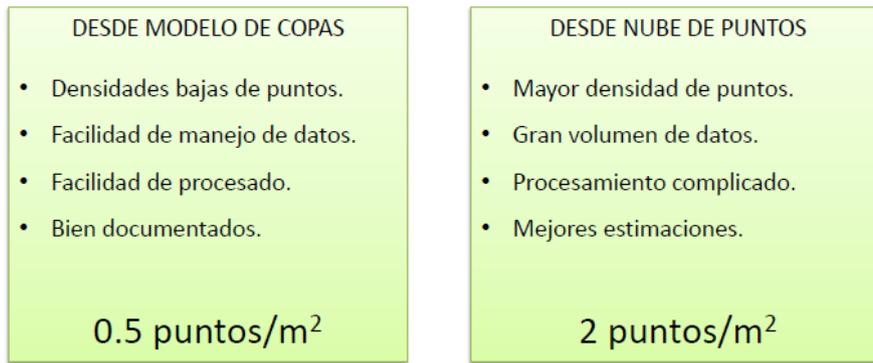
Su función principal es la estimación de variables de masa a partir de la medida de parámetros en cada uno de los árboles tales como posición, altura y superficie de copa. Emplea el Modelo Digital de Alturas de la Vegetación (MDHV = MDS – MDT) como base para los cálculos.

Este método conlleva más errores a mayor irregularidad de la masa y presencia de árboles jóvenes bajo las copas de árboles maduros.

Requiere una densidad de muestreo superior, entorno a los 5-10 pulsos/m<sup>2</sup> por lo que su coste supera sustancialmente el de la metodología *a nivel de masa*.

Las técnicas de individualización pueden agruparse en dos bloques: *desde modelo de copas* y *desde nube de puntos*. Es conveniente centrarse en la *individualización desde modelo de copas* por su facilidad a la hora de manejar los datos. La Figura 6 muestra algunas de las diferencias entre ambas técnicas.

## INTRODUCCIÓN



**Figura 6.** Modelo de copas vs Nube de puntos (Fuente: Universidad de Córdoba).

Las metodologías de individualización desde modelo de copas están basadas en la localización de máximos relativos, que se asimilan a ápices de árboles, en el modelo de copas generado por la rasterización de la nube de puntos. El proceso depende de principio a fin de la fiabilidad del modelo de copas, que a su vez acata las condiciones del MDT.

Diversos autores han realizado estudios a nivel de árbol individual en masas forestales a partir del modelo de altura de copas detectando porcentajes entre 29 y 93% (Hyypä y Inkinen, 1999; Persson *et al.*, 2002; Brandtberg *et al.*, 2003; Leckie *et al.*, 2003; Straub, 2003; Popescu *et al.*, 2003; Andersen *et al.*, 2002; Morsdorf *et al.*, 2003; Wack *et al.*, 2003).

En España, los trabajos realizados para la obtención de modelos de copas individuales utilizando máximos del modelo de alturas de copas en masas de *P. radiata* y *P. sylvestris* son:

Palomino (2009) empleó un algoritmo para la estimación de parámetros en la gestión de masas forestales a través del posicionamiento de árboles y la medición de sus dimensiones tomando como base inicial imágenes LiDAR. Dicho algoritmo fue llevado a cabo haciendo uso de métodos de clustering y lógica fuzzy para decidir si un punto pertenecía o no a un árbol existente.

González-Ferreiro *et al.* (2013) analizó las potencialidades del LiDAR aerotransportado para la captura de datos topográficos y dasométricos en varias zonas forestales de Galicia desarrollando una metodología que permite la detección y medición de árboles individuales en masas de *Pinus radiata*. Para ello, desarrolló un nuevo algoritmo con el fin de localizar la posición de los árboles y estimar su altura. Dicho algoritmo detectó y unió correctamente el 59,8% de los árboles a partir de un vuelo LiDAR con una densidad de 8 pulsos/m<sup>2</sup>.

Rabadán-Valbuena (2014) desarrolló un método para individualización de copas y cálculo de altura total y diámetro normal de cada árbol a través de información contenida directamente en nubes de puntos, en lugar de modelos de elevaciones derivados para la localización, obtenidas mediante sensores láser aerotransportados en masas de *Pinus sylvestris* de Álava. Los resultados arrojados revelan un 86,3% de árboles con copas bien delineadas.

## **2. OBJETIVOS**

El objetivo general de este trabajo es la detección de árbol individual en una masa de *Pinus pinaster* sometida a distintas intervenciones selvícolas, a partir de datos LiDAR, utilizando distintas metodologías basadas en la individualización de árboles desde modelos de copas.

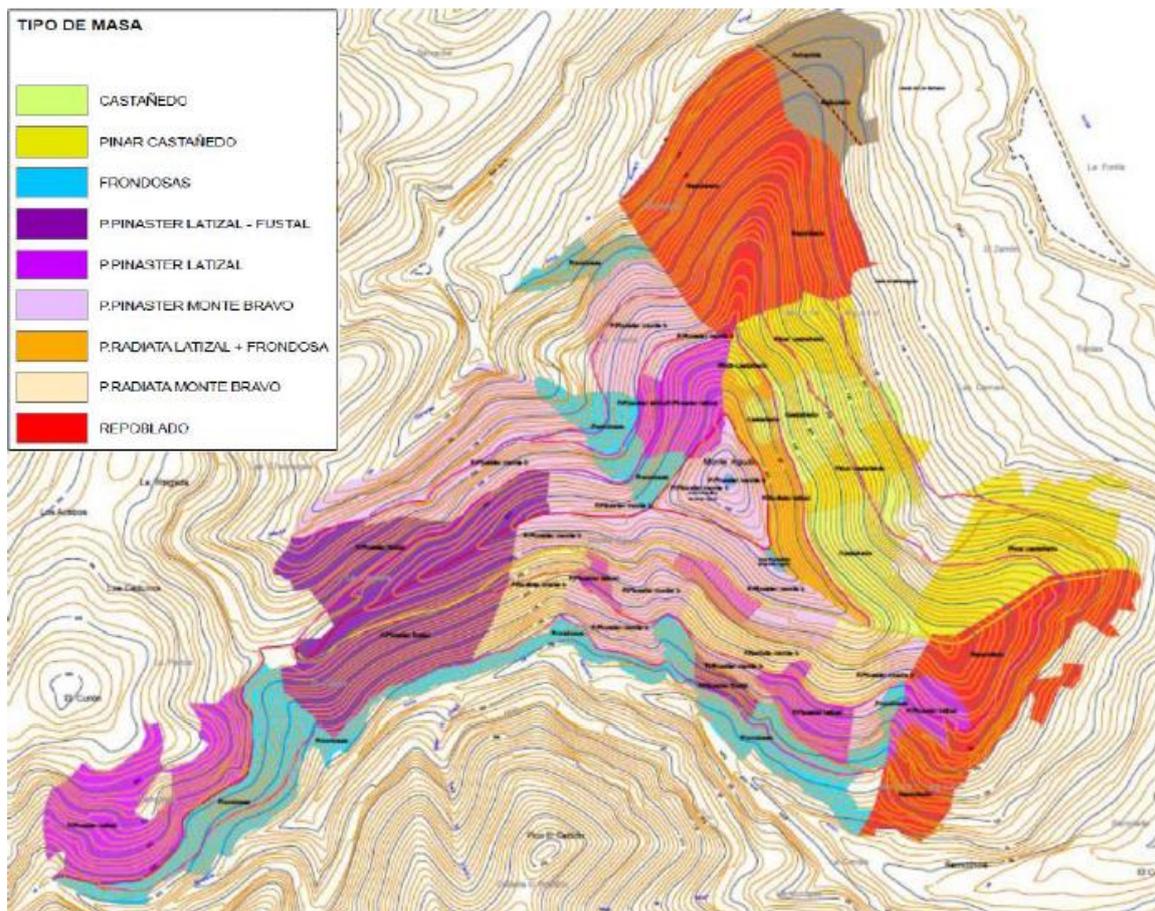
### 3. PROCEDIMIENTO

#### 3.1. TOMA DE DATOS

##### 3.1.1. Zona de estudio

El área de estudio se ubica entre los concejos de Pravia y Muros del Nalón, al noroeste de Asturias. Concretamente, los trabajos se llevaron a cabo en el Monte de Utilidad Pública (M.U.P) conocido como M.U.P Monteagudo, con una superficie total de 178,77 ha y gestionado por la administración del Principado de Asturias.

Entre la vegetación presente se pueden destacar las siguientes especies forestales: *Pinus pinaster* Ait., *Castanea sativa* Mill., *Pinus radiata* D. Don, *Quercus robur* L. y otras frondosas. A continuación se adjunta la Figura 7 con la distribución de todas ellas.



**Figura 7.** Mapa de vegetación del M.U.P Monteagudo (Fuente: Principado de Asturias, 2008).

Entorno al 55,7% de la superficie presenta una pendiente comprendida entre el 31% y 60%, mientras que el 20,7% restante toma valores superiores al 61%. La elevación oscila entre los 36 y los 355 metros medidos sobre el nivel del mar.

### 3.1.2. Dispositivo experimental

En el presente estudio se utilizaron los datos tomados por el Proyecto Europeo FORRISK (INTERREG SUDOE) (Orazio *et al.*, 2014) en el cual se han empleado datos de los ensayos de podas y claras en masas de *Pinus pinaster* gestionadas bajo un sistema de *selvicultura intensiva*.

La superficie tratada abarca aproximadamente 0,30 hectáreas, repartida en dos parcelas, una de control y otra en la que se realizó una clara baja fuerte con 30-40% de área basimétrica eliminada presentadas en las Figuras 8 y 9 respectivamente. Dichas parcelas, mostradas en la Figura 10, forman parte de un dispositivo experimental de podas y claras establecidos por el Servicio Regional de Investigación y Desarrollo Agroalimentario (SERIDA) y la Fundación CETEMAS (Hevia, 2013).



**Figura 8.** Parcela control de *Pinus pinaster* en el M.U.P. Monteagudo.



**Figura 9.** Parcela baja fuerte de *Pinus pinaster* en el M.U.P. Monteagudo.



**Figura 10.** Ubicación de las parcelas de ensayo en el M.U.P. Monteagudo (Fuente: elaboración propia a partir de los datos tomados en campo).

### 3.1.3. Inventario forestal

Los inventarios de campo fueron realizados tanto antes como después de los tratamientos selvícolas. En las dos parcelas (control y baja fuerte) se tomaron los siguientes datos dasométricos de los árboles de las parcelas (identificados por chapas): diámetro normal de todos los pies (diámetro a 1,30 m en dos direcciones perpendiculares, con forcípula con aproximación al milímetro), altura total y alturas de copa viva y muerta utilizando un hipsómetro VERTEX. Se anotaron también variables descriptivas de cada árbol (estado sanitario, deformaciones,...).

En una muestra de 27 árboles se midió el ancho de copa para poder establecer una relación entre la altura total y el ancho de copa, necesario para la detección de árbol individual con algunas metodologías. Para ello se tomaron dos medidas perpendiculares del ancho de copa.

### 3.1.4. Toma de datos LiDAR

En las Tablas 2 y 3 se muestran las características del proyecto y del vuelo LiDAR realizado en Asturias en el año 2013:

## PROCEDIMIENTO

**Tabla 2.** Características del proyecto vuelo LiDAR en Asturias.

|                                       |                                      |
|---------------------------------------|--------------------------------------|
| Superficie total                      | 0.2803                               |
| Superficie entregada                  | 28 ha                                |
| Densidad de puntos                    | 8-16 puntos/m <sup>2</sup>           |
| Áreas MDT de ajuste                   | 1                                    |
| Áreas MDT de control de ajuste        | 1                                    |
| Número de bloques                     | 18                                   |
| Sistema de coordenadas producto final | UTM huso 29 ETRS89 altura elipsoidal |

**Tabla 3.** Características del vuelo LiDAR en Asturias.

|                      |   |
|----------------------|---|
| Sesiones de vuelo    | 3 (12/09/13 sesión mañana y tarde 13/09/2013) |
| Número de pasadas    | 26  |
| Ángulo de barrido    | 8º  |
| Vuelo de calibración | 09/09/2013                                    |

**3.1.5. Posicionamiento de árboles**

El levantamiento topográfico de las parcelas se realizó con un GPS de precisión submétrica modelo *Leica Visa GS14* y una Estación Total *Trimble M3DR3*.

El primero de ellos permitió conseguir las coordenadas de localización de la estación y también un punto de referencia para que las coordenadas de posicionamiento de cada árbol estén georreferenciadas con respecto a un sistema de referencia global (coordenadas absolutas).

Para la medición de los ángulos y distancias de una forma precisa bajo arbolado se utilizó la estación total contemplada en la Figura 11, encargada de establecer el posicionamiento propiamente dicho.

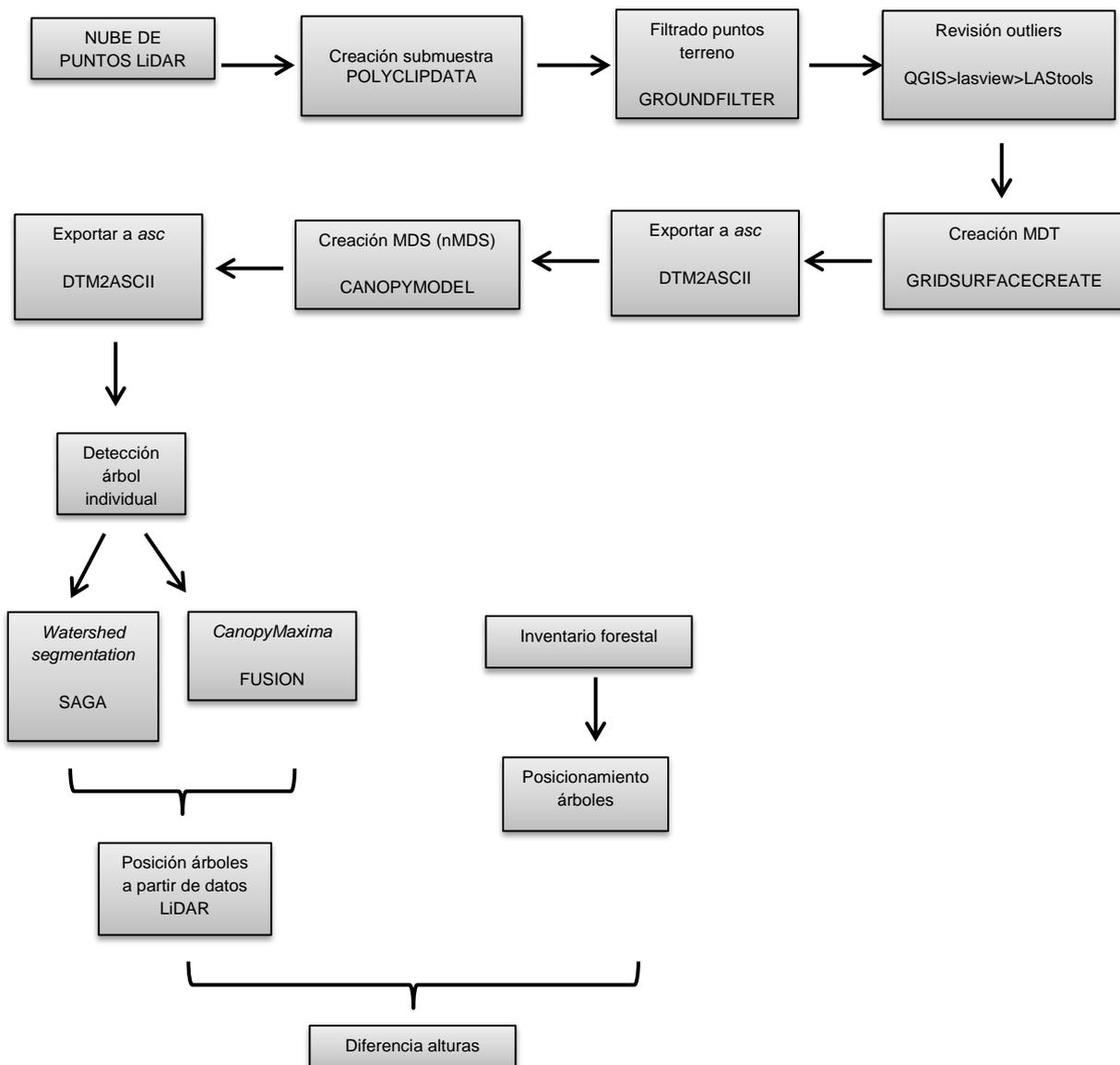


*Figura 11. Trabajos de posicionamiento de árbol individual con estación total.*

### 3.2. TRATAMIENTO DE DATOS

El procesado de los datos LiDAR se realizó siguiendo el esquema de trabajo mostrado a continuación, haciendo uso de los softwares FUSION, FugroViewer, QGIS Desktop 2.14.0- Essen y LAStools:

## PROCEDIMIENTO



### 1. Creación de una submuestra de la nube de puntos

En primer lugar, se hizo un recorte que englobó ambas parcelas de clara baja fuerte y control con la finalidad de disminuir el volumen de datos con los que trabajar. Para ello se empleó la herramienta **PolyClipData** integrada en FUSION. Como archivos de entrada se emplearon el recorte, hecho previamente en QGIS, y la nube de puntos del M.U.P. Montegudo en formatos *shapfile* y *las* respectivamente.

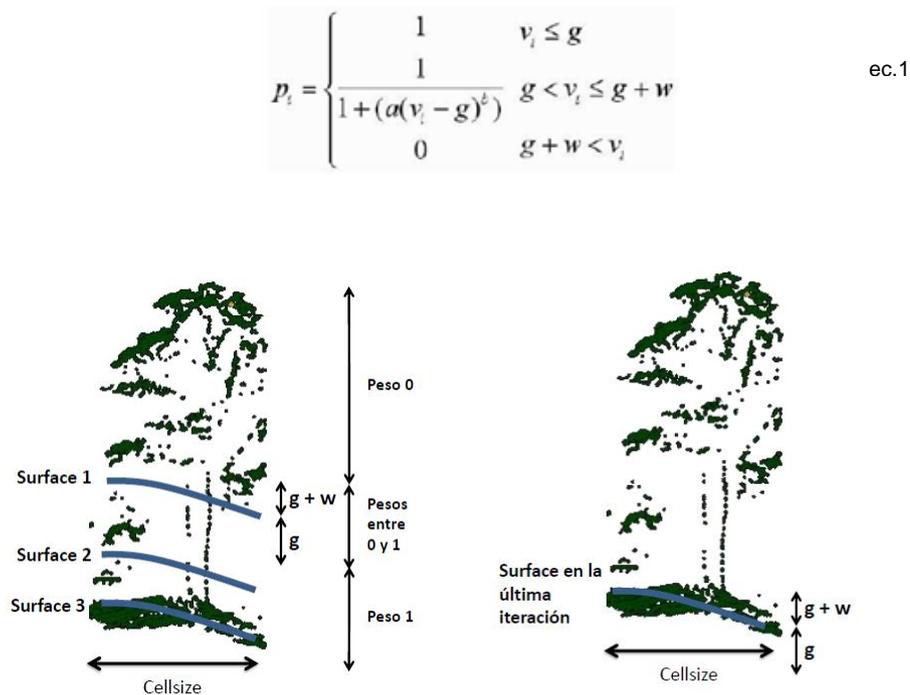
### 2. Filtrado de los puntos del terreno

En esta fase se separaron los puntos del suelo de los que pertenecen a la vegetación. Para ello se empleó la herramienta **GroundFilter** de FUSION basada en el algoritmo de Kraus y Pfeifer (1998). Se trata de un algoritmo interactivo, cuya función es generar una superficie intermedia por mínimos cuadrados usando todos los puntos a los que ha asignado el mismo peso (*surface 1*). Posteriormente, en función de los parámetros

## PROCEDIMIENTO

$w$  y  $g$  decide a qué puntos asignarles un peso igual a 1 ó 0 (ec.1) generando con estos valores una nueva superficie. A los puntos situados por debajo de la superficie intermedia a una altura superior a  $g$  les asigna un valor de 1. Por su parte, el parámetro  $w$  establece un límite de altura acotando los puntos que tienen influencia en la superficie intermedia. A aquellos puntos intermedios entre  $g+w$  y  $w$  les estipula un peso acorde a la curva recogida en el manual de FUSION (McGaughey, 2015)

En la última iteración los puntos que cumplan las dos primeras condiciones son considerados suelo, tal como se expone en la Figura 12.



**Figura 12.** Algoritmo de filtrado (Fuente: Rodríguez y Fernández, 2013).

Por defecto, los parámetros  $g$  y  $w$  toman los valores -2 y 2,5 metros respectivamente. En el presente proyecto, en función del aspecto de la nube de puntos tras su visualización con FugroViewer se hicieron diversas pruebas con otros valores.

El archivo final de salida contiene sólo los puntos de suelo almacenados en formato *las*.

### 3. Revisión de outliers

Se realizó una inspección visual del archivo de puntos de suelo empleando el software FugroViewer. En el caso de la existencia de outliers, la depuración se realizó con la herramienta *lasview* de *LAStools* implementada en QGIS. Se hizo mediante una selección manual de los puntos anómalos y eliminando con el comando *delete*. Se generaron automáticamente dos archivos de salida, uno en formato *lay* que no es más

## PROCEDIMIENTO

que un archivo de metadatos con los cambios realizados, aunque tales cambios sobre el fichero no son reales. Y por otro lado, se logró un archivo *las* resultante de reescribir con los cambios realizados el usado como archivo de entrada al inicio de esta tarea.

#### 4. Creación del Modelo Digital del Terreno

La herramienta utilizada en este caso fue **GridSurfaceCreate** para crear un Modelo de Digital del Terreno (MDT) en formato ráster. Muy importante a tener en cuenta fue la elección del tamaño de celda adecuado para el modelo, siendo la densidad de los datos de partida clave para tal elección.

El archivo resultante se generó en formato *dtm* (formato ráster propio de FUSION), en donde las elevaciones de cada celda coincidían con el valor medio de elevación de los puntos contenidos en cada una. El archivo de partida para la elaboración del MDT fue el procedente de *GroundFilter*.

#### 5. Exportar a formato asc

Una vez creado el MDT y con la ayuda de la herramienta **Dtm2ascii** de FUSION, se transformó de formato *dtm* a *asc* para poder visualizarlo en QGIS.

#### 6. Creación del Modelo Digital de Superficies

A través de la herramienta **CanopyModel** de FUSION se pudo crear un modelo de la superficie de copas a partir de la nube de puntos LiDAR en formato *las*, para distinguir entre los objetos y el terreno. El algoritmo empleado por dicha herramienta estableció la elevación del retorno más alto de cada celda a las celdas del modelo deducido. Como el modelo resultante puede estar referido al elipsoide o al terreno (normalizado), la propia herramienta de FUSION mediante el uso del *switch ground:file* permitió obtener un Modelo Digital de Superficies normalizado (nMDS).

En esta fase vuelve a cobrar importancia el tamaño de celda elegido, por lo que se probó con distintos valores (0,20 a 1 m de tamaño de pixel).

#### 7. Exportar a formato asc

Tal y como ya se hizo en el paso 5, se transformó el MDS a formato *asc* a través de la herramienta **Dtm2ascii** de FUSION para poder visualizarlo en QGIS.

#### 8. Detección de árbol individual

En la detección de árbol individual se probaron las metodologías de *individualización por delineación de cuencas* e *individualización con CanopyMaxima*, ambas basadas en la individualización desde modelo de copas. La finalidad era comparar la exactitud de los datos LiDAR con la estimación hecha en campo respecto a la posición de los árboles y sus alturas.

- *Metodología 1: Individualización por delineación de cuencas*

Para delinear las copas de los árboles desde el MDHV se empleó la potencia de **SAGA** usado directamente desde QGIS. SAGA dispone de una herramienta

## PROCEDIMIENTO

conocida como **Watershed Segmentation**. Aunque se trata de una herramienta para delimitación de cuencas, en el presente proyecto se utilizó para la localización de los puntos máximos en lugar de los mínimos. De su aplicación resultaron dos capas:

- Un archivo vectorial de puntos con los máximos relativos obtenidos por el programa para ser aplicados como *semillas* de las cuencas. A cada *semilla* le correspondió una cuenca delineada. Se entiende por *semillas* aquellos árboles que el software considera que existen por defecto según el modelo de copas establecido.
  - Un ráster con las cuencas delineadas. El valor de cada cuenca coincidió con la altura de la *semilla* que la generó.
- *Metodología 2: Individualización con CanopyMaxima*

Los máximos locales fueron localizados a través de la herramienta **CanopyMaxima** implementada en FUSION. Herramienta que mediante un modelo de la altura del dosel es capaz de identificar los árboles más altos de la masa. No funciona de la misma manera en todo tipo de bosques, en unos es capaz de identificar árboles individuales, mientras que en otros sólo extrae los ejemplares dominantes y codominantes del dosel superior.

*CanopyMaxima* interpola una nueva superficie de más alta resolución, empleando como archivo de entrada el nMDS, sobre la que ubica los máximos locales solicitados. El tamaño de celda empleado para localizar los máximos depende de la altura máxima del modelo de copas en cada punto. La fórmula general que usa FUSION es la siguiente (ec.2).

$$\text{Anchura} = A + B * h + C * h^2 + D * h^3 + E * h^4 + F * h^5 \quad \text{ec.2}$$

Donde h es la altura y A,B,C,D,E y F son los coeficientes de un polinomio de quinto grado que serán ajustados a conveniencia para optimizar la localización de los máximos a través del *switch wse*. En el caso de que no se especifiquen los valores de dichos parámetros, el software establece unos valores por defecto (A= 2.51503, C= 0.00901 y el resto son 0). Para este estudio se ajustó con el programa estadístico **SAS** (SAS Institute Inc., 2011) la ecuación general (ec.2) para la obtención de parámetros específicos, a partir de una muestra de 27 árboles en la que se cuenta con datos de ancho de copa.

Aunque el comando *CanopyMaxima* con el *switch threshold* establece un mínimo de altura a partir del cual estudia los máximos, en caso de no modificar este *switch* el valor por defecto es de 10 metros. En el presente estudio se estableció un valor teniendo en cuenta los datos de altura de los árboles presentes en las parcelas de estudio.

Una vez corrido el modelo se obtuvo el archivo en formato CSV con la información de alturas requerida.

### 9. Evaluación del proceso de detección de árbol individual

Con los datos obtenidos por ambas metodologías (utilizando el comando *Watershed Segmentation* de SAGA y *CanopyMaxima* de FUSION), se evaluó la precisión en la detección de árbol individual comparando con los datos tomados en campo. Para ello se siguieron los siguientes pasos basándose en el método propuesto por Persson *et al.* (2002):

- a. **Establecer buffer.** Fue delimitada un área de influencia de 2 metros alrededor de los puntos GPS tomados en campo.
- b. **Cálculo de los “posibles positivos”.** Las *semillas* calculadas en la metodología de SAGA o los archivos CSV generados por *CanopyMaxima* se recortaron con el buffer anterior. Todos aquellos puntos situados fuera del radio de acción de 2 metros se consideraron “falsos positivos” y “posibles positivos” a los que quedaron dentro.
- c. **Unión de tablas de atributos.** A través de la herramienta **Add polygon attributes to points** de QGIS-SAGA se creó el campo común “*chapa*” entre los “posibles positivos” y el inventario forestal. La unión definitiva de las tablas tuvo lugar mediante la opción “*Uniones*” ubicada en las propiedades de la capa *buffer*.
- d. **Diferencia de alturas.** Se calculó la diferencia de alturas entre los datos del inventario forestal y los “posibles positivos” logrados por ambos métodos. Los árboles detectados mediante tecnología LiDAR, previamente clasificados como “posibles positivos”, si la diferencia entre la altura real y la altura del punto LiDAR fuese menor o igual a 3 metros se consideraron como “positivos”, en caso contrario se clasificaron como “falsos positivos”. En caso de existir dos “posibles positivos” en un mismo buffer se seleccionó aquel que presentaba menor diferencia de altura con respecto al dato de inventario.

Con los resultados obtenidos se evaluó el porcentaje de árboles “positivos”, “falsos positivos” y “no detectados” en ambas metodologías y se analizaron también las diferencias existentes según el tipo de tratamiento selvícola.

Además, con el fin de relacionar el número de “positivos” obtenido con cada método con el estrato de altura al que pertenecía el árbol detectado, se dividieron las parcelas en 4 cuartiles en función de la altura. De esa manera a cada cuartil le correspondió la misma cantidad de datos, un 25 % del total.

Asimismo se analizó la precisión en la estimación de alturas de árbol individual.

#### 4. RESULTADOS

Tras el procesado de los datos tomados en el inventario forestal, se determinaron las principales características dasométricas de las parcelas de estudio, que se presentan en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Promedio de los datos del inventario forestal

| Tratamiento | Dm    | Hm    | G     | Vcc    | H <sub>0</sub> | N    | n   | S           | t  |
|-------------|-------|-------|-------|--------|----------------|------|-----|-------------|----|
| CONTROL     | 18.21 | 10.79 | 32.93 | 138.35 | 10.83          | 1129 | 189 | 1674.4<br>9 | 16 |
| BAJA FUERTE | 18.67 | 11.78 | 23.13 | 109.70 | 12.75          | 817  | 105 | 1285.3<br>0 | 16 |

Nota: Dm: diámetro medio en cm, Hm: altura media, G: área basimétrica en m<sup>2</sup>/ha, H<sub>0</sub>: altura dominante en m, Vcc: Volumen con corteza en m<sup>3</sup>/ha, N densidad en pies/ha, n número de árboles, S superficie en m<sup>2</sup>, t edad en años.

En el caso de los datos tomados para el posicionamiento de los árboles se muestran en la Figura 13.



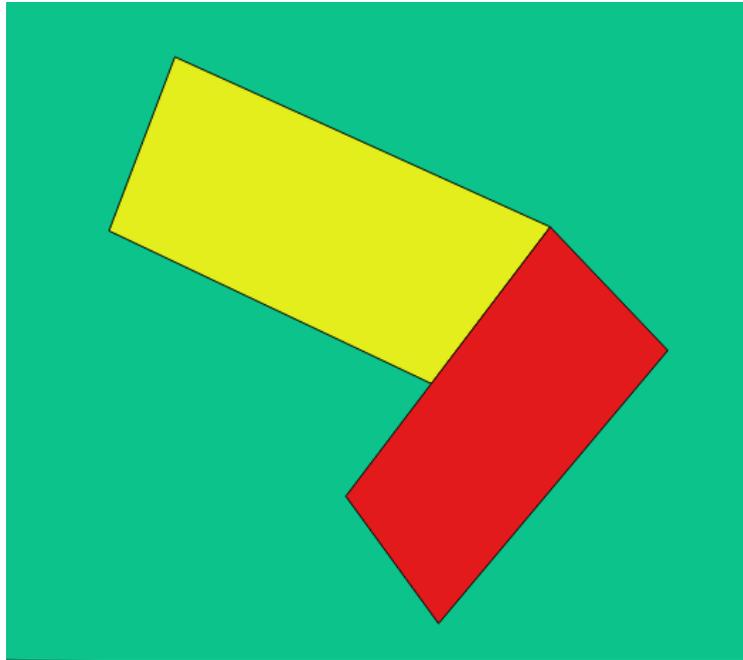
**Figura 13.** Ubicación de los datos de campo en las parcelas control y baja fuerte.

Para el filtrado de los puntos del terreno con la herramienta **Groundfilter** de FUSION, se probaron diferentes parámetros seleccionando finalmente los valores de la Tabla 5, ya que son los que permitieron obtener una separación del suelo respecto de la vegetación con menos anomalías. Para evitar errores en las zonas de borde, no se trabajó directamente con los datos LiDAR de las parcelas de ensayo, si no que se seleccionó una zona más amplia (Figura 14).

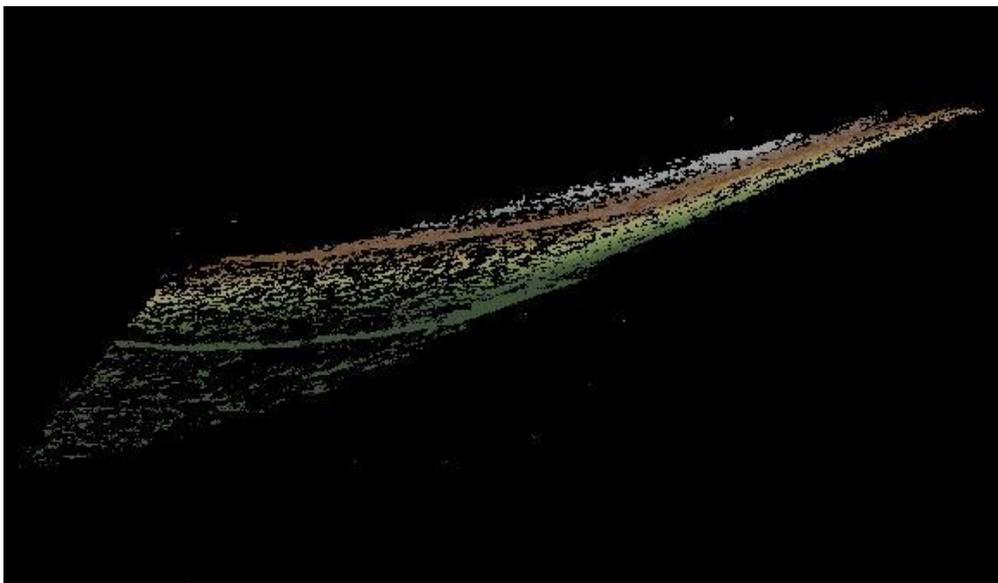
## RESULTADOS

**Tabla 5.** *Parámetros empleados en el filtrado de los puntos del terreno.*

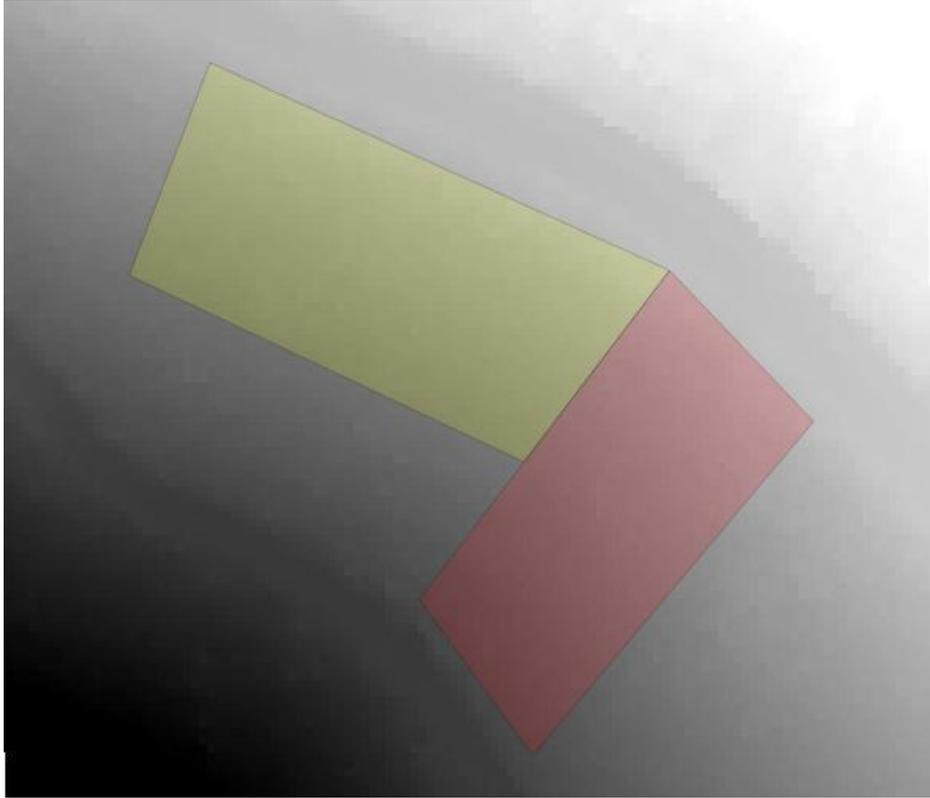
| Parámetro <i>g</i> | Parámetro <i>w</i> | Iteraciones |
|--------------------|--------------------|-------------|
| -1,42              | 1,5                | 20          |

**Figura 14.** *Recorte con ambas parcelas de trabajo (control la de color amarillo, baja fuerte la de color rojo) (Fuente: elaboración propia).*

Una idea más exacta del resultado obtenido con el filtrado se muestra en la Figura 15 tomada a través del software FugroViewer. Se observa la presencia de valores atípicos que posteriormente fueron eliminados con la herramienta *lasview* de *LAStools* implementada en QGIS, que permitió eliminarlos de forma manual sin tener que seleccionar ningún valor de altura de filtrado.

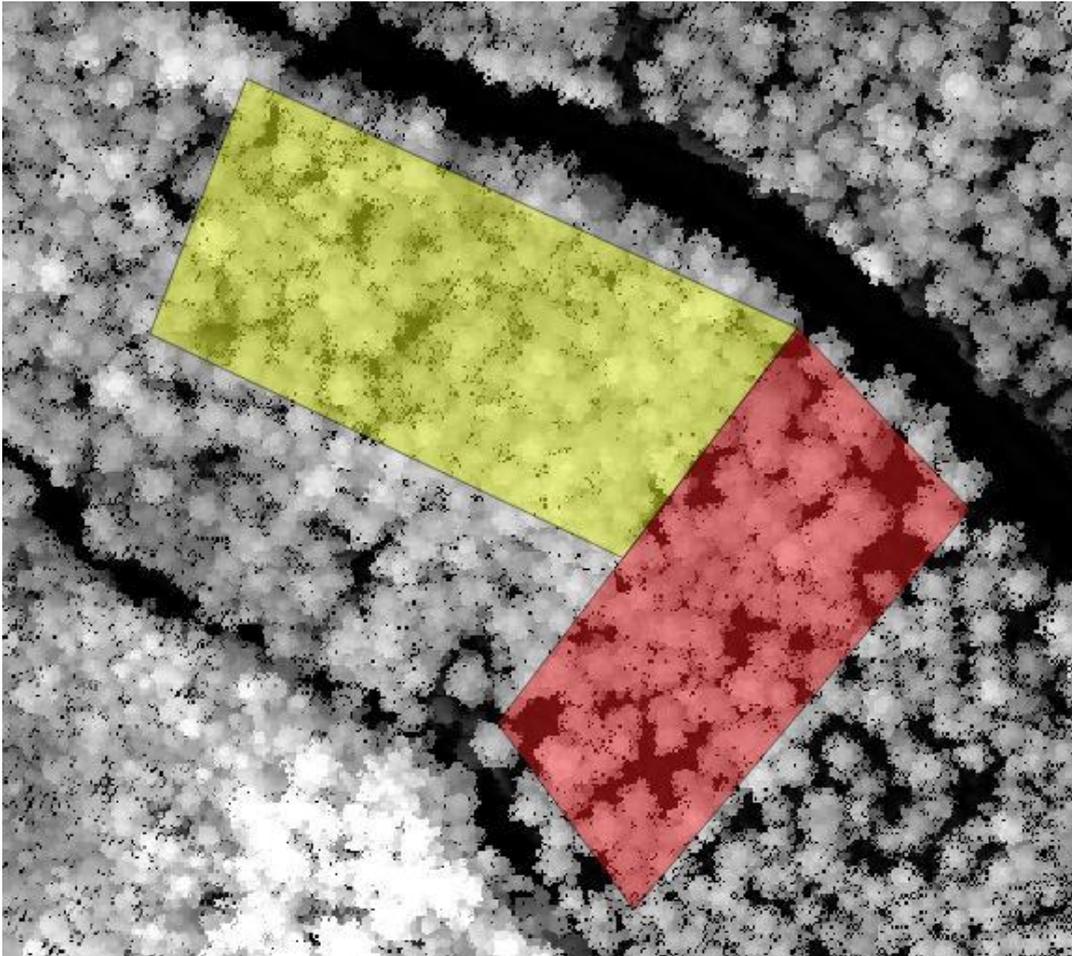
**Figura 15.** *Filtrado de los puntos del terreno.*

Tras la aplicación de la herramienta **GridSurfaceCreate** de FUSION se elaboró el MDT, utilizando un tamaño de pixel de 1 m adecuado para el nivel de densidad de puntos de los datos LiDAR obteniendo así mayor grado de detalle en la representación del terreno tal y como se indica en la Figura 16.

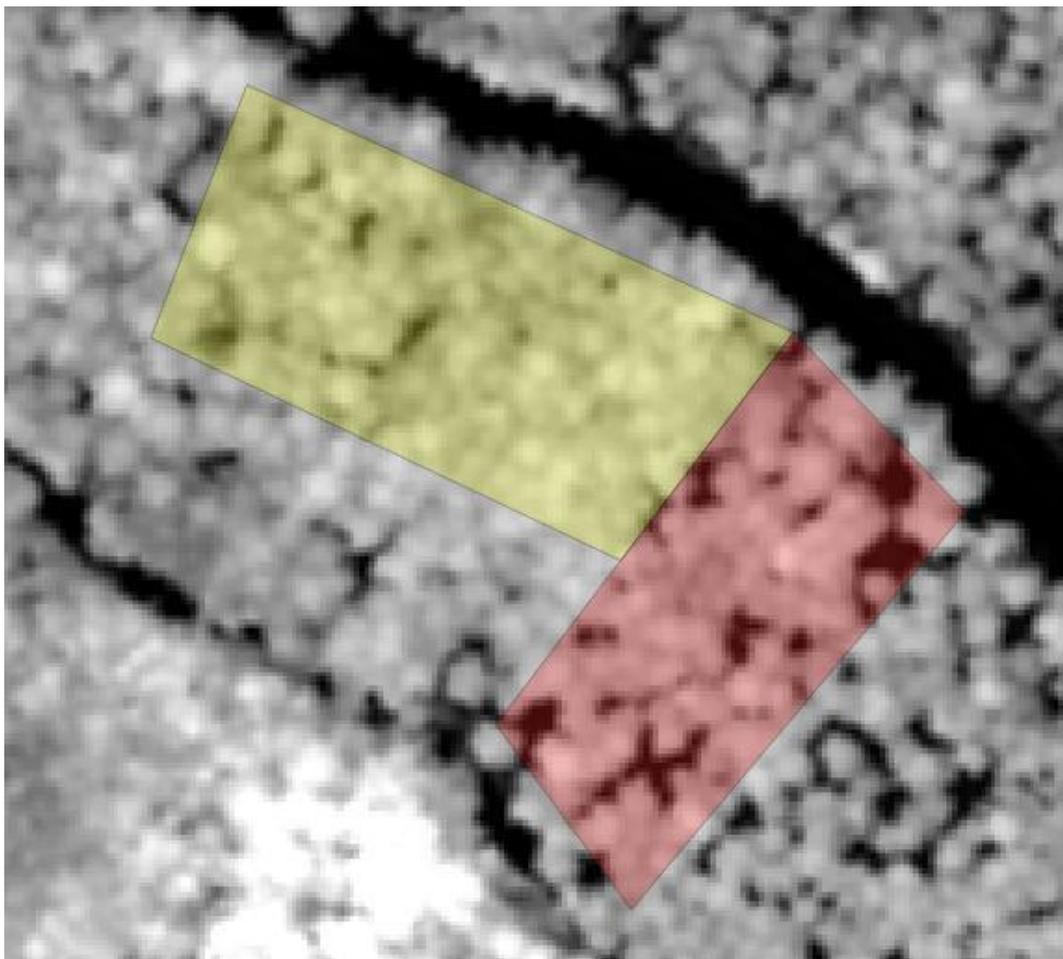


**Figura 16.** MDT con parcelas de control (izqda.) y baja fuerte (drcha.) superpuestas.

El cálculo del Modelo Digital de Superficies (MDS) se hizo a través de la herramienta **CanopyModel** de FUSION utilizando el *switch ground:file* para la obtención directa del modelo normalizado (nMDS) también conocido como modelo de copas. Para un correcto funcionamiento del *switch* se introdujo el archivo correspondiente al MDT en formato *dtm*. Los resultados se muestran en las Figuras 17 y 18.



**Figura 17.** nMDS con resolución de 0,25 recortado para ambas parcelas de trabajo (control a la izqda, baja fuerte a la drcha).



**Figura 18.** nMDS con resolución de 0,5 y suavizado.

Siguiendo el objetivo general del presente trabajo, se realizó la detección de árbol individual según dos métodos claramente diferenciados conocidos como *individualización por delineación de cuencas* e *individualización con CanopyMaxima*.

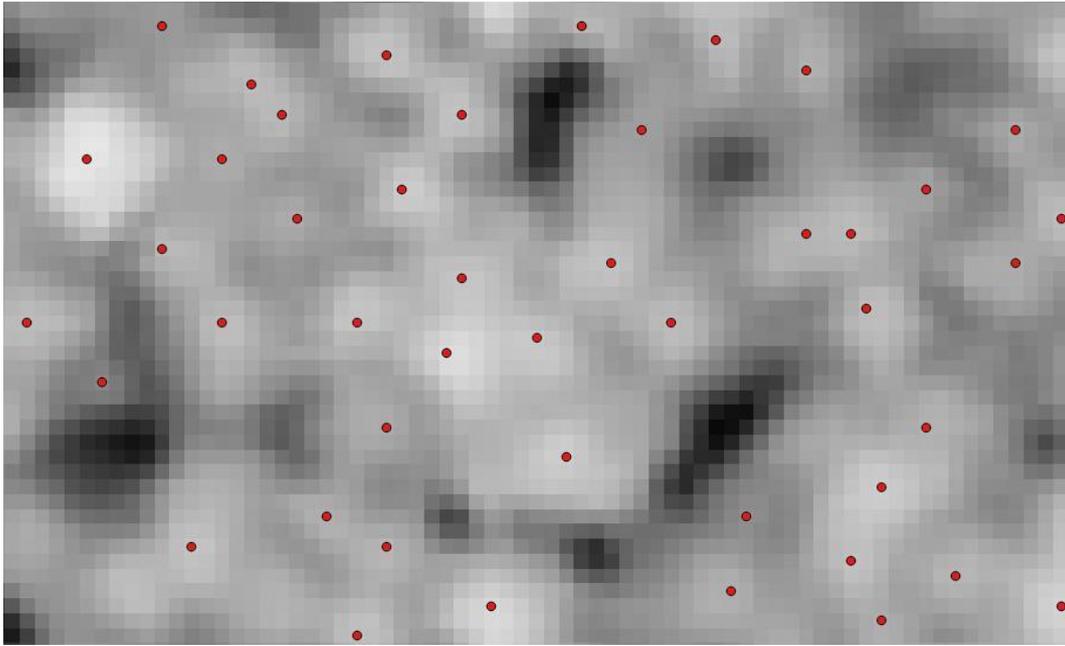
En la generación de los máximos locales cobra gran relevancia la resolución aplicada anteriormente en el cálculo del nMDS. Teniendo en cuenta las pruebas realizadas con diferentes tamaños de celda, se establecieron como idóneos los valores de 0,5 metros con suavizado (empleando el *switch smooth:3*) para la metodología *Watershed Segmentation* y de 0,25 metros para *CanopyMaxima*. La elección de dichos valores se apoyó en la importancia de obtener un ecuánime número de máximos con respecto a las copas delineadas.

Tras una revisión del inventario forestal se detectó la existencia de un 5% de árboles con una altura menor de 8 metros. Considerando que el alcance del LiDAR sobre estos ejemplares daría lugar a errores y con la finalidad de optimizar la localización de los máximos, en la metodología de *CanopyMaxima* se decidió obviar tal porcentaje estableciendo un umbral inferior de altura de 8 metros a través del *switch threshold*. A su vez, el tamaño de celda empleado para ubicar los máximos locales fue ajustado mediante la ecuación de ancho de copa ajustada para los datos de este estudio, con un coeficiente  $B=0,3316$  fijado en el *switch wse* (ec.3).

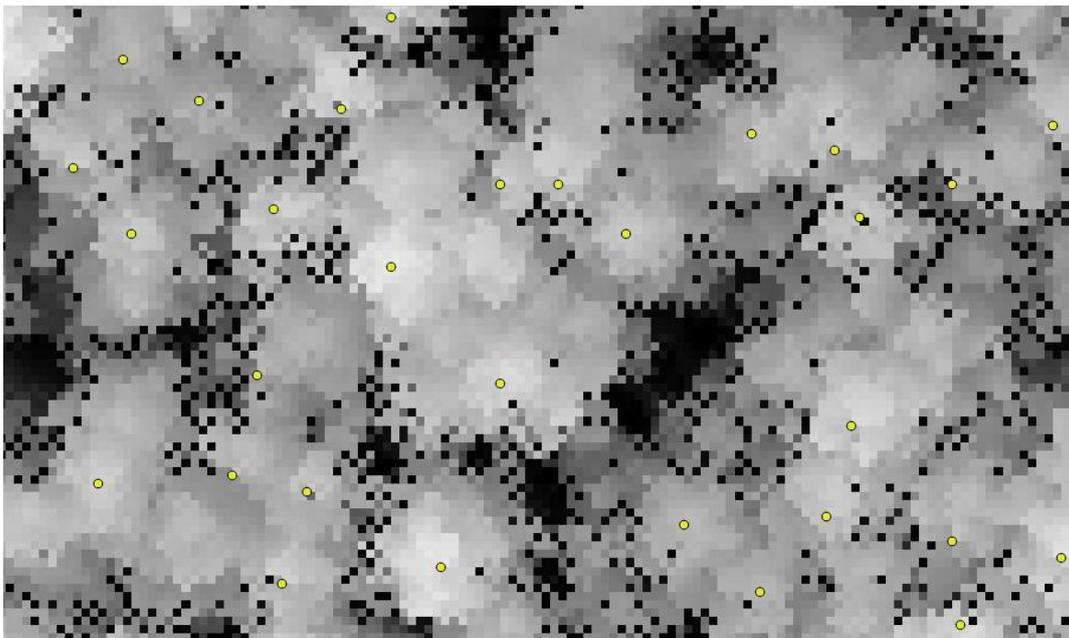
## RESULTADOS

$$\text{Anchura} = 0.3316 * h \quad \text{ec.3}$$

Las Figuras 19 y 20 muestran los máximos obtenidos con *Watershed Segmentation* y *CanopyMaxima* en la parcela control, observándose al mismo tiempo la calidad de las resoluciones seleccionadas. Haciendo una comparativa entre ambas metodologías se aprecia que la técnica *Watershed Segmentation* proporcionó mayor número de semillas.



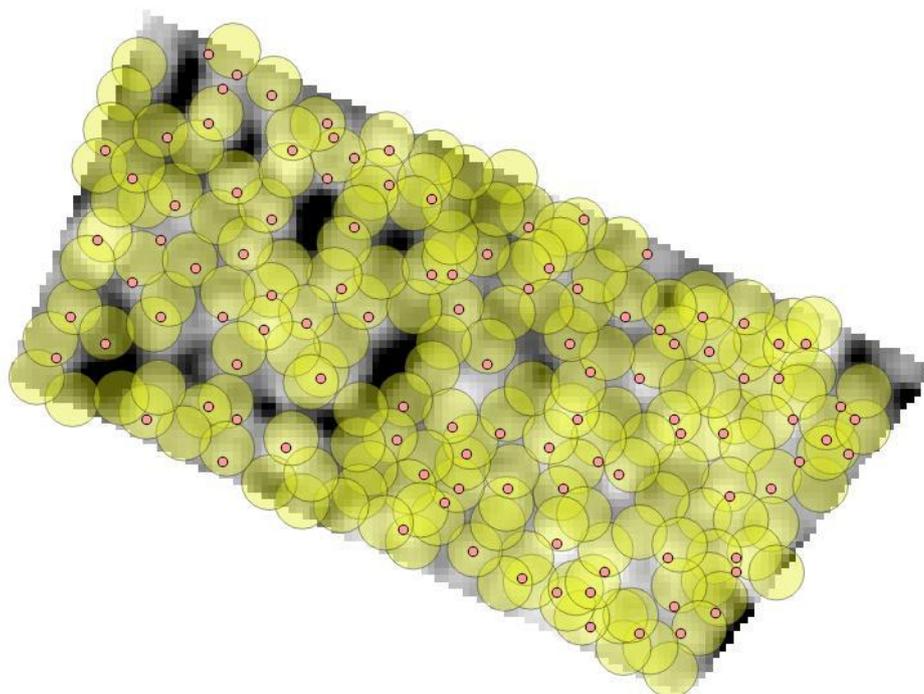
**Figura 19.** Semillas de la parcela control obtenidas mediante *Watershed Segmentation* con una resolución de 0,5 metros y suavizado.



**Figura 20.** Semillas de la parcela control obtenidas mediante *CanopyMaxima* con una resolución de 0,25 metros.

## RESULTADOS

El establecimiento de un buffer de 2 metros alrededor de los datos de campo y el posterior recorte de las *semillas/máximos* con dicho buffer permitió el cálculo de los denominados “posibles positivos” mostrados en la Figura 21.



**Figura 21.** “Posibles positivos” de la parcela control obtenidos mediante Watershed Segmentation.

Una vez calculados los “posibles positivos” fueron relacionados con el inventario de campo para poder analizar sus diferencias de alturas.

En la Tabla 6 se pueden ver los resultados en la detección de árbol individual por ambas metodologías en las dos parcelas de ensayo. En ambas parcelas, la Metodología 1 detectó un mayor número de árboles, un 48% como media frente al 33% con la Metodología 2.

**Tabla 6.** Tabla de resultados en la detección de árbol individual por ambas metodologías.

| parcela              | ND  | FP | P  | total |
|----------------------|-----|----|----|-------|
| Control_watershed    | 97  | 7  | 85 | 189   |
| Control_canopy       | 126 | 5  | 58 | 189   |
| Bajafuerte_canopy    | 62  | 4  | 39 | 105   |
| Bajafuerte_watershed | 50  | 0  | 55 | 105   |

Nota: ND: no detectados, FP: falso positivos, P: positivo

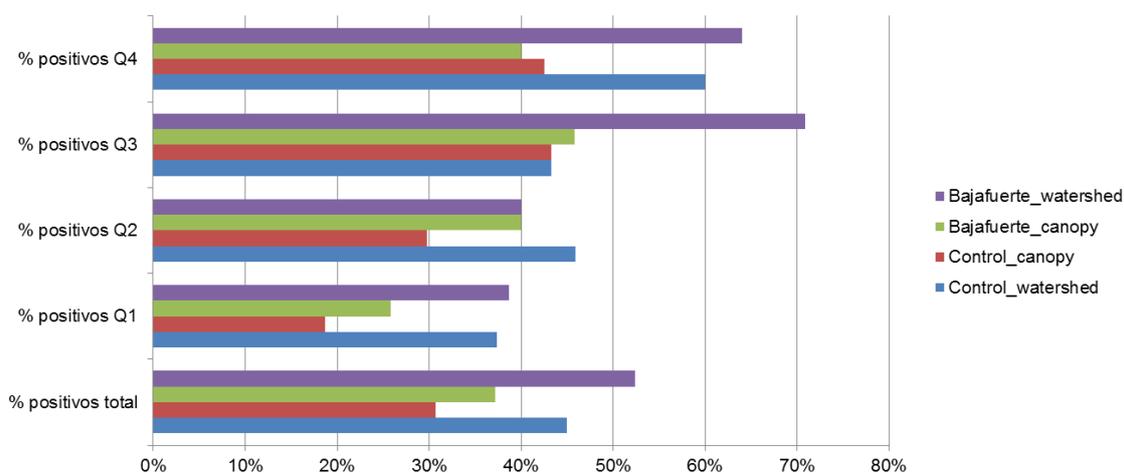
## RESULTADOS

Otros autores (Hyypä y Inkinen, 1999; Persson *et al.*, 2002; González-Ferreiro, 2013) obtuvieron resultados comprendidos entre el 40 y el 71%.

La evaluación de ambas metodologías se realizó respecto al total de árboles de cada parcela y dividiendo los árboles en función de su altura, en cuatro clases utilizando para ello los cuartiles de dicha variable. Analizando el número de árboles “detectados” y clasificados como “positivos”, la Figura 22 presenta una gráfica con el porcentaje de “positivos” detectados en las cuatro clases y en el total de los árboles, observándose que el porcentaje aumentó en las dos clases de mayor altura, existiendo por ejemplo, un porcentaje mayor del 64% en la clara baja fuerte con la Metodología 1 (en concreto un 64% en la clase 4 y hasta un 71% en la clase 3).

En todos los casos el porcentaje de “positivos” fue mayor en la parcela de clara que en la parcela control, resultado lógico al estar los árboles más distanciados entre sí, permitiendo una mejor detección del ápice.

El alto porcentaje de detección en los árboles de clase de altura superiores es importante a la hora de utilizar estas técnicas para la estimación de volumen o biomasa de rodales, ya que es en estas clases dominantes y codominantes donde se concentra la mayor productividad de las masas forestales.



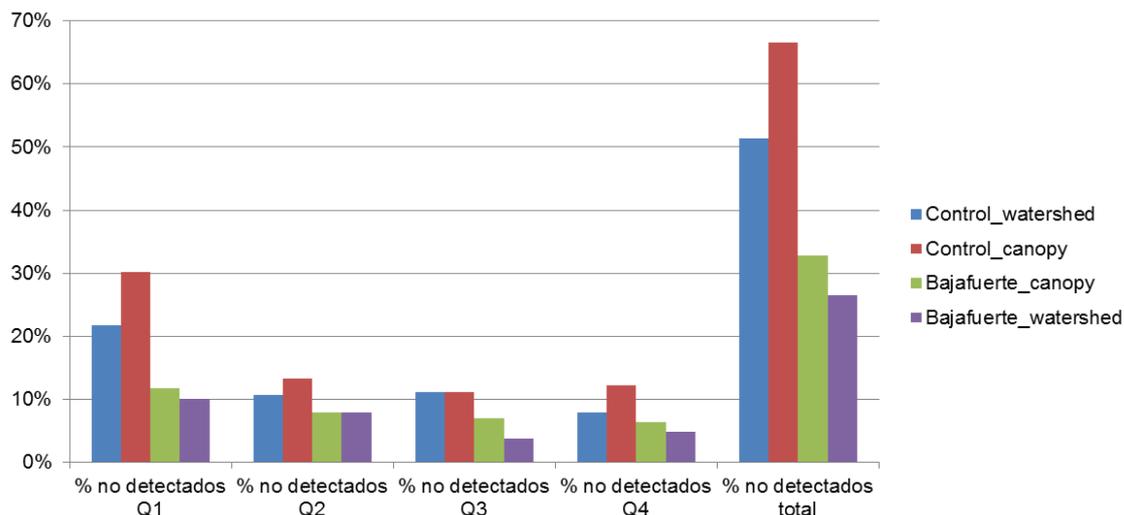
**Figura 22.** Porcentaje de “positivos” en función de la metodología y tipo de parcela.

En cuanto a la localización a partir de ambas metodologías de “falsos positivos”, como promedio únicamente se detectaron un 2,54% respecto al número real de árboles de las parcelas. Por tanto, en cualquiera de las metodologías no se produce una sobreestimación importante de la densidad de árboles, aspecto importante en el caso de la utilización práctica de esta herramienta.

La Figura 23 revela el porcentaje de árboles “no detectados” mediante las metodologías evaluadas, en ambas parcelas y teniendo en cuenta las cuatro clases de altura. En las dos parcelas, el porcentaje de árboles “no detectados” fue menor en el caso de la Metodología 1, con lo que apoya los resultados anteriores, siendo por tanto la metodología más adecuada de las dos evaluadas. En el caso, de la parcela baja

## RESULTADOS

fuerte únicamente quedaron sin detectar un 4,76% de los árboles de la clase de mayor altura.



**Figura 23.** Porcentaje de árboles "no detectados" por clase de altura en función de la parcela y la metodología utilizada.

En cuanto a la estimación de las alturas, en la Tabla 7 se presentan los estadísticos de los residuos en valor absoluto (diferencia entre la altura real y la altura LiDAR). La media de esta diferencia de alturas es mayor en el caso de la parcela control, presentando valores comprendido entre 0,6 y 1 m en ambas metodologías.

**Tabla 7.** Detección de alturas de árbol individual (diferencia de alturas en metros).

|                       | n  | media | max  | min  | desv estandar |
|-----------------------|----|-------|------|------|---------------|
| baja fuerte watershed | 85 | 0.77  | 2.77 | 0.01 | 0.72          |
| control watershed     | 58 | 1.06  | 2.64 | 0.08 | 0.66          |
| baja fuerte canopy    | 39 | 0.66  | 1.85 | 0.01 | 0.520         |
| control canopy        | 55 | 0.99  | 2.76 | 0.02 | 0.69          |

## CONCLUSIONES

**5. CONCLUSIONES**

1. En el presente estudio se han tenido en cuenta dos metodologías basadas en la individualización de árboles desde modelos de copas para la detección de árbol individual en una masa de *Pinus pinaster* conocidas como *individualización por delineación de cuencas* (Metodología 1) e *individualización con CanopyMaxima* (Metodología 2). La Metodología 1 ofreció un promedio de 48% de árboles bien detectados frente al 33% arrojado por la Metodología 2. El porcentaje de “falsos positivos” fue de solo un 2,54% respecto al número real de árboles de las parcelas, lo cual deja patente que no se produce una sobreestimación importante de la densidad de árboles.
2. En ambas metodologías se observaron mejores resultados en la parcela con mayor separación de los árboles permitiendo una mejor detección de los ápices. Por otro lado, el porcentaje de detección es más elevado en las clases de altura superiores donde se encuentran los árboles dominantes y codominantes
3. El promedio de la diferencia entre la altura real del ápice y la estimada a partir de los datos LiDAR oscila entre 0,6 y 1 metro en ambas metodologías. De forma general se observa una subestimación de la altura de los árboles individuales.
4. A la vista de los resultados obtenidos en las dos metodologías estudiadas, en futuras investigaciones será necesario centrarse en la obtención de un modelo de copas más afinado, así como en la metodología *Watershed Segmentation* con la finalidad de conseguir resultados aún más ajustados a la realidad de los ya expuestos en el presente trabajo.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

**Andersen, H.E., Reutebuch, S.E., Schreuder, G.F., 2002.** Bayesian object recognition for the analysis of complex forest scenes in airborne laser scanner data. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34(3/A): 35-41.

**Brandtberg, T., Warner, T.A., Landenberger, R.E., McGraw, J.B., 2003.** Detection and analysis of individual leaf-off tree crowns in small footprint, high sampling density lidar data from the eastern deciduous forest in North America. *Remote sensing of Environment*, 85(3): 290-303.

**Condés, S., Fernández-Landa, A., Rodríguez, F., 2013.** Influencia del inventario de campo en el error de muestreo obtenido en un inventario con tecnología Lidar. In *Congresos-CARGA FINAL*.

**González-Ferreiro, E., Diéguez-Aranda, U., Barreiro-Fernández, L., Buján, S., Barbosa, M., Suárez, J. C., Miranda, D., 2013.** A mixed pixel-and region-based approach for using airborne laser scanning data for individual tree crown delineation in *Pinus radiata* D. Don plantations. *International journal of remote sensing*, 34(21): 7671-7690.

**Hevia, A., 2013.** Influencia de la poda en el desarrollo de masas de *Pinus radiata* D. Don y *Pinus pinaster* Aiton en Asturias. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela.

**Hyypä, J. y Inkinen, M., 1999.** Detecting and estimating attributes for single trees using laser scanner. *The photogrammetric journal of Finland*, 16(2): 27-42.

**Kraus, K. y Pfeifer, N., 1998.** Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 53(4): 193-203.

**Leckie, D., Gougeon, F., Hill, D., Quinn, R., Armstrong, L., Shreenan, R., 2003.** Combined high-density lidar and multispectral imagery for individual tree crown analysis. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 29(5): 633-649.

**McGaughey, R.J., 2015.** FUSION/LDV: Software for LIDAR Data Analysis and Visualization. FUSION Version 3.50. United States Department of Agriculture. Forest Service. Pacific Northwest Research Station, 182 pp.

**Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA), 2011.** Guía Metodológica para el desarrollo del sistema nacional de cartografía de zonas inundables. Gobierno de España, 341 pp.

**Morsdorf, F., Meier, E., Allgöwer, B., Nüesch, D., 2003.** Clustering in airborne laser scanning raw data for segmentation of single trees. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34(part 3), W13.

## BIBLIOGRAFÍA

**Orazio, C., Fermet Quinet, S., Hevia, A., Álvarez-González, J.G., González-Ferrero, E., Ruíz González, A.D., entre otros. 2014.** FORRISK, gestión integrada de los riesgos en los bosques plantados. EFIATLANTICO. 147 pp. ISBN 978-2-9519296-2-9.

**Palomino, M., 2009.** Algoritmo para la localización y estimación de masa forestal a partir de imágenes LiDAR. Proyecto Fin de Máster en Sistemas Inteligentes. Facultad de Informática. Universidad Complutense de Madrid, 224 pp.

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

**Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA).** Plan Nacional de Observación del Territorio. Instituto Geográfico Nacional. Ministerio de Fomento. Gobierno de España.

**Popescu, S. C., Wynne, R. H., Nelson, R. F., 2003.** Measuring individual tree crown diameter with lidar and assessing its influence on estimating forest volume and biomass. *Canadian journal of remote sensing*, 29(5): 564-577.

**Principado de Asturias, 2008.** Plan de Ordenación del M.U.P Monteagudo. Consejería de Medio Rural y Pesca.

**Rabadán-Valbuena, M.A., 2014.** *Determinación de variables forestales de masa y de árboles individuales mediante delineación de copas a partir de datos LIDAR Aerotransportado. Aplicación a las masas de Pinus sylvestris L. en Álava.* Tesis Doctoral. Universidad de La Rioja.

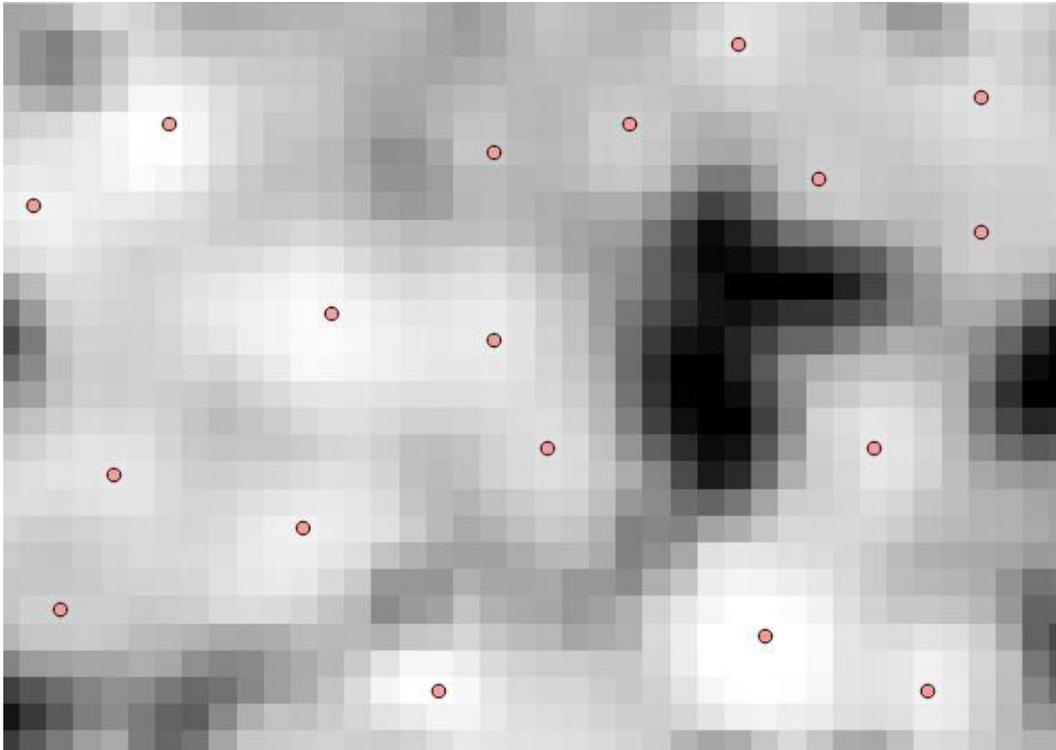
**Rodríguez, F. y Fernández, A., 2013.** Introducción a la tecnología y visualización de datos. Material docente del “Curso práctico de Aplicaciones Forestales de la Tecnología LIDAR. Agresta S. Coop. y Dielmo 3D.

**SAS Institute Inc. 2011.** SAS/STAT®. 9.3. User,s Guide. SAS Institute Inc., Cary, NC.

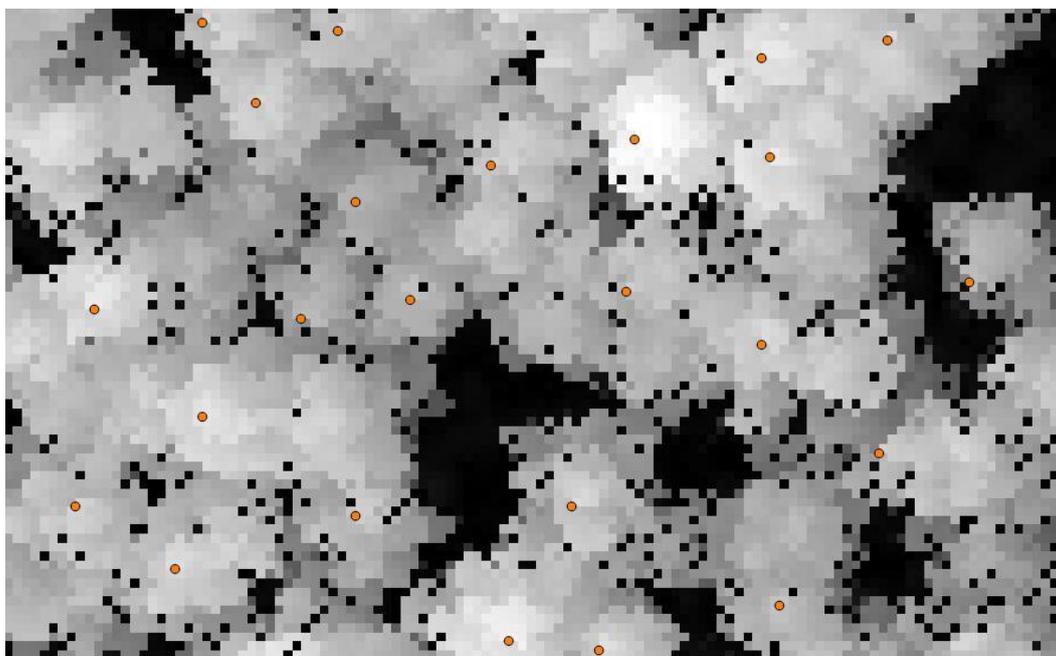
**Straub, B. M., 2003.** A Top-Down Operator for the Automatic Extraction of Trees: Concept and Performance Evaluation. In *Proceedings of the ISPRS Working Group III/3 Workshop ‘3-D Reconstruction from Airborne Laserscanner and InSAR Data* (pp. 34-39).

**Wack, R., Schardt, M., Lohr, U., Barrucho, L., Oliveira, T., 2003.** Forest inventory for eucalyptus plantations based on airborne laserscanner data. *International archives of photogrammetry and remote sensing*, 34(part 3), W13.

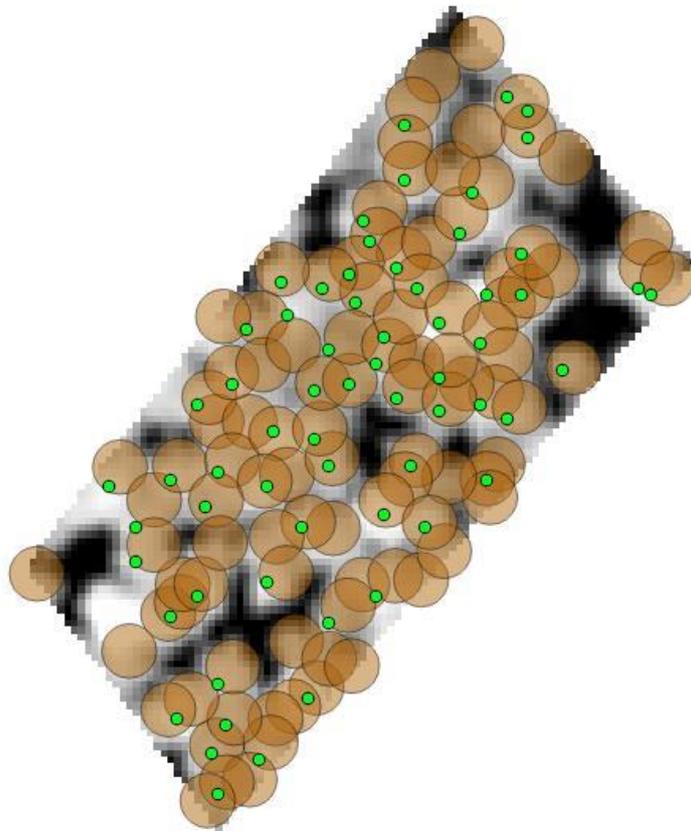
**ANEXO I. FIGURAS**



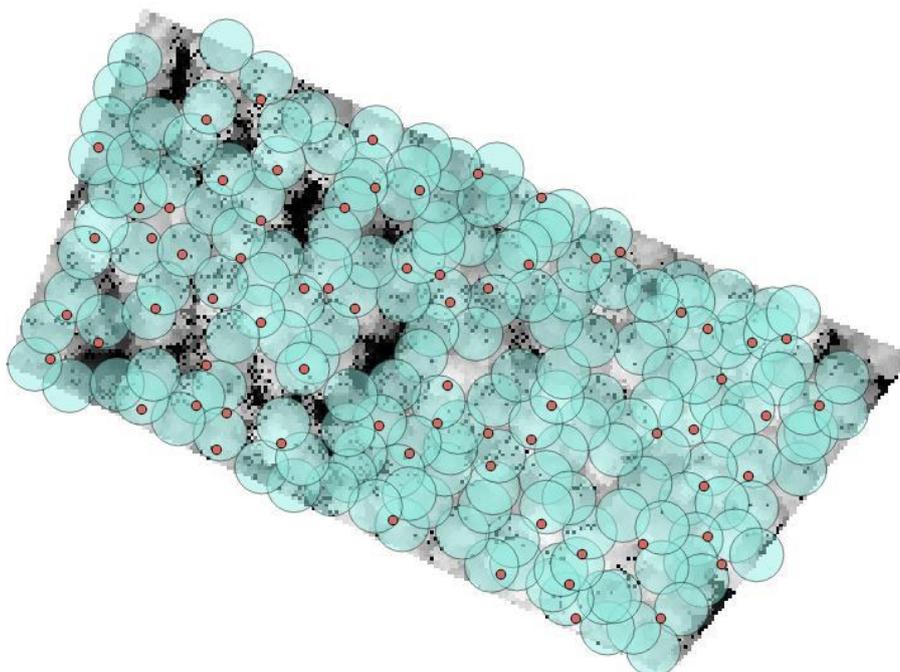
*Figura 1.1. Semillas de la parcela baja fuerte obtenidas mediante Watershed Segmentation con una resolución de 0,5 metros y suavizado.*



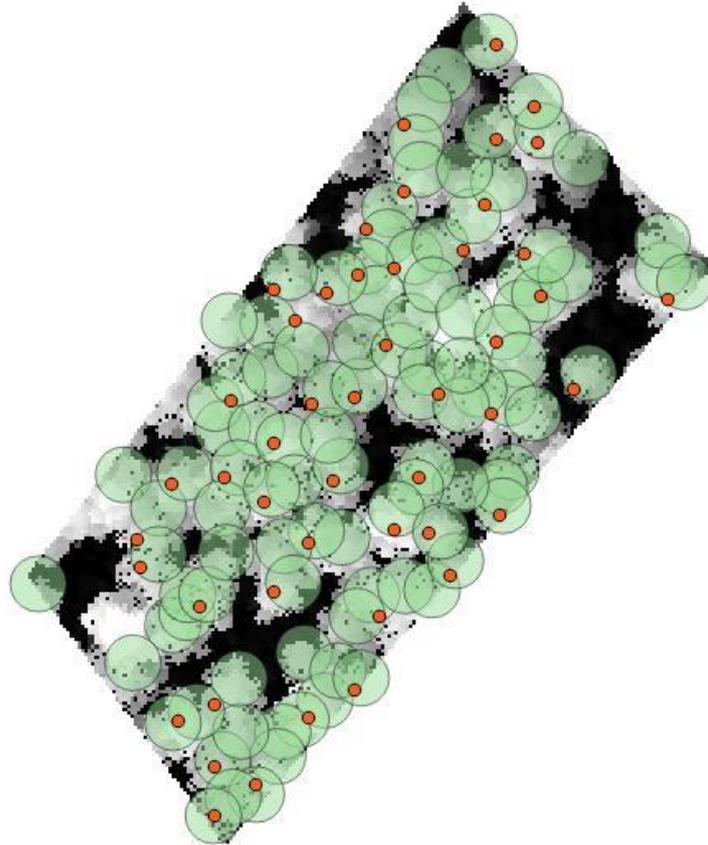
*Figura 24. Semillas de la parcela baja fuerte obtenidas mediante CanopyMaxima con una resolución de 0,25 metros.*



**Figura 25.** “Posibles positivos” de la parcela baja fuerte obtenidos mediante Watershed Segmentation.



**Figura I.IV26.** “Posibles positivos” de la parcela control obtenidos mediante CanopyMaxima.



**Figura I.V27.** “Posibles positivos” de la parcela baja fuerte obtenidos mediante CanopyMaxima.