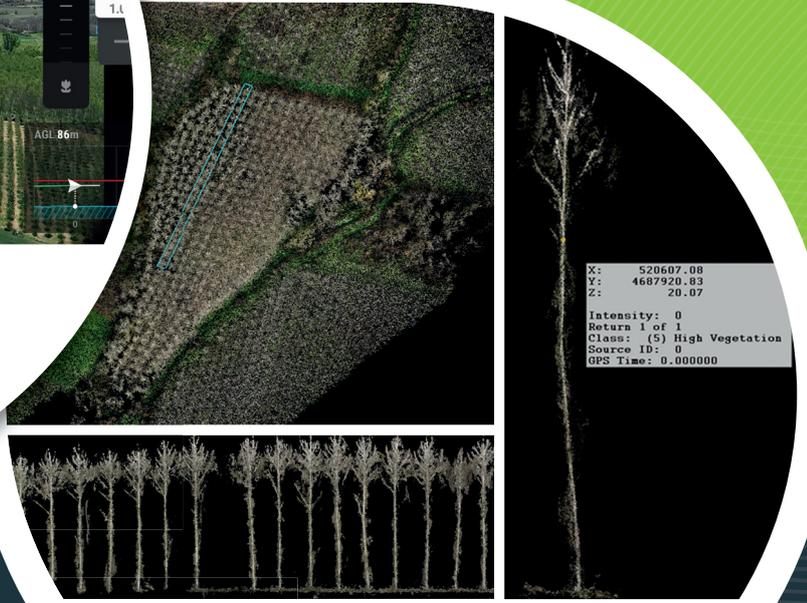


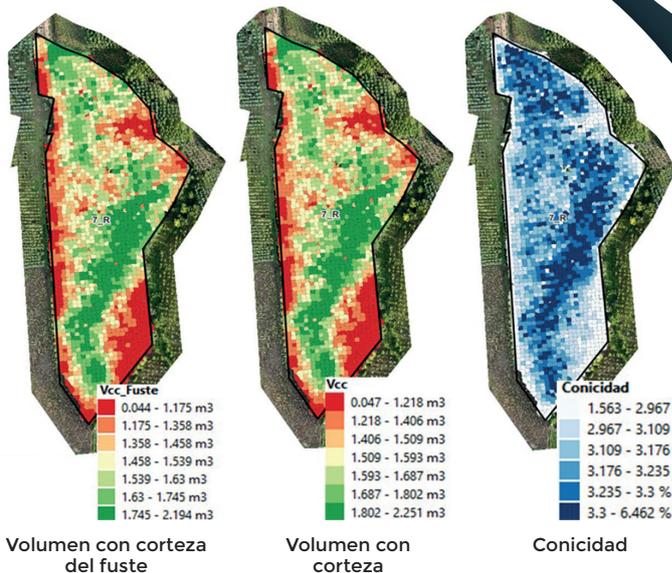
Estimación de variables dendrométricas del po a partir de vuelos fotogramétricos.



Obtención de datos remotos con dron y fotogrametría.



Delineación de copas, recorte y cálculo de métricas y alturas.



Ajuste y evaluación de los modelos, estimación de variables dendrométricas relevantes para la gestión forestal a nivel de parcela.



Mejora en: Eficiencia, precisión y reducción de costos en los inventarios de choperas

Aitor Arraiza Santillán
Föra Forest Technologies SLL

Rafael Alonso Ponce
Föra Forest Technologies SLL
Instituto Universitario de Investigación Gestión
Forestal Sostenible iuFOR

Esther Merlo Sánchez
Miguel Piñeiro García
Madera Plus Calidad Forestal SL

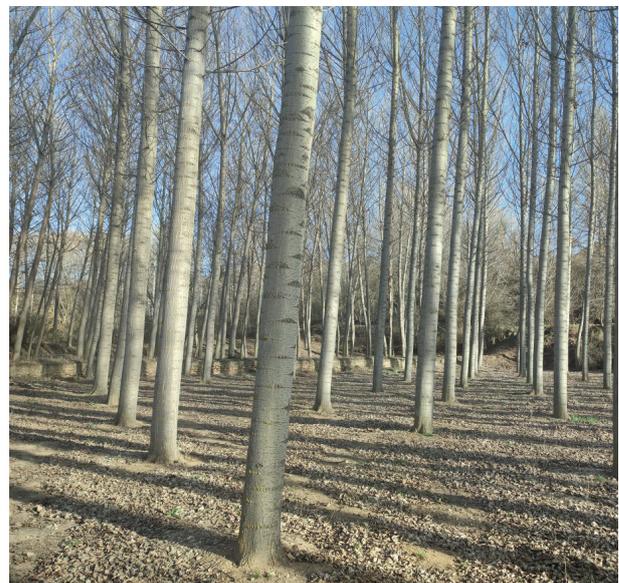
2. ESTIMACIÓN DE VARIABLES DENDROMÉTRICAS DEL CHOPO A PARTIR DE VUELOS FOTOGRAMÉTRICOS.

Introducción

Las plantaciones de rápido crecimiento y ciclo corto del género *Populus* son una de las más importantes para la producción de madera en España y constituyen la fuente de materia prima para productos de muy alta calidad y valor añadido como son el tablero contrachapado y el *laminated strand lumber (LSL)*. Sin embargo, aún existen ciertas carencias en cuanto a la digitalización de toda la cadena de suministro, en particular en lo que se refiere a la evaluación del recurso en pie, antes del aprovechamiento.

A este respecto, la captura de datos mediante sensores remotos supone una radical mejora en cuanto a rendimientos y precisión para calcular numerosas variables como el volumen en pie, la longitud del fuste libre de ramas o la conicidad del fuste, todas ellas de gran trascendencia para una gestión óptima de las plantaciones de chopo.

La semi automatización de todo el proceso (planificación del vuelo, vuelo, procesado de datos, cálculo de variables) significaría además una reducción muy relevante tanto en tiempo como en recursos y por lo tanto un aumento de la rentabilidad de este tipo de plantaciones.



Objetivos

El objetivo de este trabajo fue analizar el potencial de los datos remotos adquiridos con drones mediante vuelos fotogramétricos para la estimación de variables dendrométricas de los árboles detectados mediante algoritmos de individualización a partir de nubes de puntos obtenidas tras el procesado de los datos remotos capturados.

La razón de focalizar el análisis en la información fotogramétrica es operativa y económica: este tipo de vuelos son mucho más rápidos y baratos comparados con la captura de datos con sensores LiDAR, por lo que conseguir obtener información sólida y útil para la evaluación cuantitativa de las existencias maderables en choperas en producción, incluso para calidad de la madera en pie, constituye un paso adelante muy significativo en la mejora de la eficiencia de la gestión de este tipo de plantaciones.

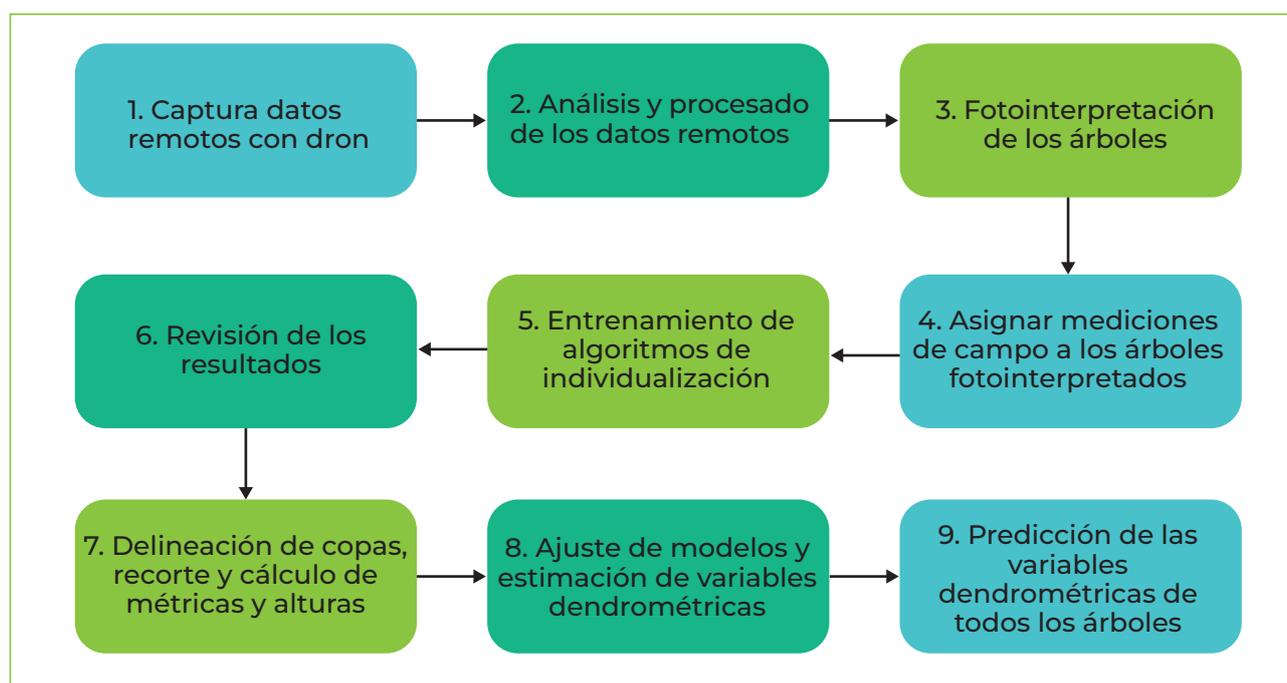
Las variables dendrométricas objetivo fueron cuatro: altura total, diámetro normal, diámetro de la base y altura de la base de la copa viva. A partir de ellas se pueden a su vez derivar directamente otras muy relevantes como pueden ser

la conicidad, la esbeltez, el volumen con corteza (total y por productos, a partir de ecuaciones de perfil ya publicadas) o la biomasa (y por tanto el stock de carbono, a partir de ecuaciones alométricas ya publicadas).

Metodología

A continuación, se describe la metodología llevada a cabo para la captura de los datos remotos, el procesado y la identificación de árboles de forma automática mediante algoritmos basados en máximos locales a partir de Modelos de la Altura de la Vegetación (MDAV). Los árboles identificados a partir del procesado de los datos remotos, junto con las mediciones tomadas en campo (diámetro normal y diámetro de la base) sobre una muestra de un total de 320 árboles de los diferentes clones objeto de estudio, han permitido ajustar unos modelos estadísticos para estimar las variables dendrométricas de todos los pies presentes en cada una de las plantaciones.

Imagen 1. Esquema de la metodología llevada a cabo.



1. Captura de datos remotos con dron

La captura de los datos remotos (mediante vuelos fotogramétricos) y en las plantaciones objeto de estudio se realizó con un dron Mavic 3 con cámara multiespectral.

Para planificar los vuelos se empleó el software DJI Pilot 2 y se evaluaron distintas alturas de vuelo (75, 90 y 100 m), con el fin de poder determinar el tamaño de píxel óptimo, tanto para generar ortomosaicos RGB y RGB-NiR, índices de vegetación como para generar nubes de puntos a partir de la técnica de SFM (*Structure From Motion*).

Para asegurar un solapamiento adecuado y capturar con precisión las copas de los árboles, que generalmente se encontraban entre 15 y 25 metros sobre el suelo, se configuró un solapamiento entre las diferentes pasadas del vuelo del 90% tanto en vertical como en horizontal. De esta forma podemos garantizar la generación de ortomosaicos continuos

y detallados, imprescindibles para los análisis posteriores.

Se realizaron vuelos en dos épocas distintas del año para evaluar las condiciones tanto en actividad vegetativa (primavera y verano) como en parada vegetativa (finales de otoño e invierno). Durante la actividad vegetativa, los datos permitieron calcular índices de vegetación y generar ortomosaicos que reflejan la altura de los chopos y la fracción de cabida cubierta. Aunque esta información no se ha empleado para estimar las variables dendrométricas, es capital para entender la densidad y la salud del bosque. En contraste, durante la parada vegetativa, los vuelos se centraron en caracterizar la altura de la vegetación y la forma de los troncos. La ausencia de hojas en esta época permite una mejor visibilidad de la estructura de los troncos y facilita la evaluación de su forma a partir de la nube de puntos 3D generada permitiendo medir variables como la altura de la base de la copa viva.



Imagen 2. Plan de vuelo (izquierda) y miembros de Föra y la UVA planificando un vuelo fotogramétrico en una de las plantaciones estudiadas.

En la Tabla 1, se muestra el tipo de datos capturados en cada una de las parcelas analizadas:

Tabla 1. Datos remotos capturados en las parcelas productivas identificadas según el clon.

PARCELA	CLON	DATOS CAPTURADOS
Hacinas	I-214	FOTOGAMETRÍA
Santa Cruz de Campezo	I-214	FOTOGAMETRÍA
	MC	FOTOGAMETRÍA
	BEAUPRE	FOTOGAMETRÍA
Aldea del Puente	I-214	FOTOGAMETRÍA
Vecilla de la Vega	RASPALJE	FOTOGAMETRÍA
Baños del Río Tobía	RASPALJE	FOTOGAMETRÍA
Santa Marina del Rey	RASPALJE	FOTOGAMETRÍA
Bercianos del Páramo	BEAUPRE	FOTOGAMETRÍA

2. Análisis y procesado de los datos remotos

El procesado de los datos remotos capturados se puede dividir en dos partes, preprocesado con Pix4Dmapper y procesado con easyLAZ®.

2.1. Preprocesado de los datos remotos en Pix4Dmapper®

En primer lugar, se realizó un preprocesado empleando el software Pix4Dmapper. Este software permite obtener ortomosaicos RGB y RGB-Nir, índices de vegetación (NDVI, SAVI, etc) y nubes de puntos LiDAR y fotogramétricas clasificadas. Estas nubes de puntos permiten caracterizar mejor la estructura del dosel forestal y la vegetación subyacente. Además, la alta resolución de los ortomosaicos y la precisión de los índices de vegetación proporcionan información detallada sobre la salud y vigorosidad de las choperas.

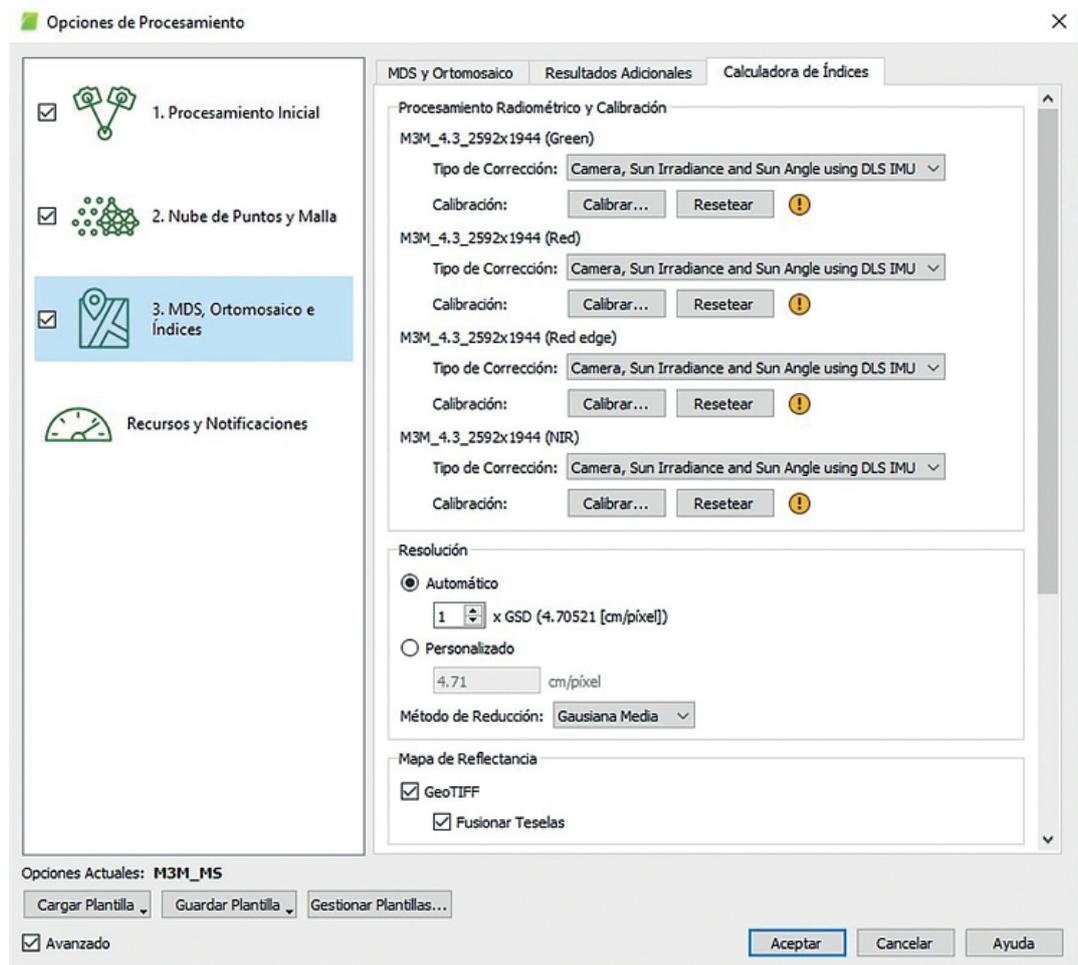


Imagen 3. Parámetros para el procesado del vuelo fotogramétrico con Pix4Dmapper.

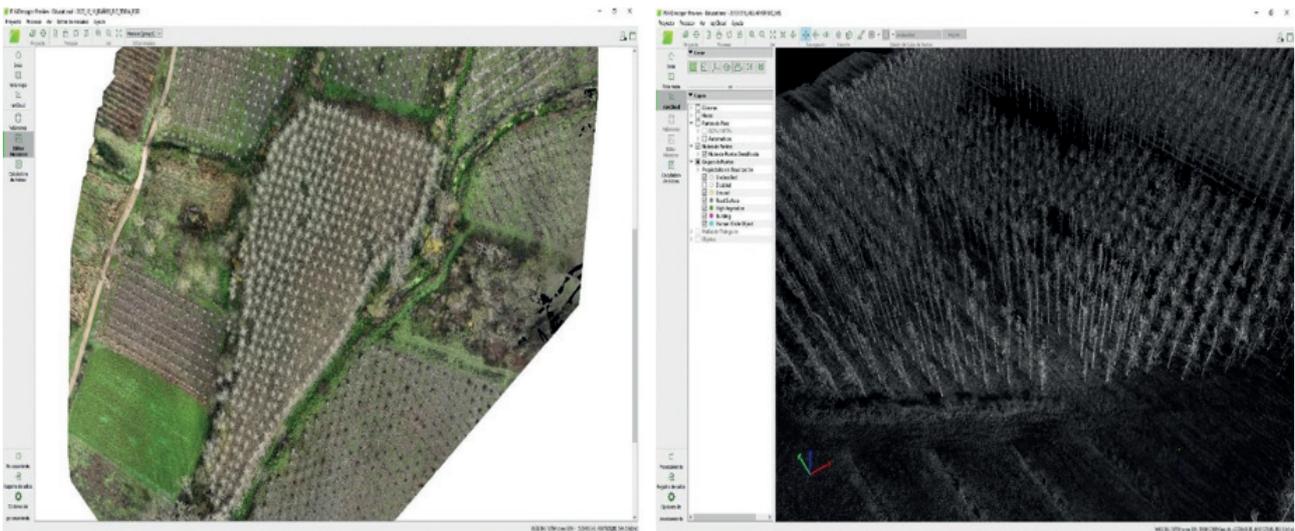


Imagen 4. Nubes de puntos fotogramétricas obtenidas en Pix4Dmapper.

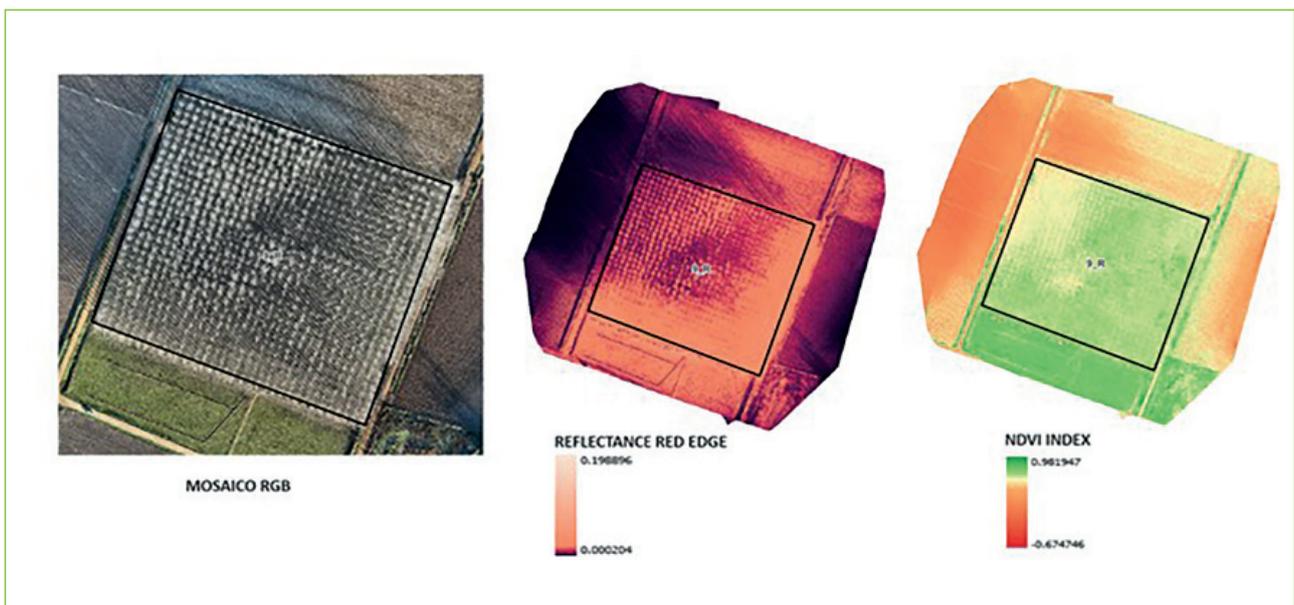


Imagen 5. Índices de vegetación y Ortomosaico RGB obtenidos en Pix4Dmapper.

2.2. Procesado de datos con easyLAZ®

Una vez obtenidas las nubes de puntos se procesaron con el software easyLAZ®, desarrollado por Föra. Este software permite el análisis y procesamiento masivo de datos LiDAR y/o fotogramétricos para la obtención de Modelos Digitales de Elevaciones,

estadísticos y otros productos de interés para la caracterización y evaluación de las parcelas objeto de estudio.

Antes de procesar los datos remotos en easyLAZ®, se realizó una revisión previa de las nubes de puntos generadas con Pix4Dmapper con el objetivo de buscar errores en la clasificación de los datos.

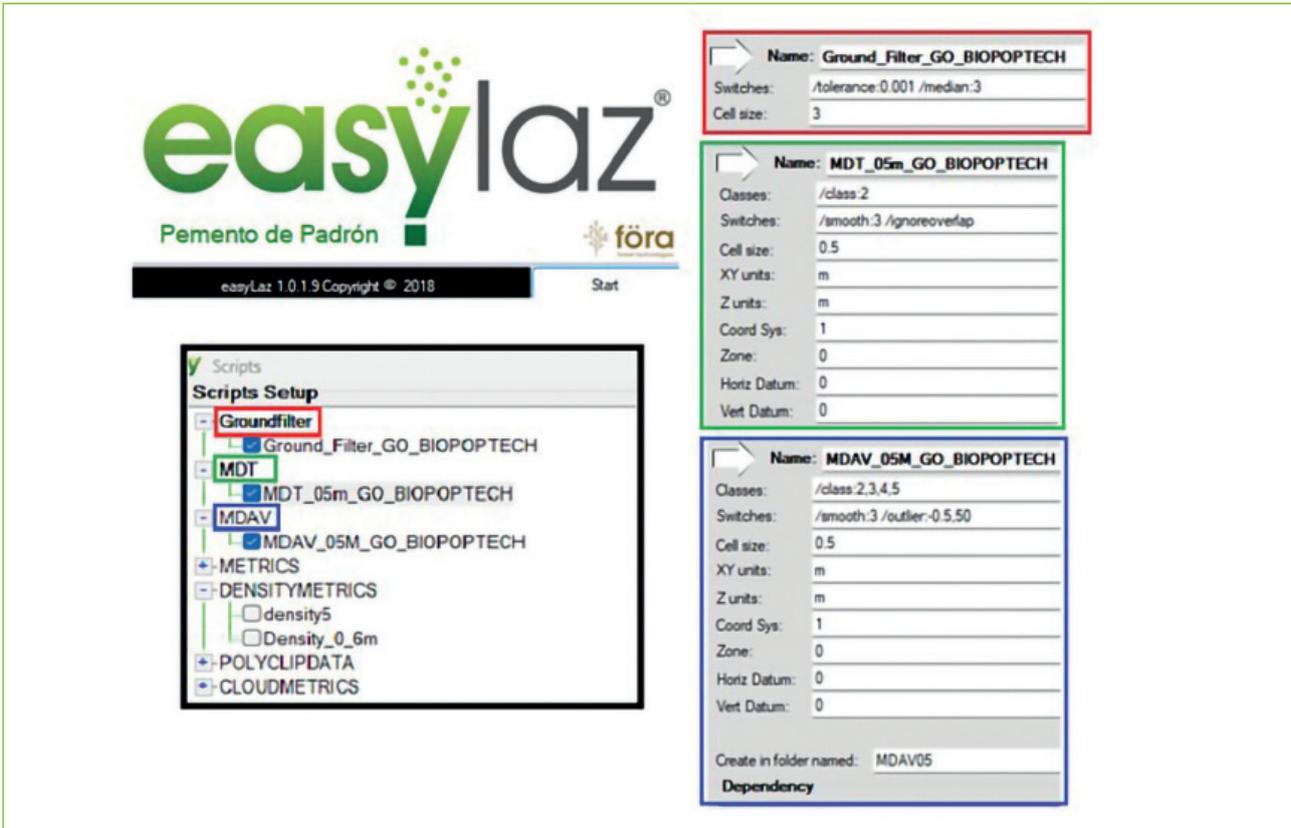


Imagen 6. Parámetros empleados en easyLAZ para el procesamiento de las nubes de puntos y generación de productos.

Revisión de las nubes de puntos

Este paso es vital para poder asegurarnos la calidad de los productos derivados del procesamiento de las nubes de puntos en easyLAZ.

Para poder obtener Modelos Digitales de Elevaciones (MDEs) precisos, es imprescindible que los puntos correspon-

dientes al suelo y a la vegetación estén bien clasificados. En el caso de encontrar errores en la clasificación de los puntos automática del software Pix4Dmapper, es necesario realizar una reclasificación de las nubes de puntos para corregir aquellos retornos mal clasificados y así poder asegurar la calidad y precisión de los productos generados con easyLAZ.

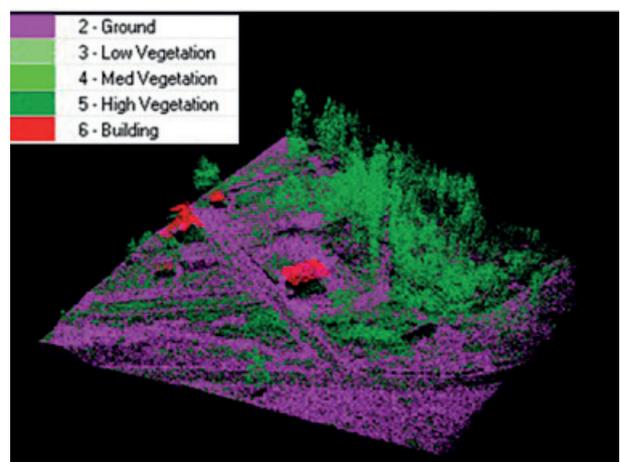
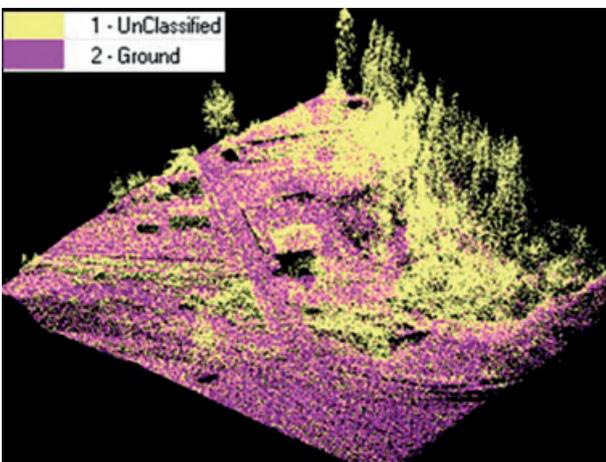


Imagen 7. Nube de puntos sin clasificar (izquierda) y nube de puntos clasificada (derecha).

Generación de Modelos Digitales de elevaciones (MDE)

A partir de las nubes de puntos clasificadas y empleando el software easyLAZ se han generado los siguientes productos:

- **Modelos Digitales del Terreno (MDT):** Representan digitalmente la topografía del suelo y del terreno y se obtienen de forma directa a partir de la interpolación de los puntos clasificados como suelo.

- **Modelos Digitales de la Altura de la Vegetación (MDAV):** Se trata de un modelo digital normalizado que representa la altura de la vegetación. Se obtiene de forma directa mediante easyLAZ a partir de los puntos clasificados como suelo y vegetación a los que se les ha asignado la altura con respecto al terreno (alturas normalizadas).

3. Fotointerpretación de los árboles

A partir de los ortomosaicos generados con Pix4Dmapper, ortofotografías aéreas del programa PNOA del IGN próximas a la fecha de plantación de las parcelas productivas y los MDAV generados con easyLAZ se ha realizado una fotointerpretación o, en otras palabras, una identificación “manual” de los pies presentes en cada una de las parcelas objeto de estudio a los que se les ha asignado a un identificador único.

El objetivo de este paso es poder registrar de forma inequívoca cada uno de los árboles fotointerpretados para posteriormente poder asignarles las mediciones tomadas en campo (diámetro normal y diámetro de la base) sobre una muestra de 320 árboles inventariados.

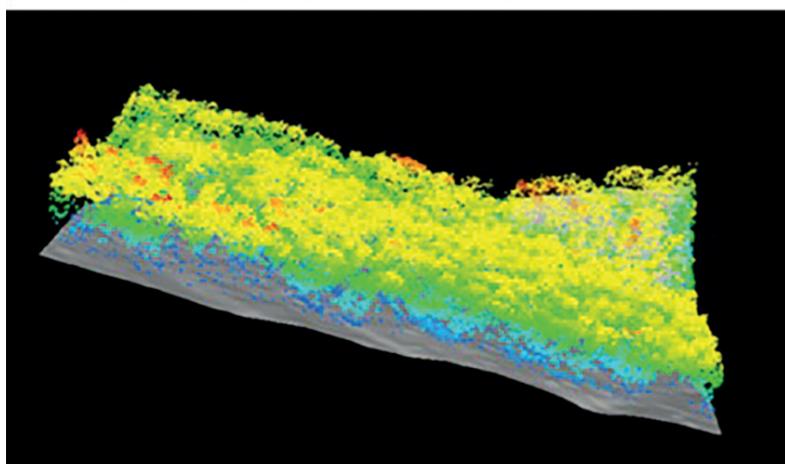
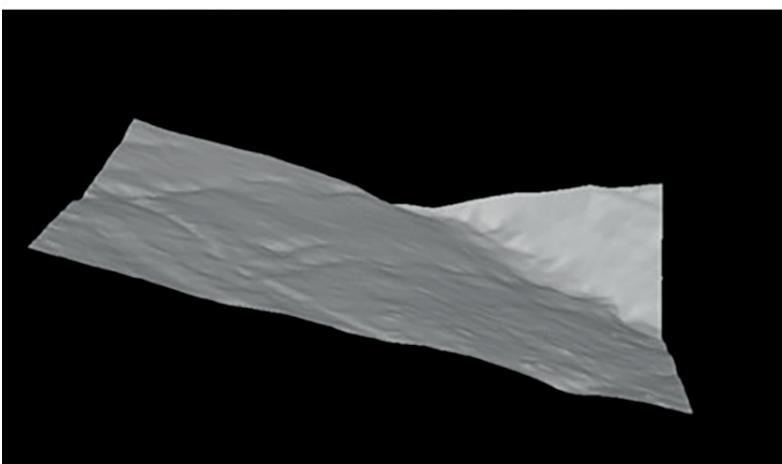
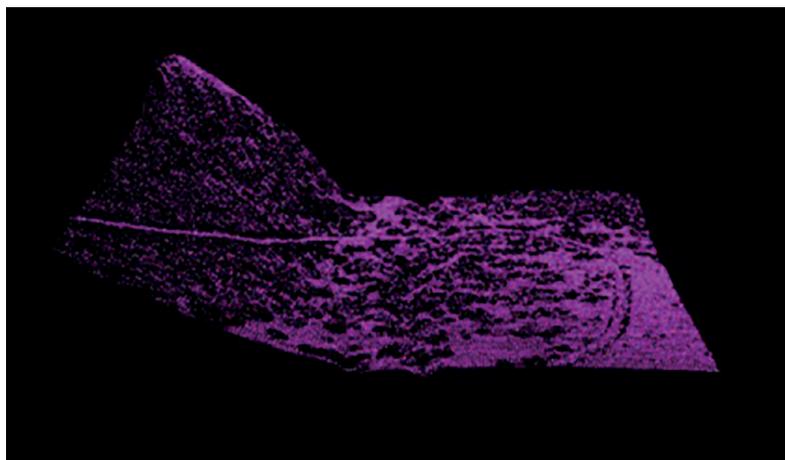
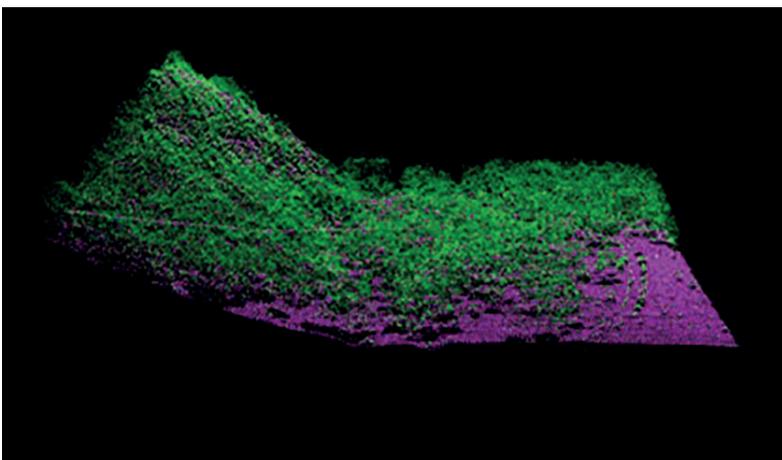


Imagen 8. Nube de puntos sin filtrar (arriba izquierda), puntos clasificados como suelo (arriba derecha), MDT (abajo izquierda) y superposición MDT con la nube de puntos normalizada (abajo derecha).

4. Asignación de mediciones de campo a los árboles fotointerpretados

El inventario de campo consistió en la medición del diámetro normal y el diámetro de la base de una muestra representativa en cada una de las parcelas objeto de estudio. Para ello, se identificó en campo un árbol de referencia fácilmente identificable en el ortomosaico de cada parcela denominado “árbol ancla”, y a cada uno de los árboles a los que se les midió el diámetro se le asignó un identificador correspondiente a su posición contando las filas y las columnas de las líneas de plantación donde se encontraba ubicado.

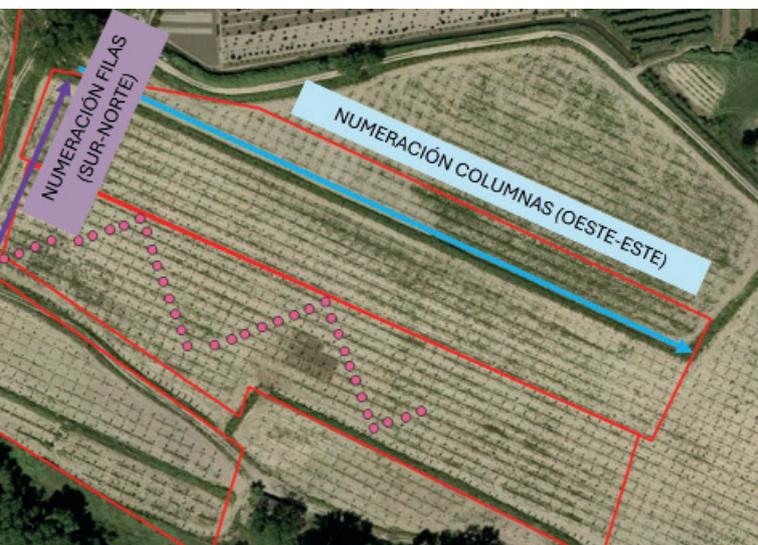


Imagen 9. Árbol ancla (punto amarillo), pies medidos en campo (puntos rosas) y dirección tomada para asignar la posición de cada árbol medido.

5. Entrenamiento de algoritmos de individualización

Los árboles fotointerpretados han servido como “verdad terreno” para entrenar los algoritmos de individualización de pies basados en máximos locales de los Modelos Digitales de la Altura de la Vegetación (MDAV).

A partir de los pies fotointerpretados en cada una de las parcelas se buscaron los parámetros óptimos de los algoritmos

de individualización (altura mínima, ancho de la ventana de búsqueda de máximos locales, etc.) con el objetivo de que el algoritmo detecte como mínimo aquellos pies fotointerpretados. Una vez definidos los parámetros óptimos para encontrar los árboles, se le asignó a cada pie de forma automática la siguiente información: identificador de árbol, posición (fila + columna) y los diámetros medidos en campo.

Como resultado se obtuvo un archivo vectorial en formato “shp” con la posición de cada uno de los árboles y su información.

En la Imagen 10, se pueden observar los resultados de la individualización de los árboles (puntos azules) y los árboles fotointerpretados (puntos naranjas). Las desviaciones que se observan entre unos puntos y otros pueden ser debidas a que las ortofotografías del PNOA empleadas para la fotointerpretación de los árboles pueden tener pequeñas desviaciones en la ortorectificación frente a los MDAV generados a partir del procesado de los datos fotogramétricos.

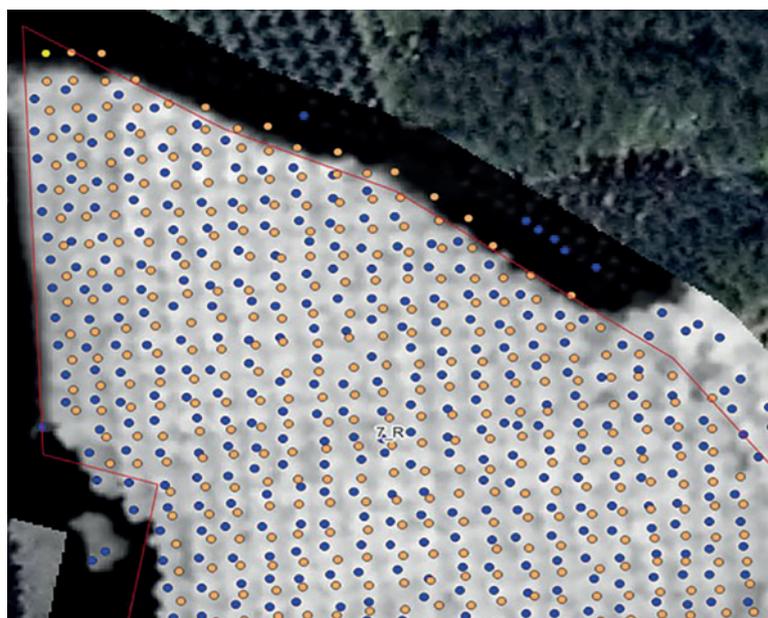


Imagen 10. Resultados de la individualización (puntos azules) vs árboles fotointerpretados (puntos naranjas).

6. Revisión de los resultados

Una vez seleccionados los parámetros óptimos para la detección de los árboles y asignada la información descrita en el paso 5, se ha realizado una validación de los resultados con el objetivo de detectar posibles errores en la identificación de los pies presentes en cada una de las parcelas. Los errores más comunes que podemos encontrarnos son errores de omisión, es decir, árboles que no han sido identificados por el algoritmo, denominados “falsos negativos” (FN), y errores de comisión en aquellos casos en los que el algoritmo haya detectado más de un árbol donde sólo había uno, denominados “falsos positivos” (FP).

Los pies identificados como FP se eliminaron de la base de datos, mientras que en el caso de los FN se procedió a añadir de forma manual los árboles empleando como referencia los ortomosaicos y los MDAV.

7. Delineación de copas, recorte y cálculo de métricas y alturas

Una vez revisados los resultados, el siguiente paso consistió en dibujar las copas de cada uno de los árboles de forma automática. Los algoritmos que se emplean están basados en métodos segmentación de cuencas a partir de los MDAV generados tras el procesado de las nubes de puntos.

Estos algoritmos implementan una función para segmentar, es decir, delinear

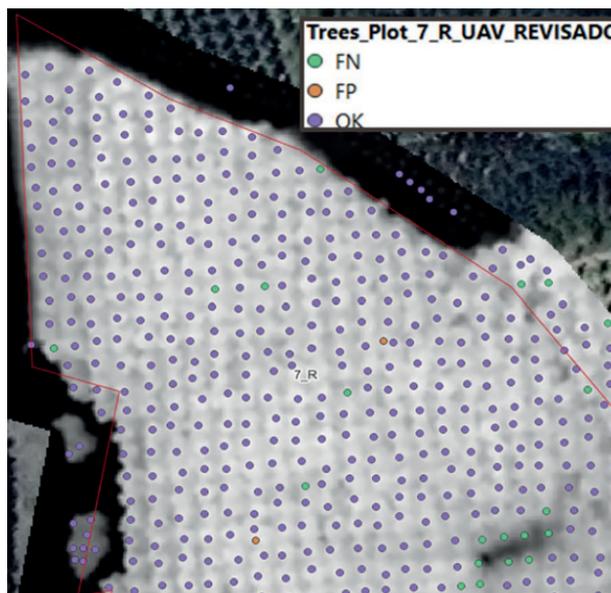


Imagen 11. Ejemplo de falsos negativos (puntos verdes) y falsos positivos (puntos naranjas) en una de las parcelas analizadas.

el perímetro de cada copa a partir de un MDAV calculando de forma automática tanto el área de cada copa como su diámetro a partir del archivo vectorial con la posición de cada uno de los árboles individualizados.

El resultado es un archivo vectorial en formato “shp” con los polígonos correspondientes a la copa de cada uno de los árboles detectados. Estos polígonos nos permitirán recortar las nubes de puntos contenidas en cada una de las copas delineadas para posteriormente poder calcular sus métricas.

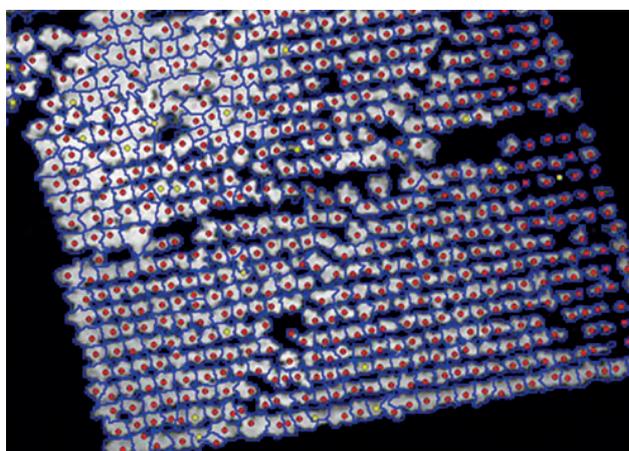


Imagen 12. Resultados de la delineación de copas.

7.1. Recorte de las nubes de puntos a partir de las copas delineadas

El recorte de las nubes de puntos de cada una de las copas se realizó con la herramienta *PolyClipdata* del software gratuito FUSION para el procesado de datos LiDAR y/o fotogramétricos.

En la Imagen 12 se pueden observar dos nubes de puntos fotogramétricas recortadas a partir de la delineación de las copas tanto en periodo de actividad vegetativa como en parada vegetativa. La adquisición de los datos remotos en parada vegetativa permite visualizar tanto el fuste como la copa del árbol. Esto nos permite poder tomar otra serie de mediciones analizando la nube de puntos como la altura de la base de la copa viva.



Imagen 13. Nubes de puntos fotogramétricas recortadas de las copas de los árboles en parada vegetativa (izquierda) vs nubes de puntos recortadas en actividad vegetativa (derecha).

7.2. Cálculo de métricas

Una vez recortadas las nubes de puntos correspondientes a cada una de las copas delineadas, se calcularon las estadísticas (métricas fotogramétricas) de cada una de las copas recortadas. Para ello se empleó la herramienta *CloudMetrics* del FUSION y como resultado se obtuvo un archivo en formato “CSV” con los estadísticos de cada una de las copas.

A partir de esta información y con las mediciones realizadas en campo se generó una base de datos que se empleó para ajustar los modelos estadísticos para la estimación de las principales variables dendrométricas de interés.

7.3. Cálculo de alturas

Por último, se visualizaron las nubes de puntos recortadas de aquellos árboles sobre los que se habían tomado mediciones en campo con el objetivo de poder medir sin necesidad de ir a campo la altura de la base de la copa como una variable adicional para tratar de modelizarla. Los resultados de las mediciones de la altura de la base de la copa se incluyeron en la base de datos con las métricas y las mediciones realizadas en campo. Es importante destacar que, en el caso de la altura total, esta variable no ha sido estimada mediante las ecuaciones ajustadas, sino directamente medida a partir de la nube de puntos fotogramétricas. La precisión de esta medición es mucho mayor que la que pueda ser obtenida desde el suelo con los aparatos tradicionales (hipsómetro, Vertex, etc.)

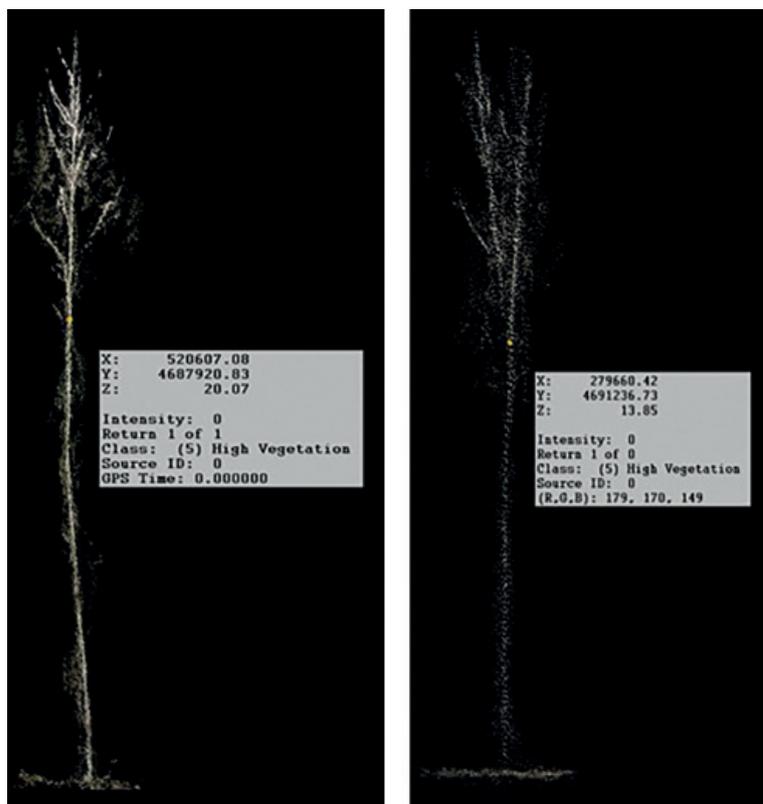


Imagen 14. Ejemplo de la medición de la Altura de la Base de la Copa a partir de la nube de puntos fotogramétrica recortada para un clon de Raspalje (izquierda) y un clon de Beaupre (derecha) en una de las parcelas de estudio.

Esta metodología que permite realizar mediciones sin la necesidad de ir al campo puede considerarse un gran avance en la estimación de variables dendrométricas a partir de vuelos fotogramétricos, pudiendo realizar inventarios pie a pie a partir de la captura y procesado de nubes de puntos fotogramétricas reduciendo considerablemente los costes, tanto de adquisición de otro tipo de datos remotos como por ejemplo con sensores LiDAR como de realizar mediciones pie a pie.

8. Ajuste de modelos y estimación de variables dendrométricas

En los siguientes apartados se describe el proceso de ajuste empleado y los resultados obtenidos.

8.1. Confección de la base de datos para el ajuste de los modelos

Como se ha explicado, para ajustar y validar los modelos matemáticos se ha dispuesto de una muestra de 320 árboles en las 9 plantaciones de los clones I-214, Beaupré, MC y Raspalje, ubicadas en las cuencas del Duero y del Ebro. Junto con las mediciones realizadas en campo y la altura de la base de la copa medida de forma manual a partir de las nubes de puntos de los árboles recortados se generó una base de datos en la que se incluyeron los siguientes grupos de variables:

- » Identificadores de parcela, clon y árbol junto con las coordenadas X e Y de cada uno de los árboles identificados mediante los algoritmos de individualización.
- » Variables explicativas dentro y dasométricas:
 - Densidad local mediante el método del sexto árbol (N6, pies/ha), es decir, calculada considerando una parcela circular con centro en el árbol objetivo y radio la distancia al sexto vecino más próximo.

- Altura “dominante local” a partir de la media de los cuatro árboles más altos de entre el árbol objetivo y los seis más próximos (HO, m)
 - Índice de Hart-Beaking local: Se calcula a partir de la densidad local y la altura dominante local (IH, %).
 - Altura total del árbol objetivo (ht, m)
 - Índice de competencia basado en las alturas, considerando los seis árboles vecinos más próximos (htl, adimensional).
 - Área de la proyección ortogonal de la copa del árbol objetivo (*crownArea*, m²)
- » Variables explicativas remotas: métricas fotogramétricas obtenidas a partir del procesado de las nubes de puntos para cada uno de los pies individualizados: Estas métricas, incluyen variables relacionadas con la distribución de las alturas (medias, percentiles, etc.), variables relacionadas con la variación (varianza, rangos intercuartílicos, etc.) y variables relacionadas con la cobertura (porcentaje de primeros retornos, número de total de retornos, etc.)
- » Variables a predecir:
- Diámetro normal (dn, cm)
 - Diámetro de la base del fuste (db, cm)
 - Altura de la base de la copa viva (hcb, m)
- » A partir de las tres anteriores es posible calcular, además, las siguientes variables dendrométricas de interés:
- Volumen total con corteza (vcc, m³)
 - Volumen con corteza del fuste (vcc_fuste, m³)
 - Conicidad (%)

8.2. Ajuste y evaluación de los modelos

La formulación matemática empleada para cada variable a predecir es un aspecto clave en cualquier procedimiento de modelización. Así, las propiedades matemáticas de cada función deben reflejar de la manera más fiel posible el comportamiento biológico del árbol en lo que a la variable modelizada se refiere.

En un principio se ajustaron ecuaciones comunes a todos los clones, pero, aunque la bondad del ajuste fue satisfactoria, su capacidad predictiva para cada clon individualmente resultó muy inferior a lo considerado razonable. Por ello se optó por ajustar ecuaciones de manera independiente para cada clon, obteniéndose resultados muy satisfactorios, con predicciones insesgadas y errores medios cuadráticos en el rango del 8- 15%.

Todo el proceso de ajuste y evaluación del modelo se ejecutó en el paquete estadístico R. En el caso de los diámetros normal y de la base se probaron formulaciones exponenciales y potenciales, en su versión linealizada, mientras que para la altura de la base de la copa viva se empleó una función logística con asíntota en la altura total.

La evaluación de los modelos obtenidos se realizó a través del análisis de la eficiencia del modelo (EF), que refleja la parte de la varianza total explicada por el modelo; el error medio cuadrático (RMSE) que analiza la precisión de las

estimaciones y el sesgo y su significancia, que evalúa la desviación sistemática de las predicciones.

8.3. Resultados de los modelos para la estimación de las variables dendrométricas

Los resultados de los ajustes, así como su diagnóstico, para cada clon y variables dependientes, se presentan a continuación. Todos los parámetros ajustados son significativos ($p < 0.05$) y la formulación obtenida (signo del parámetro de cada variable independiente) tiene sentido biológico en todos los casos.

Diámetro normal (dn):

Las ecuaciones obtenidas presentan sesgo virtualmente nulo, y unos errores medios cuadráticos que oscilan entre 9-15%. Las eficiencias son moderadas o bajas, denotando que los modelos no explican una parte importante de la varianza. La variable predictor más frecuentemente seleccionada es la densidad local (N6, mediante el método del sexto árbol), seguida del percentil 95 de las alturas (LH_P95), en dos. La formulación de tres de los clones es análoga, siendo claramente distinta para el clon I-214.

La bondad del ajuste de los modelos muestra que no se observan divergencias graves de las asunciones de normalidad y homocedasticidad, y la predicción resulta insesgada a lo largo de todo el rango de la variable predicha.

Tabla 2. Modelos ajustados para la estimación del diámetro normal para cada uno de los clones objeto de estudio.

CLON	ECUACIÓN	% RMSE	% SESGO	EF
BEAUPRE	$e^{2.926849-0.0003821 \cdot N6+0.0281504 \cdot LH_P95}$	9.6	0.02	55.9
I-214	$e^{3.616733+0.008374 \cdot crownArea-0.0000111 \cdot ALL_COUNT}$	15.1	0.01	34.2
MC	$e^{2.623606-0.0004813 \cdot N6+0.0201403 \cdot LH_MEAN}$	12.5	0.02	48.0
RASPALJE	$e^{2.85875-0.0004074 \cdot N6+0.0286534 \cdot LH_P95}$	9.0	0.06	49.0

Diámetro de la base (db):

Al igual que en el caso del diámetro normal, las ecuaciones obtenidas presentan sesgo virtualmente nulo, y unos errores medios cuadráticos que oscilan entre 9-15%. Las eficiencias son moderadas o bajas, denotando que los modelos no explican una parte importante de la varianza. Los parámetros seleccionados como óptimo para cada clon son los mismos que en el caso del diámetro normal.

Al igual que ocurre con el diámetro normal, la bondad de ajuste de los modelos muestra que no se observan divergencias graves de las asunciones de normalidad y homocedasticidad, y la predicción resulta insesgada a lo largo de todo el rango de la variable predicha.

Por último, se comprobó además la compatibilidad entre el diámetro normal (dn) y diámetro de la base (db), confirmando que se cumple siempre que $db > dn$.

Tabla 3. Modelos ajustados para la estimación del diámetro de la base para cada uno de los clones objeto de estudio.

CLON	ECUACIÓN	% RMSE	% SESGO	EF
BEAUPRE	$e^{3.122762-0.0003576 \cdot N6+0.0240429 \cdot LH_P95}$	9.7	0.02	48.3
I-214	$e^{3.722643+0.008581 \cdot crownArea-0.0000112 \cdot ALL_COUNT}$	14.8	0.02	34.6
MC	$e^{2.614158+0.0004115 \cdot N6+0.036234 \cdot LH_MEAN}$	12.0	0.02	55.3
RASPALJE	$e^{2.955588-0.0003093 \cdot N6+0.0279149 \cdot LH_P95}$	8.6	0.06	47.3

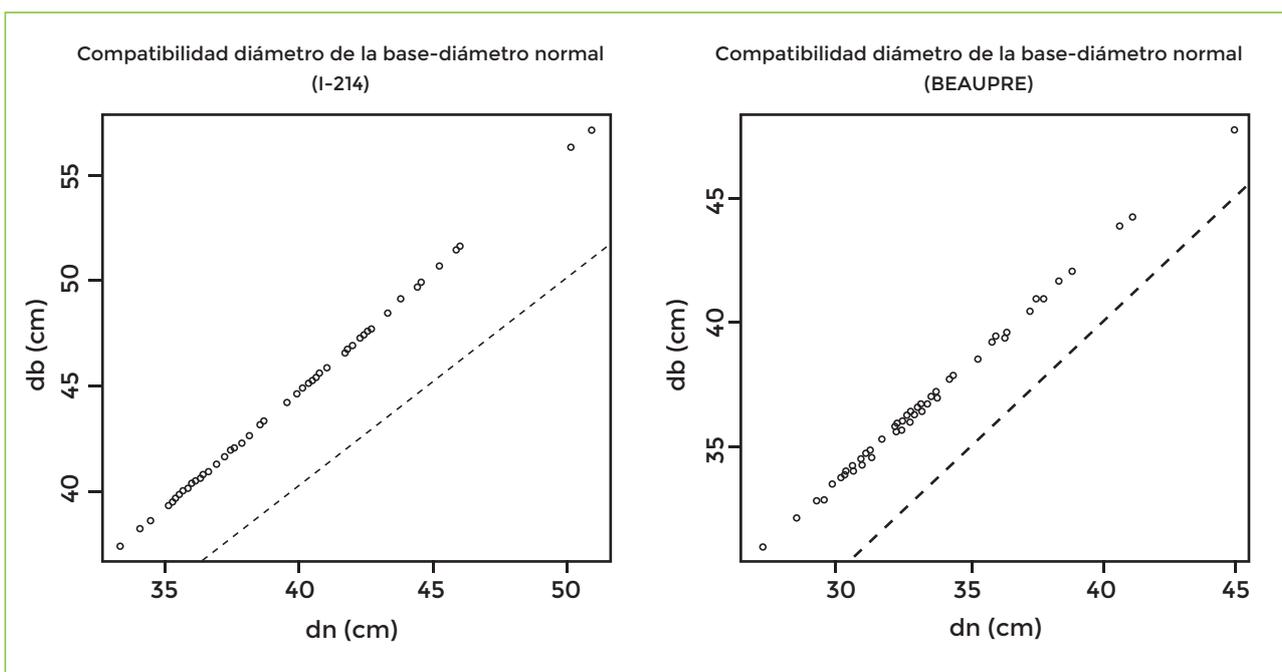


Imagen 15. Ejemplo del análisis de la compatibilidad entre los diámetros para los clones I-214 y Beaupre.

Altura de la base de la copa viva:

De nuevo las ecuaciones obtenidas presentan sesgo virtualmente nulo, con unos errores medios cuadráticos que entre el 9-10%. Las eficiencias son moderadas, denotando que los modelos explican sólo en torno al 50% de la varianza. En el caso del clon Beaupré los parámetros seleccionados incluyen tanto variables fotogramétricas como locales (en concreto, la superficie de la proyección de la copa).

Analizando la bondad de ajuste de los modelos, no se observan divergencias graves de normalidad y homocedasticidad, y la predicción resulta insesgada a lo largo de todo el rango de la variable predicha.

9. Predicción de las variables dendrométricas de todos los árboles

En la siguiente imagen se muestra el resultado de aplicar los modelos ajustados al conjunto de árboles no medidos en campo. Las copas de estos árboles fueron delineadas a partir del procesado de las nubes de puntos fotogramétricas, de manera idéntica a los árboles sí medidos en campo. Es importante recordar que, en el caso de la altura total, esta variable no ha sido estimada mediante las ecuaciones ajustadas, sino directamente medida a partir de la nube de puntos fotogramétricas puesto que la precisión de esta medición es mucho mayor que la que pueda ser obtenida desde el suelo con los aparatos tradicionales.

Tabla 4. Modelos ajustados para la estimación de la altura de la base de la copa viva para cada uno de los clones sobre los que se tomaron datos de la variable objeto a modelizar.

CLON	ECUACIÓN	% RMSE	% SESGO	EF
BEAUPRE	$\frac{ht}{1+e^{0.69731-0.081147 \cdot LH_MEAN+0.010054 \cdot crownArea}}$	9.7	0.02	48.3
RASPALJE	$\frac{ht}{1+e^{-0.73466+0.21663 \cdot LH_AAD+3.98732 \cdot LH_CV}}$	8.6	0.06	47.3

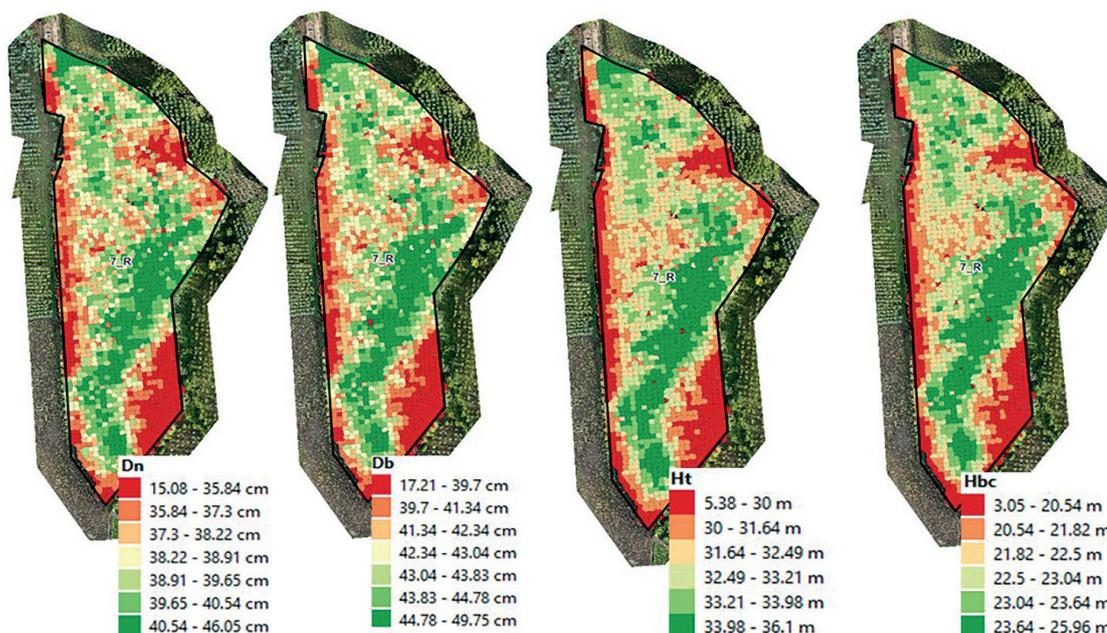


Imagen 16. Modelos aplicados a los resultados con la delineación de copas en una de las parcelas de estudio.

9.1. Estimación de otras variables de interés

Tal y como se describe en los objetivos del capítulo, a partir de las variables modelizadas, se pueden derivar directamente otras variables muy relevantes para la gestión forestal como pueden ser la conicidad, la esbeltez, el volumen con corteza (total y por productos).

A continuación, se muestran los resultados de los modelos ajustados para la estimación del volumen con corteza del fuste (Vcc_Fuste), volumen con corteza (Vcc) y conicidad.

Conclusiones

El uso de datos de teledetección representa una mejora significativa en términos de eficiencia y precisión para el cálculo de un gran número de variables, como la altura, el diámetro, la conicidad, el volumen en pie, la altura comercial o la profundidad de la copa, todas ellas cruciales para una gestión óptima de las plantaciones de chopo. Además, dado que los costes de un vuelo fotogramétrico frente a un vuelo con sensor LiDAR son significativamente más reducidos, se pueden obtener resultados precisos en la estimación de variables individuales del árbol a un coste muy competitivo.

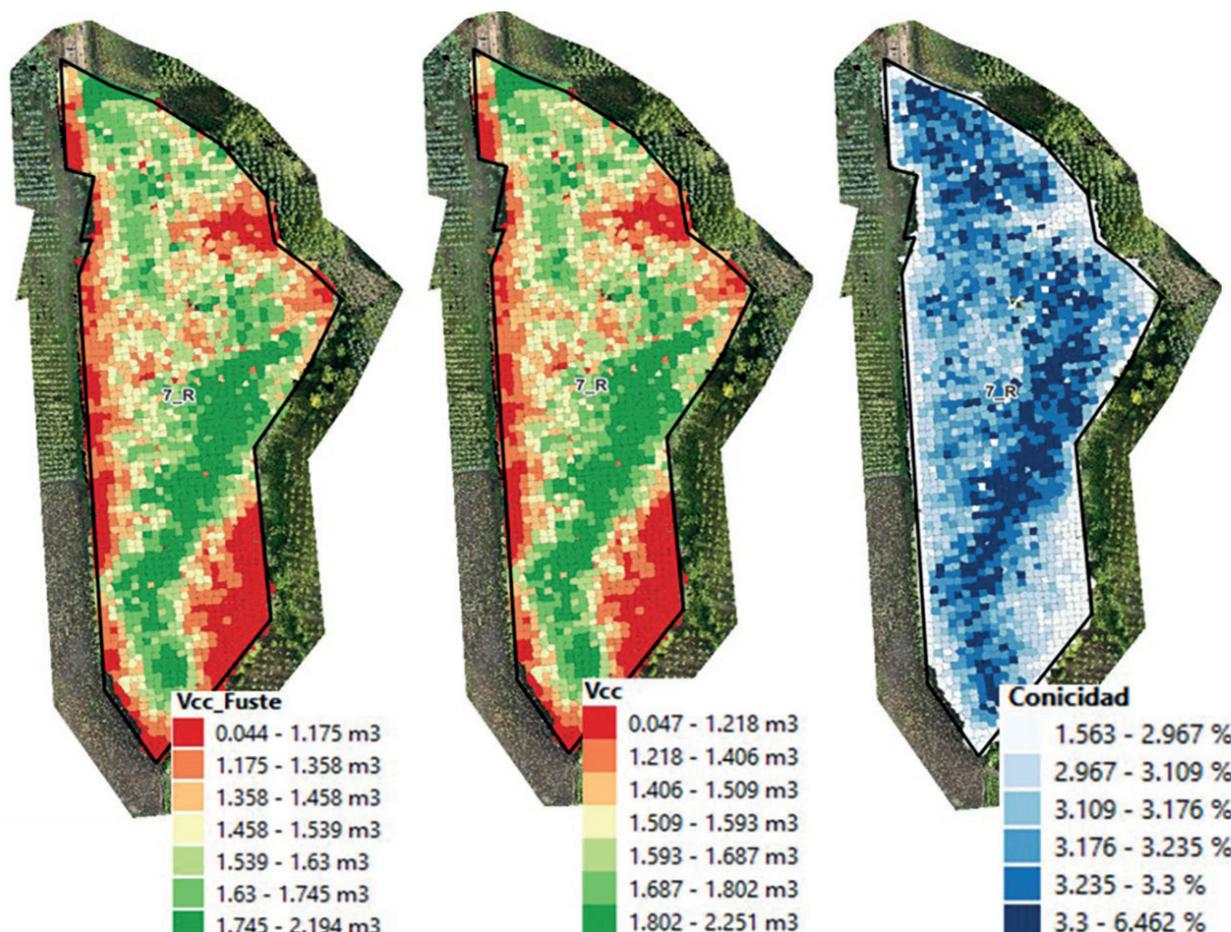


Imagen 17. Ejemplo de las otras variables de interés aplicados a los resultados de la delimitación de copas en una de las parcelas de estudio.