



2025 | **16-20**
GIJÓN | **JUNIO**

9º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

9CFE-1635

Actas del Noveno Congreso Forestal Español
Edita: **Sociedad Española de Ciencias Forestales. 2025.**
ISBN: **978-84-941695-7-1**

Organiza





Estimación de variables dendrométricas en masas de *Pinus nigra* Arnold subsp. *salzmannii* (Dunal) Franco mediante AdQSM: Comparativa entre tecnología MLS y fusión de datos MLS-DAP

WALIÑO CARRASCO, A. (1); LARA GÓMEZ, MA. (1);

(1) IDAF-Centro de Investigaciones Aplicadas al Desarrollo Agroforestal. Parque Científico Tecnológico Rabanales 21, Edificio Aldebarán, M2.12, C/Astrónoma Cecilia Payne, 14014 Córdoba, España.

Resumen:

El monitoreo temporal de la estructura forestal permite entender la dinámica del ecosistema y la aplicación de una gestión forestal eficiente. La combinación de nubes de puntos 3D y la modelización cuantitativa de la estructura de los árboles (QSM) han mostrado su potencialidad para describir con precisión la estructura forestal. La fusión de nubes de puntos procedentes de diferentes tecnologías como MLS (escáner laser móvil) y DAP (fotogrametría digital aérea) permite reconstruir con precisión la estructura tridimensional de los árboles, aunque aumenta el costo de las operaciones de inventario al requerir una doble toma de datos. En este trabajo se ha comparado la estimación de variables dendrométricas mediante el software AdQSM entre una nube de puntos MLS, con bajo coste adquisición, y la fusión de MLS-DAP. Esta comparativa se ha realizado una masa de *Pinus nigra* Arnold subsp. *salzmannii* (Dunal) Franco. Los resultados han mostrado que la incorporación de los datos fotogramétricos, obtenido con dron, mejoran un 16,6 %RMSE la estimación de la altura, un 4,8 %RMSE la estimación de dbh, un 22,6 %RMSE la estimación del volumen del fuste y un 17,9 %RMSE la estimación de la altura de la base de copa.

Palabras clave:

LiDAR terrestre, mobile laser scanning, fotogrametría digital aérea, drones, estructura forestal, AdQSM

1. Introducción

Conocer la realidad y estructura del bosque es un paso fundamental en la gestión forestal, lo que requiere de mediciones cuantitativas que describan de forma precisa cada uno de los rodales que conforman el monte. Este hecho sumado a la creciente demanda por el estudio y la valoración de los servicios ecosistémicos hacen necesario de la aplicación de inventarios de gran precisión, rápidos y de bajo coste (ARRIZZA et al., 2024; CALDERS et al., 2020). Los inventarios tradicionales no cumplen con estos requerimientos ya que conllevan un trabajo exhaustivo en la planificación y toma de mediciones, cuya calidad está sujeta a las características de la masa, experiencia de los operarios y metodologías empleadas (MCROBERTS & TOMPPO, 2007).

El significativo avance tecnológico experimentado en los últimos años en el campo de la teledetección y de sensores próximos, ha puesto a disposición de los gestores de instrumentos y herramientas capaces de obtener mediciones



estructurales con una mayor precisión, menor complejidad y en un menor tiempo que los métodos clásicos.(JURADO et al., 2022; MCROBERTS & TOMPPPO, 2007)

En este sentido, los sensores activos LiDAR (Light Detection and Ranging) (CHUVIECO, 2008) se han convertido en una herramienta fundamental para el estudio y monitoreo de los ecosistemas forestales, gracias a su capacidad de generar nubes densas de puntos que modelan la complejidad estructural del bosque (NAVARRO et al., 2024; PASTOR, 2023). Las variantes de esta tecnología se distinguen según la plataforma en la que se integra el sensor, distinguiéndose: Airbone Laser Scanning (ALS), habitualmente integrados en RPAS y ofreciendo un gran nivel de detalle del dosel arbóreo (GADE et al., 2025; JURADO et al., 2022), Terrestrial Laser Scanning (TLS), integrados en plataformas fijas terrestres y ofreciendo una visión más completa del interior del dosel (CALDERS et al., 2020; MURALIKRISHNAN, 2021) y Mobile Laser Scanning (MLS), integrado en plataformas móviles terrestres, ofreciendo por lo general un menor nivel de detalle que instrumentos TLS pero presentando una mayor facilidad y rapidez en la toma de las nubes de puntos (PCDs) (CALDERS et al., 2020; RUHAN et al., 2023; XU et al., 2015).

No obstante, el coste asociado a la adquisición y al empleo de sensores activos suele ser mucho mayor que al incurrido por sensores pasivos (NAVARRO et al., 2024). Gracias al avance de las técnicas de fotogrametría en los últimos años, se están recurriendo a nuevas metodologías para la generación de nubes de puntos densas a partir de fotogrametría aérea (Digital Aerial Photogrammetry, DAP) con un coste inferior y resultados similares a los obtenidos mediante ALS (GHANBARI & AMATI, 2021; MIELCAREK et al., 2020; ZHOU et al., 2022).

El empleo de nubes de puntos 3D se ha visto validada como una herramienta eficaz en el campo de la selvicultura de precisión (CHIAPPINI et al., 2022; DASSOT et al., 2012; NÆSSET, 2002; SHENG et al., 2024; VANDENDAELE et al., 2022). Sin embargo, el empleo de una única tecnología en la toma de datos suele derivar en una información incompleta del bosque, ya sea a nivel de copa (TLS y MLS) o por una ausencia total o parcial a nivel de tronco (DAP y ALS) (R. ZHOU et al., 2023). En los últimos años con el fin de mejorar la precisión de las mediciones, se han aplicado metodologías para la integración de nubes de puntos terrestre – aérea las cuales otorgan una compresión completa de la estructura del bosque (TIAN et al., 2019; TORRALBA et al., 2022; R. ZHOU et al., 2023).

El empleo de ecuaciones alométricas ha sido fundamental para la estimación de atributos como biomasa, volumen o carbono almacenado, gracias a su simplicidad y bajo coste. Sin embargo, su precisión depende de datos locales y pueden generar incertidumbre al aplicarse en bosques complejos y diversos (DABA & SOROMESSA, 2019; PICARD et al., 2024; XING et al., 2019). Como alternativa existen múltiples herramientas para la obtención de métricas dendrométricas como FORTLS (MOLINA-VALERO et al., 2022), 3DFIN (LAINO et al., 2024) o AIDFOREST (LÓPEZ et al., 2022), los cuales proporcionan métricas como diámetros a diferentes secciones, alturas y posición del arbolado. En comparación, los modelos de estructura cuantitativa (QSM) ofrecen un enfoque más avanzado al reconstruir la geometría



de los árboles a partir del ajuste de cilindros sobre la nube de puntos (RAUMONEN et al., 2013), proporcionando estimaciones más precisas y completas de la estructura forestal, posicionándose como una herramienta clave en la silvicultura de precisión (FAN et al., 2020; GAN et al., 2024).

En los últimos años, numerosos softwares libres basados en la metodología QSM han sido desarrollados; diferenciándose entre ellos en la eficiencia, parametrización y modo de ajuste de los cilindros que componen la estructura del árbol. En este enfoque, los más citados y empleados son SimpleForest, TreeQSM y AdQSM (HARTLEY et al., 2024). SimpleForest y TreeQSM ajustan los cilindros directamente sobre la nube de puntos, evaluando su conectividad y realizando una segmentación de las ramas (HACKENBERG et al., 2015; RAUMONEN et al., 2013); mientras que AdQSM añade un paso intermedio al generar un esqueleto que servirá como eje para el ajuste de cada uno de los cilindros que definirán al individuo (FAN et al., 2020).

2. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es comparar la precisión de un inventario forestal a partir de una nube de puntos adquirida por tecnología MLS, y otra obtenida mediante la integración de MLS y DAP. Este objetivo principal se desarrolla a través de los siguientes objetivos específicos:

- Comparar diferentes metodologías de estimación de variables dendrométricas a partir de una nube de puntos 3D, determinando el que mejor rendimiento presente.
- Obtener los datos de validación a partir de un equipo TLS de alta precisión y la aplicación del software seleccionado previamente.
- Comparar los datos de validación con los resultados obtenidos en las nubes de puntos MLS, y la obtenida por integración de MLS y DAP, determinando la metodología más precisa.

3. Metodología

Se presenta el flujo de trabajo llevado a cabo para la comparativa entre las mediciones dendrométricas derivadas de QSM procedentes de diferentes nubes de puntos (TLS; MLS; DAP + MLS). Se realiza una descripción detallada del proceso seguido para la obtención de las nubes de puntos, registro, procesado y reconstrucción mediante QSM de los IDs segmentados, haciendo énfasis en los algoritmos y parametrización empleada en cada una de las etapas del proceso (Figura 1).

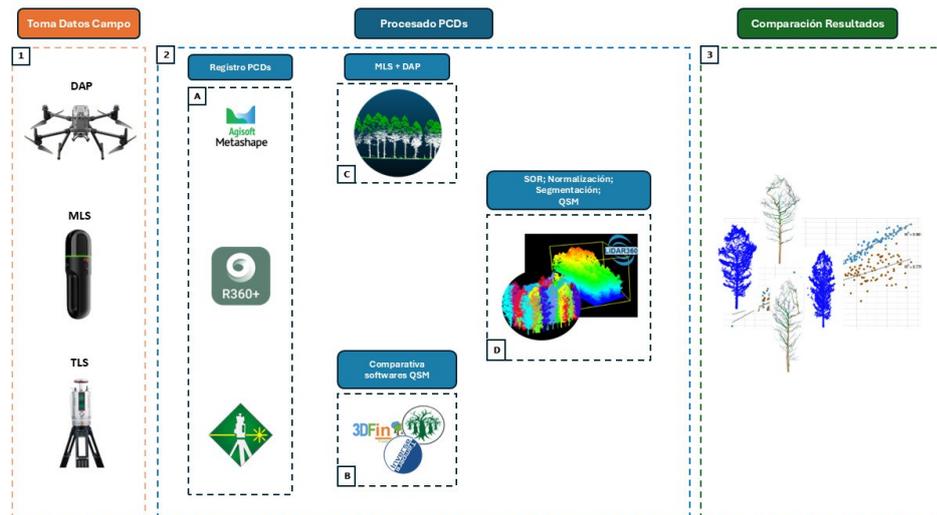


Figura 1. Flujo de trabajo para la comparativa de mediciones dendrométricas derivadas de QSM procedentes de diferentes nubes de puntos. 1) Toma simultánea de PCDs procedentes de diferentes tecnologías. 2) Procesado PCDs; a) Registro PCDs empleando Agisoft Metashape, Cyclone Register 360 y RiSCAN Pro; b) Comparativa softwares QSM: TreeQSM, SimpleForest y 3DFin. d) Procesado Final PCDs. 3) Comparativa de resultados con datos de validación. Terrestrial Laser Scanning (TLS); Mobile LiDAR Scanning (MLS); Digital Aerial Photogrammetry (DAP); Points Cloud Data (PCDs).

3.

a. Área de estudio

Se seleccionaron cuatro parcelas ubicadas en el Parque Natural de Las Sierras de Cazorla, Segura y Las Villas, caracterizadas por ser masas puras de *Pinus nigra Arnold subsp. salzmanni (Dunal) Franco*, correspondiente cada una de ellas a una tipología selvícola diferente: masas procedentes de repoblación o naturales con y sin selvicultura. Las parcelas levantadas son cuadradas con unas dimensiones aproximadas de 40x40 metros (1600 m²).

3.

a. Adquisición y procesado de datos de campo

i. Terrestrial Laser Scanning (TLS):

El escáner láser terrestre (TLS) empleado para la toma de nubes de puntos de alta resolución, corresponde al modelo Riegl VZ-2000i. Este modelo cuenta con un alcance de hasta 2.500 metros, una precisión de 5 mm, alta velocidad de adquisición tomando hasta 500.000 pts/s, sistema GNSS integrado, registro automático a bordo, entre otras muchas características reseñables.

Al ser un escáner estático, fue necesario plantear escaneos parciales desde varias posiciones, seguido de un posterior co-registro de estos en un sistema de coordenadas común (RAMOS et al., 2015). Los emplazamientos elegidos aseguraron una resolución completa de la parcela, evitando oclusiones por elementos del entorno, como árboles, rocas o edificaciones.

El modelo escogido es capaz de realizar un registro directo de los múltiples escaneos; a partir de la identificación de puntos comunes, cálculo de distancias y



su posicionamiento. Finalmente, las nubes de puntos obtenidas mediante TLS fueron exportadas en formato .laz mediante el software propietario de Riegl, RiSCAN PRO (*Versión 2.17.0*).

Las nubes de puntos (*Points Cloud Data, PCDs*) fueron procesadas mediante el software LiDAR360 (*Versión 7.0*), siguiendo el flujo de trabajo recomendado por el programa. Este proceso incluyó las siguientes etapas: eliminación de valores atípicos (outliers), clasificación de puntos de suelo, normalización de las nubes de puntos, segmentación, corrección segmentación y exportación por árbol individual (ID).

3.

a.

i. Mobile Laser Scanning (MLS):

En la toma de las PCDs procedentes de MLS se empleó el escáner dinámico Leica BLK2GO, el cual cuenta con un alcance máximo de hasta 25 m, precisión aproximada en interiores de 10 mm y una velocidad de adquisición de hasta 420.000 pts/s. A pesar de que los escáneres MLS posibilitan la toma de una gran superficie en un menor tiempo y con una menor complejidad que los estáticos, se requiere de escaneos parciales para evitar errores de deriva ocasionados por limitaciones del propio instrumento (MURALIKRISHNAN, 2021; XU et al., 2015). Ante la imposibilidad de realizar un registro directo de las PCDs, se acudió al registro indirecto mediante la metodología Diana a Diana (NAVARRO et al., 2024).

Las dianas dispuestas en la parcela (Ground Points Control; GPCs), fueron georreferenciadas a partir de un receptor GNSS de precisión submétrica (*GNSS SP20 Spectra Precision*) para posteriormente ser corregidas mediante técnicas de NTRIP (TIERRA et al., 2015), obteniendo una precisión igual o inferior a 30 cm.

Para el registro Diana a Diana de las nubes MLS, asignación de coordenadas y exportación en formato .laz, se empleó el software propietario de Leica, Cyclone Register 360 Plus (*Versión 2023.1.0*). El procesado de las PCDs se realizó mediante la metodología indicada en el apartado 3.2.1.

3.

a.

i. Digital Aerial Photogrammetry (DAP):

Para la obtención de las PCDs procedentes de DAP, se empleó el sistema aéreo no tripulado (UAS) multirrotor DJI Matrice350 RTK, en conjunto con el sensor RGB, ZENMUSE P1. La nube de puntos obtenida mediante este procedimiento cuenta con una densidad aproximada de 2.500 pts/m², la cual nos brinda un alto nivel de información de la parte aérea del bosque. Para el procesado de las imágenes de vuelo, obtención de la nube de puntos y su posterior exportación a formato .laz se empleó el software de Agisoft Metashape (*Versión 2.1.0*).

3.

a. Integración PCDs MLS y DAP:

El empleo de escáneres dinámicos (MLS) ofrece una mayor facilidad en la toma de

datos en campo que el empleo de láser estáticos (TLS); sin embargo, presentan una limitación de alcance, lo cual se traduce en una falta de definición a nivel de copa del arbolado (CABO et al., 2018). Para suplir esta carencia se acudió a la integración de PCDs procedentes de MLS y DAP, con el objetivo de obtener una visión completa del bosque (TIAN et al., 2019; TORRALBA et al., 2022; R. ZHOU et al., 2023).

Para ello, los GPCs empleados en los escaneos MLS fueron colocados de manera que fueran comunes y visibles durante el vuelo del UAS. Esto permitió realizar la unión de ambas nubes mediante la metodología Diana a Diana (NAVARRO et al., 2024; TIAN et al., 2019) empleando el software de Cyclone Register 360 Plus. Posteriormente, se procedió con la asignación de coordenadas y exportación de la PCDs en formato .laz. Los errores registrados en la integración oscilan entre los 8 – 12 mm. Tal y como se aprecia en la Figura 2, a partir de la integración se pueden obtener resultados similares a los de un equipo de alta calidad (TLS). Para el procesado de las PCDs se siguió el mismo procedimiento y parametrización empleada que en el apartado 3.2.1.



Figura 2. Comparativa entre nubes de puntos de distintas procedencias para una de las parcelas de estudio. TLS (izquierda), MLS + DAP (centro), MLS (derecha).



3.

a. **Análisis resultados:**i. **Comparación softwares QSM:**

Se seleccionaron y compararon cuatro softwares libres para la obtención de métricas dendrométricas; de los cuales, tres aplican la metodología QSM. Los softwares QSM escogidos fueron los más citados en este campo TreeQSM, SimpleForest y AdQSM (FAN et al., 2020; HACKENBERG et al., 2015; RAUMONEN et al., 2013). Adicionalmente 3DFin fue escogido por su capacidad de medición de múltiples diámetros a lo largo del árbol; lo cual, en conjunto con la altura, permite una reconstrucción completa del individuo (LAINO et al., 2024).

Se empleó la PCD procedente de TLS correspondiente a la parcela procedente de repoblación y con selvicultura aplicada, para la comparativa entre las mediciones comunes de los 4 softwares; siendo estas, altura (h), diámetro normal (dbh) y volumen de tronco (vcc). Se siguieron las recomendaciones de los autores para la parametrización y obtención de resultados.

Finalmente, se analizaron las correlaciones entre las mediciones comunes de AdQSM con el resto de los softwares para cada uno de los IDs, obteniendo el coeficiente de determinación (R^2), error medio cuadrático (RMSE y RMSE %) y sesgo estadístico (BIAS y BIAS %) (CHICCO et al., 2021; WHEELER & CALDER, 2007).

3.

a.

i. **Generación datos validación:**

Tras comparar los softwares QSM más relevantes y ante la imposibilidad de realizar mediciones destructivas; se definió como datos de validación a los resultados obtenidos a partir del software AdQSM aplicado a las PCDs procedentes de TLS. Su elección se justifica a que provienen de un instrumento considerado como de alta calidad; dada su alta precisión, largo alcance y alta densidad de puntos, otorgando una definición completa del arbolado.

La reconstrucción mediante AdQSM sigue los siguientes pasos: 1) Delimitación de los cilindros iniciales del tronco 2) Aplicación algoritmo MTS (Minimum Spanning Tree Algorithm) para la extracción del esqueleto inicial del árbol (HAI ZHOU et al., 2001) 3) Ajuste de cilindros a partir del esqueleto delimitado 4) Jerarquización de ramas. 5) Medición variables dendrométricas sobre el QSM obtenido.

El software requiere del ajuste de dos parámetros importantes, Height_Segmentation (HS) y Cloud Parameter (CP). HS determina la altura de los segmentos en los que será ajustada la nube, mientras que CP representa el porcentaje aleatorio de puntos que serán empleados por el algoritmo para la elaboración del QSM. En este estudio se mantuvo el valor predeterminado de CP (0,003) en cada una de las reconstrucciones. Sin embargo, se utilizaron diferentes valores del parámetro HS (0,4; 0,6; 0,8 y 1,0) para llevar a cabo múltiples reconstrucciones en cada uno de los IDs. De esta forma, las mediciones

dendrométricas finales resultan del promedio de las mediciones obtenidas en cada una de las reconstrucciones QSM para cada uno de los IDs (GAN et al., 2024). Por último, se calcularon las métricas dasométricas para el conjunto e las 4 tipologías.

3.

a.

i. **Comparativa DAP + MLS vs MLS:**

Siguiendo el mismo análisis estadístico que en el apartado 3.4.1, se compararon los resultados obtenidos en los datos de validación, con los derivados de la aplicación del software con mejor rendimiento sobre las PCDs de MLS y DAP + MLS. Las mediciones escogidas para la comparación fueron aquellas consideradas más relevantes a nivel forestal; siendo, altura (h), diámetro normal (dbh), volumen de fuste (vcc), volumen total (vt), altura base de copa (cbh).

4. **Resultados**

a. **Comparación softwares QSM**

Los resultados visibles en la **Tabla 1**, reflejan una alta semejanza entre los softwares AdQSM, TreeQSM y 3DFin. Se aprecia una alta similitud en las mediciones para las métricas de altura (R^2 : 0,98; RMSE: 1,3 %; BIAS: 0,017% vs R^2 : 0,91; RMSE 3,44 %; BIAS -2,12%) y diámetro normal (R^2 : 0,86; RMSE: 3,72% y BIAS: -0,61% vs R^2 : 0,86; RMSE: 6,96% y BIAS: -5,84%); y un detrimento en el cálculo de vcc (R^2 : 0,71; RMSE: 12,75% y BIAS: 1,28% vs R^2 : 0,9; RMSE: 10% y BIAS: -6,59%). Por otro lado, SimpleForest ha demostrado un peor rendimiento en el cálculo de alturas (R^2 : 0,32; RMSE: 25,04% y BIAS: 24,51%), y resultados comparables al resto en la obtención de diámetros y volumen de fuste (R^2 : 0,85; RMSE: 3,85% y BIAS: -1,64%; R^2 : 0,78; RMSE: 13,94% y BIAS: -10,06%).

Tabla 1. Evaluación comparativa de modelos QSM: AdQSM frente TreeQSM, 3DFin y SimpleForest en la estimación de mediciones dendrométricas. Se analizaron las relaciones entre las mediciones h, dbh y vtrunk, a partir de la obtención del coeficiente de determinación (R^2), error medio cuadrático (RMSE) y sesgo estadístico (BIAS)

Altura	Diámetro normal	Volumen de fuste								
		R ²	RMSE(%)	BIAS(%)	R ²	RMSE(%)	BIAS(%)	R ²	RMSE(%)	BIAS(%)
3DFin	0,91	3,44	-2,12	0,86	6,96	-5,84	0,9	10	-6,59	
TreeQSM	0,98	1,3	0,017	0,86	3,72	-0,61	0,71	12,75	1,28	
SimpleFo rest	0,32	25,04	24,51	0,85	3,85	-1,64	0,78	13,94	-10,06	

4.

a. **Generación datos validación:** Se muestran las métricas dasométricas derivadas de los 179 individuos evaluados, obtenidas al aplicar la metodología AdQSM en las PCDs derivadas de TLS (**Tabla 2**).

Tabla 2. Mediciones dasométricas para el conjunto de árboles evaluados. Número de pies por ha (Npies), área basimétrica (G), diámetro medio cuadrático (Dg), altura media (H), altura dominante (H0).

Estadístico	Npies (pies/ha)	G (m ² /ha)	Dg (cm)	H (m)	H0 (m)
Media	410,07	25,64	32,51	18,77	19,51
Mínimo	133,33	14,72	21,02	11,09	12,04
Máximo	922,22	38,08	41,18	22,70	23,41
Desviación estándar	365,29	11,20	8,39	5,31	5,35

4.

a. Comparativa DAP + MLS vs MLS:

Siguiendo la metodología descrita en el apartado 3.4.3, se obtuvieron las mediciones dendrométricas para las PCDs procedentes de DAP + MLS y MLS. Posteriormente, se compararon los resultados con los datos de validación (3.4.2).

En la **tabla 3** y las **figuras 3, 4 y 5** se muestran los resultados obtenidos de la comparación entre las PCDs con los datos de validación para la totalidad de las parcelas. Analizando las mediciones derivadas de DAP + MLS, se aprecia como las métricas de h y dbh guardan altas correlaciones con respecto a los datos de validación, con valores de R^2 superiores a 0,9. A su vez, se aprecian valores bajos de RMSE(%) y BIAS(%) (>10%), lo que sugiere una alta semejanza en las mediciones.

Por otro lado, las métricas de vcc, vt y cbh reflejan altas correlaciones con las mediciones tomadas mediante TLS ($R^2 > 0,85$); aunque al analizar los valores RMSE, se observan errores notables en el cálculo de la métrica cbh (>30%). Los valores BIAS recogidos muestran subestimaciones consistentes en el cálculo de las métricas de vcc y cbh con respecto a los datos de validación.

En las PCDs derivadas de MLS, se aprecia como para la métrica dbh se han obtenido valores de R^2 , RMSE y BIAS muy similares a los reflejados en la PCDs derivadas de DAP + MLS. El caso de la métrica h es diferente, en la cual a pesar de que se han obtenido valores de R^2 relativamente altos (>0,75), se observan errores y sobrestimaciones notables al analizar los valores de RMSE y BIAS. Lo mismo ocurre en el resto de las métricas; dónde a pesar de que se han obtenido valores de R^2 aceptables (>0,65), se observan valores de RMSE y BIAS superiores al 50% y 20% respectivamente, lo cual indica una mala precisión y sobreestimaciones significativas en las mediciones.

Tabla 3. Evaluación comparativa en la estimación de mediciones dendrométricas mediante AdQSM entre diferentes PCDs con los datos de validación para la totalidad de las parcelas. Se analizaron las relaciones entre las mediciones h, dbh, vcc, vt y cbh, a partir de la obtención del error medio cuadrático (RMSE) y sesgo estadístico (BIAS)



	h (m)	dbh (cm)	vcc (m3)	vt (m3)	cbh (m)	
DAP + MLS						
RMSE		RMSE	1,324	2,4	0,225	0,3311
RMSE (%)		7,93	8,36	28,867	26,70	32,14
BIAS		-0,682	0,98	-0,0971	0,1005	-0,727
BIAS (%)		-4,087	3,42	-12,45	8,53	-10,26
MLS						
RMSE		RMSE	4,09	3,79	0,4016	0,789
RMSE (%)		24,515	13,20	51,50	63,64	50
BIAS		2,68	0,982	0,1932	0,448	1,93
BIAS (%)		16,06	0,68	24,77	36,21	27,34

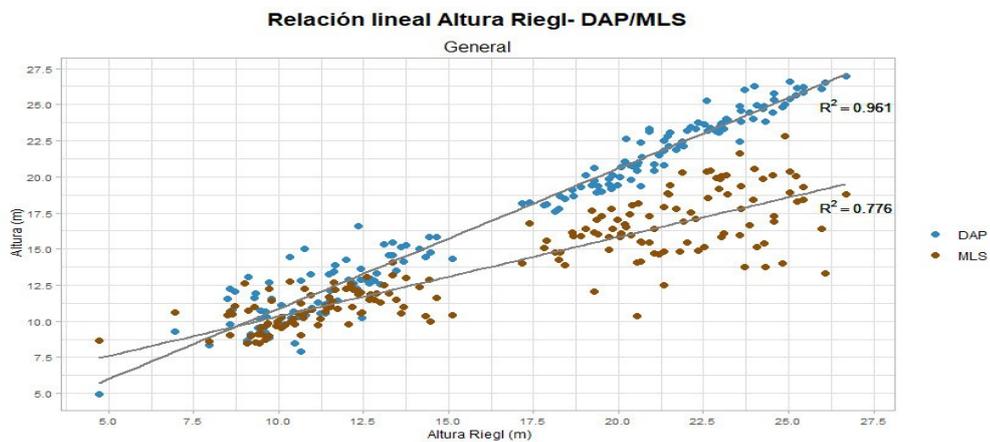


Figura 3. Relación lineal entre h y dbh derivadas de MLS + DAP (azul) y MLS (marrón) con respecto a datos de validación (TLS). Para la métrica dbh se han obtenido valores de R^2 muy similares en ambos tipos de PCDs, con valores de R^2 de 0,953 y 0,874. En contraste se aprecia una notable diferencia en la métrica h (0,961 vs 0,776), la cual experimenta una notable mejora en las PCDs derivadas de DAP + MLS.

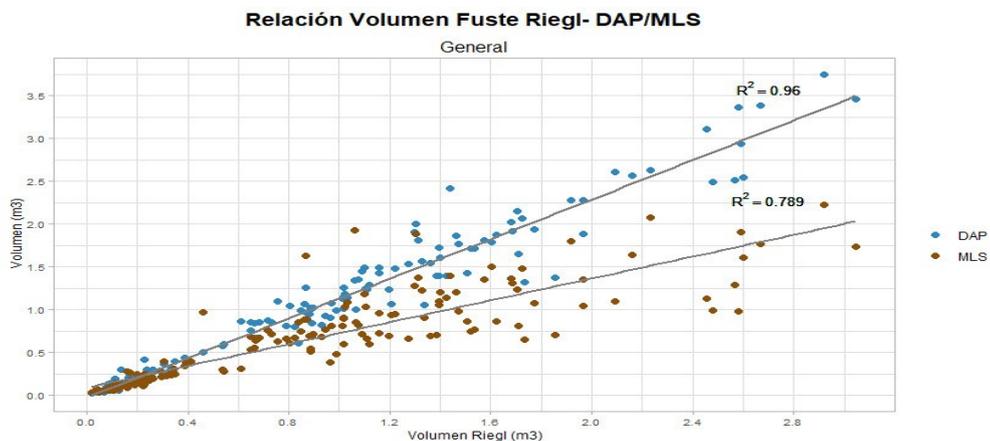


Figura 4. Relación lineal entre v_{cc} y v_t obtenidas en MLS + DAP (azul) y MLS (marrón) con respecto a los datos de validación. Se aprecian altas correlaciones en las mediciones derivadas de DAP + MLS con valores de $R^2 > 0,9$ para ambas métricas. En contraste los resultados derivados de MLS guardan una menor correlación con respecto a los datos de validación (0,789 y 0,778 respectivamente).

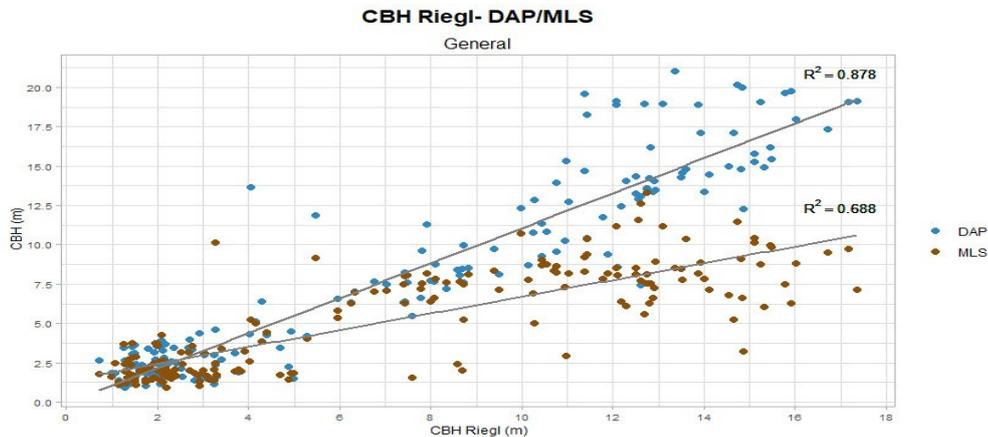


Figura 5. Relación lineal para la métrica de cbh entre MLS + DAP (azul) y MLS (marrón) con respecto a los datos de validación. Al igual que para el resto de las métricas se observan mejoras notables en la estimación de cbh en las PCDs derivadas de DAP+ MLS con respecto a MLS (0,878 vs 0,688).

5. Discusión

En este estudio se ha evaluado la precisión en la estimación de variables dendrométricas a partir de PCDs generadas mediante MLS y de la integración de MLS + DAP, con respecto a los resultados obtenidos utilizando un equipo de alta calidad (TLS). Para ello, se analizó el rendimiento de softwares basados en la metodología QSM, comparando los resultados obtenidos con el software AdQSM frente a los generados por TreeQSM, SimpleForest y 3DFin para cada uno de los IDs segmentados. Finalmente, se consideraron como datos de validación las mediciones obtenidas mediante la aplicación de AdQSM sobre las PCDs generadas con TLS, comparándolas con las mediciones obtenidas al aplicar el mismo software en las PCDs de MLS y MLS + DAP.

5.

a. Comparativas metodologías QSM

Se aprecian altas similitudes entre las mediciones derivadas de AdQSM y TreeQSM para PCDs procedentes de TLS; concordantes con estudios pasados, como los realizados por GAN et al.(2024), en el que se obtuvieron similitudes para las métricas de diámetro, altura y área de copa para PCDs derivadas de DAP y ALS. Lo mismo ocurrió en LIU (2024) donde se compararon las métricas de dbh y biomasa aérea (AGB) procedentes de ALS, obteniendo rendimientos semejantes en ambos softwares, con una aceptable precisión en la estimación de dbh para clases medias



– altas (>20 cm) y sobreestimaciones en la estimación de AGB. Por otro lado, DONG et al. (2021) compararon el rendimiento de ambos para el cálculo de vcc en PCDs procedentes de fotogrametría terrestre, obteniendo resultados más consistentes para AdQSM (R^2 : 0,72; RMSE: 32,78% CCC: 0,77 vs R^2 : 0,40; RMSE: 35,16%; CCC: 0,60) Igualmente, FAN et al. (2020) compararon el rendimiento de ambos softwares en el cálculo de AGB en árboles tropicales, obteniendo resultados idénticos (R^2 : 0,96; RMSE: 22,62% vs R^2 : 0,96; RMSE: 23,20%) aunque con notables ventajas en la velocidad de procesamiento para AdQSM (4-8 s/ID vs 1- 3 min/ID para TreeQSM).

Lo mismo ocurre entre 3DFin y AdQSM, dónde a pesar de que 3DFin no aplica la metodología QSM, se pueden obtener resultados muy similares a los de AdQSM y TreeQSM apoyándose en los valores diametrales a diferentes secciones y la altura total para una reconstrucción a nivel individual. Resultados más desfavorables son los obtenidos con SimpleForest; dónde a pesar de que se aprecian similitudes en el cálculo de dbh y vcc, se reflejan subestimaciones groseras en la métrica altura en comparación con el resto de los softwares. Las reconstrucciones QSM resultantes de SimpleForest muestran una generación limitada hasta los primeros metros de copa; hecho que difiere notablemente de los resultados recogidos en HACKENBERG et al., 2014, 2015, dónde se aprecia una reconstrucción completa del individuo. SimpleForest realiza la reconstrucción a través del ajuste de esferas interconectadas y solapadas que representan la estructura del árbol, a partir de las cuales se realiza el ajuste de cilindros, obteniendo la reconstrucción QSM (HACKENBER et al., 2015). Este proceso requiere, por tanto, de IDs con una definición completa en ramas y tronco, acompañada de una alta densidad de puntos, realidad que difiere en gran medida del caso de estudio, dónde la alta ramosidad y densidad de follaje provoca oclusiones en el interior de las copas, dificultando el perfecto funcionamiento del software (HARTLEY et al., 2024).

Ante escenarios con presencia de oclusiones, las metodologías seguidas por AdQSM y por TreeQSM, parecen otorgar resultados más consistentes. AdQSM realiza la reconstrucción tomando como eje la esqueletización de la estructura del árbol; mientras que TreeQSM, se basa en la segmentación de la superficie de la nube de puntos en pequeños parches o subconjuntos de puntos, los cuales, a partir de análisis de vecindad, serán interconectados, permitiendo diferenciar entre ramas y fuste (CALDERS et al., 2015).

Si bien es cierto que la calidad de las mediciones de campo varía en función de la complejidad de la masa, experiencia del operario y metodologías de medición (MCROBERTS & TOMPPO, 2007), hubiera sido conveniente tomarlas con la finalidad de presentar una evaluación más completa sobre el comportamiento, así como precisión, de cada uno de los softwares evaluados. Tras la comparación, se seleccionó AdQSM para la estimación de las mediciones dendrométricas derivadas de las PCDs; al presentar rendimientos similares, con tiempos de procesado mucho menores, una parametrización menos compleja y por su alto rendimiento en PCDs de diferentes naturalezas (DONG et al., 2021; FAN et al., 2020; LIU, 2024; RUHAN et al., 2023; ZHANG et al., 2024).



a. Comparativa DAP + MLS vs MLS

El empleo exclusivo de la tecnología MLS para la toma de PCDs, resulta en un menor tiempo de adquisición y procesado; a cambio, generalmente, de un producto incompleto a nivel del dosel arbóreo (CABO et al., 2018; CHEN et al., 2019; HARTLEY et al., 2024; ZHANG et al., 2024). Dicha afirmación concuerda con los resultados obtenidos, donde el uso de AdQSM en MLS presenta altas discrepancias con respecto a los valores de referencia (TLS), siendo el dbh la única métrica registrada con valores de RMSE inferiores al 15%. Al realizar la integración de DAP sobre MLS, el RMSE se reduce en un 16,6% para h; 4,84% para dbh; 22,63% para vcc; 36,94% para vt y en un 17,86 % para cbh. Los resultados reflejados se validan con las conclusiones obtenidas por R. ZHOU et al. (2023), en el que se compararon las mediciones derivadas de la fusión de ALS + TLS con los derivados del uso exclusivo de TLS, observando nulas discrepancias en los valores de dbh; aunque, una notable mejora en la estimación de la métrica h, reduciendo los valores de RMSE en un orden de hasta el 18% para las masas con un dosel más cerrado. Algo similar ocurrió en QI et al., 2022 y TORRALBA et al., 2022, donde se observaron mejoras en la estimación de métricas forestales a la hora de realizar la fusión de las PCDs; aunque de manera menos marcada al emplear instrumentos MLS de un mayor alcance.

Al analizar la figura 3, se observan ciertos outliers en las mediciones de dbh procedentes de MLS. Dichos IDs corresponden a individuos en los que el dosel arbóreo queda totalmente fuera del alcance del escáner, demostrando una mejora en el rendimiento de AdQSM al aplicar la fusión de las PCDs. Algo similar ocurre cuando la calidad de la PCD que define al individuo es pobre, observando curvaturas en la reconstrucción de troncos y ramas, notablemente diferentes de la realidad (LIU, 2024). Con respecto a las métricas de vcc y vt derivadas de MLS + DAP, siguen presentando imprecisiones notables frente a los datos de referencia, con valores de RMSE entre el 25% - 30%. Esto se puede deber a que la PCD procedente de DAP otorga una representación de la superficie visible, sin llegar a tener capacidad de penetración en la copa. Por lo tanto, al fusionar las PCDs se obtiene una representación parcialmente hueca, lo que impide la representación de ramas internas por parte de AdQSM. Adicionalmente, FAN et al., 2020; HARTLEY et al., 2024; MORALES & MACFARLANE, 2024, mencionan sobreestimaciones de las metodologías QSM en la representación de ramas con diámetros inferiores a 10 cm, por lo que pueden existir sobrestimaciones del software en las PCDs de TLS. Además de lo mencionado, los resultados muestran una limitación relevante en la estimación del atributo cbh, donde a pesar de la reducción del RMSE al realizar la fusión (17,86%), se sigue observando una discrepancia significativa respecto a los valores de referencia, alcanzando valores de RMSE superiores al 30 %.

A pesar de las limitaciones comprobadas, la integración de las nubes de puntos mejora notablemente los resultados obtenidos a partir de escáneres MLS de corto alcance u obsoletos, que en conjunto con PCDs DAP, permite la obtención de precisiones similares a los de un TLS de alta calidad. Los resultados obtenidos son de gran importancia para los prestadores de servicios de inventario forestal, permitiéndoles realizar trabajos de precisión con una inversión considerablemente menor. Además, el uso combinado de MLS + DAP, permite abarcar mayores superficies de escaneo obteniendo una mayor información de la



complejidad estructural del bosque a un menor coste. Investigaciones previas (QI et al., 2022; TORRALBA et al., 2022 y R. ZHOU et al., 2023) mostraron que el uso combinado de diferentes tecnologías (TLS + DAP; TLS + ALS; MLS + ALS), mejoran significativamente la estimación de mediciones dendrométricas independientemente de los métodos empleados, sobre todo en bosques de una elevada densidad.

6. Conclusiones

Los resultados de este estudio han mostrado como la integración de PCDs derivadas de MLS y DAP presenta mejoras significativas respecto al empleo exclusivo de MLS, ofreciendo resultados muy similares a los obtenidos mediante TLS en las métricas de altura (h) y diámetro normal (dbh). La reducción del RMSE en las métricas dendrométricas confirma que la fusión de ambas tecnologías permite una estimación más precisa y confiable, logrando resultados comparables a los de un equipo de mayor precisión y coste.

Asimismo, se ha evidenciado la robustez de la metodología QSM a través de la aplicación de cuatro softwares libres distintos: AdQSM, TreeQSM, SimpleForest y 3DFin. Los resultados obtenidos con estos programas fueron comparables, y aunque SimpleForest mostró un menor rendimiento en la estimación de alturas, las demás métricas presentaron valores consistentes ($R^2 > 0,75$). Finalmente, AdQSM fue seleccionado como el software más adecuado debido a su sencillez en la parametrización, mayor velocidad de procesamiento y capacidad para generar estimaciones precisas en PCDs de distinta procedencia.

A pesar de las mejoras observadas, se identificaron algunas limitaciones inherentes al uso de AdQSM en las PCDs derivadas de DAP + MLS, especialmente en la representación del volumen de fuste (vcc) y volumen total (vt), donde se presentaron discrepancias respecto a los valores de referencia (RMSE 25 – 30%). Además, se han observado ciertas dificultades por parte de AdQSM al realizar la reconstrucción en individuos de alta ramosidad y ubicados en zonas de alta densidad, donde la presencia de oclusiones es casi inevitable. No obstante, los resultados obtenidos son alentadores y demuestran su aplicabilidad en inventarios forestales, consiguiendo mediciones más precisas y completas que los inventarios tradicionales. La combinación de la metodología planteada en conjunto de vuelos fotogramétricos permitiría extender su uso a grandes áreas, manteniendo la precisión de las mediciones y reduciendo los costos operativos.

7. Agradecimientos

Este estudio se ha desarrollado en el marco del proyecto **Grupo Operativo FORESTIA** “GOPG-CO-20-0004.SOLUCIÓN INNOVADORA DE SENSORES REMOTOS E IA. FORESTIA”. Proyecto de innovación cofinanciado por la Junta de Andalucía y la Unión Europea a través del FEADER 2014-20, en el marco de las ayudas de la Línea 1. Operación 16.1.2: Ayudas al funcionamiento de los Grupos operativos de la Asociación Europea para la Innovación (AEI) en materia de productividad y sostenibilidad agrícolas (Convocatoria 2020).



8. Bibliografía

- ARRIZZA, S., MARRAS, S., FERRARA, R., & PELLIZZARO, G. (2024). Terrestrial Laser Scanning (TLS) for tree structure studies: A review of methods for wood-leaf classifications from 3D point clouds. *RSASE*, 36, 101364. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101364>
- CABO, C., DEL POZO, S., RODRÍGUEZ-GONZÁLVEZ, P., ORDÓÑEZ, C., & GONZÁLEZ-AGUILERA, D. (2018). Comparing Terrestrial Laser Scanning (TLS) and Wearable Laser Scanning (WLS) for Individual Tree Modeling at Plot Level. *Remote Sens.*, 10(4), 540. <https://doi.org/10.3390/rs10040540>
- CALDERS, K., ADAMS, J., ARMSTON, J., BARTHOLOMEUS, H., BAUWENS, S., BENTLEY, L. P., CHAVE, J., DANSON, F. M., DEMOL, M., DISNEY, M., GAULTON, R., KRISHNA MOORTHY, S. M., LEVICK, S. R., SAARINEN, N., SCHAAF, C., STOVALL, A., TERRY, L., WILKES, P., & VERBEECK, H. (2020). Terrestrial laser scanning in forest ecology: Expanding the horizon. *RSE*, 251, 112102. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112102>
- CALDERS, K., NEWNHAM, G., BURT, A., MURPHY, S., RAUMONEN, P., HEROLD, M., CULVENOR, D., AVITABILE, V., DISNEY, M., ARMSTON, J., & KAASALAINEN, M. (2015). Nondestructive estimates of above-ground biomass using terrestrial laser scanning. *Methods Ecol. Evol.*, 6, 198-208. doi: 10.1111/2041-210X.12301.
- CHEN, S., FENG, Z., CHEN, P., ULLAH KHAN, T., & LIAN, Y. (2019). Nondestructive Estimation of the Above-Ground Biomass of Multiple Tree Species in Boreal Forests of China Using Terrestrial Laser Scanning. *Forests*, 10(11), 936. <https://doi.org/10.3390/f10110936>
- CHIAPPINI, S., PIERDICCA, R., MALANDRA, F., TONELLI, E., MALINVERNI, E. S., URBINATI, C., & VITALI, A. (2022). Comparing Mobile Laser Scanner and manual measurements for dendrometric variables estimation in a black pine (*Pinus nigra* Arn.) plantation. *Comput. Electron. Agric.*, 198, 107069. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107069>
- CHICCO, D., WARRENS, M. J., & JURMAN, G. (2021). The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation. *PeerJ Comput.Sci*, 7, e623. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.623>
- CHUVIECO, E. (2008). Teledetección ambiental. *GBS*. 594. Barcelona. 978-84-344-8073-3.
- DABA, D. E., & SOROMESSA, T. (2019). The accuracy of species-specific allometric equations for estimating aboveground biomass in tropical moist montane forests: Case study of *Albizia grandibracteata* and *Trichilia dregeana*. *CARBON BAL MANAGE*, 14(1), 18. <https://doi.org/10.1186/s13021-019-0134-8>
- DASSOT, M., COLIN, A., SANTENOISE, P., FOURNIER, M., & CONSTANT, T. (2012). Terrestrial laser scanning for measuring the solid wood volume, including branches, of adult standing trees in the forest environment. *Comput. Electron. Agric.*, 89, 86-93. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.08.005>
- DONG, Y., FAN, G., ZHOU, Z., LIU, J., WANG, Y., & CHEN, F. (2021). Low-Cost Automatic Reconstruction of Tree Structure by AdQSM with Terrestrial Close-Range Photogrammetry. *Forests*, 12(8), 1020. <https://doi.org/10.3390/f12081020>



FAN, G., NAN, L., DONG, Y., SU, X., & CHEN, F. (2020). AdQSM: A New Method for Estimating Above-Ground Biomass from TLS Point Clouds. *Remote Sens*, 12(18), 3089. <https://doi.org/10.3390/rs12183089>

GADE, S. A., MADOLLI, M. J., GARCÍA-CAPARRÓS, P., ULLAH, H., CHA-UM, S., DATTA, A., & HIMANSHU, S. K. (2025). Advancements in UAV remote sensing for agricultural yield estimation: A systematic comprehensive review of platforms, sensors, and data analytics. *RSASE*, 37, 101418. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101418>

GAN, Y., WANG, Q., & SONG, G. (2024). Non-Destructive Estimation of Deciduous Forest Metrics: Comparisons between UAV-LiDAR, UAV-DAP, and Terrestrial LiDAR Leaf-Off Point Clouds Using Two QSMs. *Remote Sens.*, 16(4), 697. <https://doi.org/10.3390/rs16040697>

GHANBARI PARMEHR, E., & AMATI, M. (2021). Individual Tree Canopy Parameters Estimation Using UAV-Based Photogrammetric and LiDAR Point Clouds in an Urban Park. *Remote Sens.*, 13(11), 2062. <https://doi.org/10.3390/rs13112062>

HACKENBERG, J., MORHART, C., SHEPPARD, J., SPIECKER, H., & DISNEY, M. (2014). Highly Accurate Tree Models Derived from Terrestrial Laser Scan Data: A Method Description. *Forests*, 5(5), 1069-1105. <https://doi.org/10.3390/f5051069>

HACKENBERG, J., SPIECKER, H., CALDERS, K., DISNEY, M., & RAUMONEN, P. (2015). SimpleTree—An Efficient Open-Source Tool to Build Tree Models from TLS Clouds. *Forests*, 6(12), 4245-4294. <https://doi.org/10.3390/f6114245>

HAI ZHOU, SHENOY, N., & NICHOLLS, W. (2001). Efficient minimum spanning tree construction without Delaunay triangulation [VLSI CAD]. *ASP-DAC01*, 192-197. <https://doi.org/10.1109/ASPDAC.2001.913303>

HARTLEY, R. J. L., JAYATHUNGA, S., MORGENROTH, J., & PEARSE, G. D. (2024). Tree Branch Characterization from Point Clouds: A Comprehensive Review. *Curr.For.Rep.*, 10(5), 360-385. <https://doi.org/10.1007/s40725-024-00225-5>

JURADO, J. M., LÓPEZ, A., PÁDUA, L., & SOUSA, J. J. (2022). Remote sensing image fusion on 3D scenarios: A review of applications for agriculture and forestry. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, 112, 102856. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102856>

LAINO, D., CABO, C., PRENDES, C., JANVIER, R., ORDONEZ, C., NIKONOVAS, T., DOERR, S., & SANTIN, C. (2024). 3DFin: A software for automated 3D forest inventories from terrestrial point clouds. *Forestry*, 97(4), 479-496. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpae020>

LIU, C. (2024). Assessing Tree Carbon Estimates from Remotely Piloted Aircraft- Based LiDAR: A Comparison of Quantitative Structural Models and Allometric Scaling with In-Situ DBH Measurements. *Trabajo Fin de Máster*. Universidad de Waterloo, Ontario, Canada.

LÓPEZ SERRANO, F. R., RUBIO, E., GARCÍA MOROTE, F. A., ANDRÉS ABELLÁN, M., PICAZO CÓRDOBA, M. I., GARCÍA SAUCEDO, F., MARTÍNEZ GARCÍA, E., SÁNCHEZ GARCÍA, J. M., SERENA INNERARITY, J., CARRASCO LUCAS, L., GARCÍA GONZÁLEZ, O., & GARCÍA GONZÁLEZ, J. C. (2022). Artificial intelligence-based software (AID-FOREST) for tree detection: A new framework for fast and accurate forest inventorying using LiDAR point



clouds. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, 113, 103014. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.103014>

MADRIGAL, J.G. ÁLVAREZ GONZÁLEZ, & R. RODRÍGUEZ SOALLEIRO. (1999). Tablas de producción para los montes españoles. *Fund. Conde Del Valle De Salazar*.

MCROBERTS, R., & TOMPPPO, E. (2007). Remote sensing support for national forest inventories. *RSE*, 110(4), 412-419. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.09.034>

MIELCAREK, M., KAMIŃSKA, A., & STEREŃCZAK, K. (2020). Digital Aerial Photogrammetry (DAP) and Airborne Laser Scanning (ALS) as Sources of Information about Tree Height: Comparisons of the Accuracy of Remote Sensing Methods for Tree Height Estimation. *Remote Sens.*, 12(11), 1808. <https://doi.org/10.3390/rs12111808>

MOLINA-VALERO, J. A., MARTÍNEZ CALVO, A., GINZO VILLAMAYOR, M. J., NOVO PÉREZ, M. A., ÁLVAREZ GONZÁLEZ, J. G., MONTES, F., & PÉREZ-CRUZADO, C. (2022). FORTLS: Un paquete de R para el uso operativo de dispositivos terrestres de tecnología LiDAR en inventario forestal. *8CFE*, 19.

MORALES, A., & MACFARLANE, D. W. (2024). Reducing tree volume overestimation in quantitative structure models using modeled branch topology and direct twig measurements. *Forestry*. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpae046>

MURALIKRISHNAN, B. (2021). Performance evaluation of terrestrial laser scanners—A review. *Meas. Sci. Technol.*, 32(7), 072001. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/abdae3>

NÆSSET, E. (2002). Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data. *RSE*, 80(1), 88-99. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00290-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00290-5)

NAVARRO-CERRILLO, R. M., GÓNZALEZ MORENO, P., VARO MARTÍNEZ, M. Á., & ARIZA SALAMANCA, A. J. (2024). Geociencias aplicadas a la gestión forestal. UCOPress. 548. Córdoba.

PASTOR IBÁÑEZ, A. (2023). Aplicación del escaneado láser terrestre (TLS) para la modelización tridimensional de dos tipos de estructuras de bosque mediterráneo: alcornocales adhesionados y bosque montano de coníferas. *Trabajo Final de Máster*. Universidad de Córdoba.

PICARD, N., FONTON, N., BOYEMBA BOSELA, F., FAYOLLE, A., LOUMETO, J., NGUA AYEKABA, G., SONKÉ, B., YONGO BOMBO, O. D., MAÏDOU, H. M., & NGOMANDA, A. (2024). Selecting allometric equations to estimate forest biomass from plot- rather than individual-level predictive performance. *EGUsphere [preprint]*. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-2302>

QI, Y., COOPS, N. C., DANIELS, L. D., & BUTSON, C. R. (2022). Comparing tree attributes derived from quantitative structure models based on drone and mobile laser scanning point clouds across varying canopy cover conditions. *P&RS* 192, 49-65. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2022.07.021>

RAMOS, L., MARCHAMALO, M., REJAS, J. G., & MARTÍNEZ, R. (2015). Aplicación del Láser Escáner Terrestre (TLS) a la modelización de estructuras: Precisión, exactitud y diseño de la adquisición de datos en casos reales. *Inf. constr.*, 67(538), e074. <https://doi.org/10.3989/ic.13.103>



RAUMONEN, P., KAASALAINEN, M., ÅKERBLUM, M., KAASALAINEN, S., KAARTINEN, H., VASTARANTA, M., HOLOPAINEN, M., DISNEY, M., & LEWIS, P. (2013). Fast Automatic Precision Tree Models from Terrestrial Laser Scanner Data. *Remote Sens.*, 5(2), 491-520. <https://doi.org/10.3390/rs5020491>

RUHAN, A., DU, W., YING, H., WEI, B., SHAN, Y., & DAI, H. (2023). Estimation of Aboveground Biomass of Individual Trees by Backpack LiDAR Based on Parameter-Optimized Quantitative Structural Models (AdQSM). *Forests*, 14(3), 475. <https://doi.org/10.3390/f14030475>

RUSU, R. B., MARTON, Z. C., BLODOW, N., DOLHA, M., & BEETZ, M. (2008). Towards 3D Point cloud based object maps for household environments. *Robot. Auton. Syst.*, 56(11), 927-941. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2008.08.005>

SHENG, Y., ZHAO, Q., WANG, X., LIU, Y., & YIN, X. (2024). Tree Diameter at Breast Height Extraction Based on Mobile Laser Scanning Point Cloud. *Forests*, 15(4), 590. <https://doi.org/10.3390/f15040590>

TAO, S., WU, F., GUO, Q., WANG, Y., LI, W., XUE, B., HU, X., LI, P., TIAN, D., LI, C., YAO, H., LI, Y., XU, G., & FANG, J. (2015). Segmenting tree crowns from terrestrial and mobile LiDAR data by exploring ecological theories. *P&RS*, 110, 66-76. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.007>

TIAN, J., DAI, T., LI, H., LIAO, C., TENG, W., HU, Q., MA, W., & XU, Y. (2019). A Novel Tree Height Extraction Approach for Individual Trees by Combining TLS and UAV Image-Based Point Cloud Integration. *Forests*, 10(7), 537. <https://doi.org/10.3390/f10070537>

TIERRA, A., SILVA, O., & LEIVA, C. (2015). Correcciones diferenciales vía NTRIP para dispositivo móvil con aplicación Android. *Bol. Ciênc. Geod.* 21, 21(1), 43-55. <https://doi.org/10.1590/S1982-21702015000100004>

TORRALBA, J., CARBONELL-RIVERA, J. P., RUIZ, L. A., CRESPO-PEREMARCH, P., & ALMONACID-CABALLER, J. (2022). Estimación de parámetros forestales en *Pinus halepensis* Mill. A partir de nubes de puntos TLS, UAV y fusión TLS-UAV. *XIX-AET*. 978-84-9769-383-7

VANDENDAELE, B., MARTIN-DUCUP, O., FOURNIER, R. A., PELLETIER, G., & LEJEUNE, P. (2022). Mobile Laser Scanning for Estimating Tree Structural Attributes in a Temperate Hardwood Forest. *Remote Sens.*, 14(18), 4522. <https://doi.org/10.3390/rs14184522>

WHEELER, D. C., & CALDER, C. A. (2007). An assessment of coefficient accuracy in linear regression models with spatially varying coefficients. *J. Geogr. Syst.*, 9(2), 145-166. <https://doi.org/10.1007/s10109-006-0040-y>

XING, D., BERGERON, J. A. C., SOLARIK, K. A., TOMM, B., MACDONALD, S. E., SPENCE, J. R., & HE, F. (2019). Challenges in estimating forest biomass: Use of allometric equations for three boreal tree species. *Can. J. For. Res.*, 49(12), 1613-1622. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2019-0258>

XU, S., CHENG, P., ZHANG, Y., & DING, P. (2015). Error Analysis and Accuracy Assessment of Mobile Laser Scanning System. *The Open Automation and Control Systems Journal*, 7(1), 485-495. <https://doi.org/10.2174/1874444301507010485>

ZHANG, Y., XUE, S., LIU, S., LI, X., FAN, Q., XIONG, N., & WANG, J. (2024). Comparative Study of Single-Wood Biomass Model at Plot Level Based on



Multi-Source LiDAR. *Forests*, 15(5), 795. <https://doi.org/10.3390/f15050795>

ZHAO, X., GUO, Q., SU, Y., & XUE, B. (2016). Improved progressive TIN densification filtering algorithm for airborne LiDAR data in forested areas. *P&RS*, 117, 79-91. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.03.016>

ZHOU, L., MENG, R., TAN, Y., LV, Z., ZHAO, Y., XU, B., & ZHAO, F. (2022). Comparison of UAV-based LiDAR and digital aerial photogrammetry for measuring crown-level canopy height in the urban environment. *Urban For Urban Green*, 69, 127489. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127489>

ZHOU, R., SUN, H., MA, K., TANG, J., CHEN, S., FU, L., & LIU, Q. (2023). Improving Estimation of Tree Parameters by Fusing ALS and TLS Point Cloud Data Based on Canopy Gap Shape Feature Points. *Drones*, 7(8), 524. <https://doi.org/10.3390/drones7080524>