

Tarraga Martínez, G.; Oñate Tevar, J.; Belenguer Ballester, J. Estimación del diámetro en olivos jóvenes mediante LiDAR móvil terrestre y RTK para su aplicación en modelos de biomasa

Estimación del diámetro en olivos jóvenes mediante LiDAR móvil terrestre y RTK para su aplicación en modelos de biomasa

Tarraga Martínez, Gema ¹ Oñate Tevar, Juan Miguel ¹ Belenguer Ballester, José ¹

¹ Ainia, España

ORCID: Tarraga Martínez [0009-0004-7259-4327](https://orcid.org/0009-0004-7259-4327) Oñate Tevar [0009-0003-7266-5722](https://orcid.org/0009-0003-7266-5722) Belenguer Ballester [0000-0002-5724-7894](https://orcid.org/0000-0002-5724-7894)

Correspondencia: gtarraga@ainia.es jmonate@ainia.es jbelenguer@ainia.es

RESUMEN

Este estudio evalúa una metodología de reconstrucción 3D híbrida basada en datos RGB, LiDAR móvil y georreferenciación RTK para estimar el diámetro de olivos jóvenes. Las cinco campañas iniciales permitieron analizar la coherencia geométrica del sistema, obteniéndose desviaciones pequeñas frente a patrones de referencia, con un RMSE global de 0,98 mm en el plano XY y 0,22 mm en el eje Z. En la estimación del diámetro del tronco, las comparaciones con calibre digital mostraron precisiones submilimétricas en varias campañas, con RMSE entre 0,76 mm y 0,08 mm en adquisiciones aceptadas. Estos resultados confirman la viabilidad del método como opción precisa para su futura integración en ecuaciones alométricas de biomasa.

Palabras clave: teledetección de proximidad, LiDAR móvil terrestre, RTK, biomasa aérea, sistemas agroforestales.


Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · Fecha de aceptación: 18 febrero 2026

Estimación del diámetro en olivos jóvenes mediante LiDAR móvil terrestre y RTK para su aplicación en modelos de biomasa

Tarraga Martínez, Gema ⁽¹⁾, Oñate Tevar, Juan Miguel ⁽¹⁾, Belenguer Ballester, José ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Ainia, España.

 0009-0004-7259-4327, gtarraga@ainia.es ;  0009-0003-7266-5722, jmonate@ainia.es

 0000-0002-5724-7894, jbelenguer@ainia.es.

Resumen: Este estudio evalúa una metodología de reconstrucción 3D híbrida basada en datos RGB, LiDAR móvil y georreferenciación RTK para estimar el diámetro de olivos jóvenes. Las cinco campañas iniciales permitieron analizar la coherencia geométrica del sistema, obteniéndose desviaciones pequeñas frente a patrones de referencia, con un RMSE global de 0,98 mm en el plano XY y 0,22 mm en el eje Z. En la estimación del diámetro del tronco, las comparaciones con calibre digital mostraron precisiones submilimétricas en varias campañas, con RMSE entre 0,76 mm y 0,08 mm en adquisiciones aceptadas. Estos resultados confirman la viabilidad del método como opción precisa para su futura integración en ecuaciones alométricas de biomasa.

Palabras clave: teledetección de proximidad, LiDAR móvil terrestre, RTK, biomasa aérea, sistemas agroforestales.

Diameter estimation in young olive trees using terrestrial mobile LiDAR and RTK for application in biomass models

Abstract: *This study evaluates a hybrid 3D reconstruction methodology combining RGB data, mobile LiDAR and RTK georeferencing for estimating the diameter of young olive trees. Across the first five field campaigns, geometric coherence was assessed against calibrated reference patterns, yielding small deviations with a global RMSE of 0.98 mm in the XY plane and 0.22 mm along the Z axis. For trunk diameter estimation, comparisons with digital calliper measurements showed sub-millimetre accuracy in several campaigns, with RMSE values ranging from 0.76 mm down to 0.08 mm in accepted acquisitions. These results confirm the feasibility of the method as a precise approach suitable for future integration into allometric biomass equations.*

Keywords: *proximity remote sensing, terrestrial mobile LiDAR, RTK, above-ground biomass, agroforestry systems.*

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas agroforestales contribuyen significativamente a la mitigación del cambio climático gracias a su capacidad de secuestro de carbono en la biomasa aérea y subterránea. Para avanzar en su cuantificación, el proyecto europeo "Nature-Based Business Model and Emerging INNOvations to enhance Carbon Farming Initiatives (CFIs) while preserving Biodiversity, Water Security and Soil Health" (INNO4CFIs) integra tecnologías avanzadas aplicadas en campos de experimentación (*living hubs*) con elevada complejidad estructural (Conti *et al.*, 2025).

La estimación de la biomasa aérea (AGB, *Above-Ground Biomass*) depende de ecuaciones alométricas donde el diámetro del tronco —medido como DBH (del inglés, *Diameter at Breast Height*) a 1,3 m— es el predictor más robusto. Sin embargo, los inventarios manuales y los métodos destructivos tradicionales continúan siendo

costosos y difíciles de aplicar a gran escala (Conti *et al.*, 2025; M. I. Disney *et al.*, 2018; Hackenberg *et al.*, 2014).

Las técnicas de teledetección de proximidad han evolucionado desde el LiDAR (del inglés, *Light Detection And Ranging*) terrestre estático hacia sistemas móviles y de mano capaces de generar nubes de puntos 3D precisas (M. Disney, 2019; Howie & De Stefano, 2024). La incorporación de sensores LiDAR en dispositivos móviles, junto con posicionamiento RTK (del inglés, *Real Time Kinematic*), permite obtener reconstrucciones georreferenciadas con buena consistencia y detectar rasgos estructurales finos (Gao *et al.*, 2025; Hackenberg *et al.*, 2014; Howie & De Stefano, 2024; Sun *et al.*, 2025).

Pese a estos avances, sigue siendo necesario validar protocolos de escaneo adaptados a árboles jóvenes, cuya morfología presenta desafíos de oclusión y ruido (Gao *et al.*, 2025). Este estudio valida una metodología híbrida RGB-LiDAR-RTK para estimar el diámetro en olivos jóvenes mediante la comparación entre

reconstrucciones 3D y mediciones *in situ* con un calibre digital, presentando los resultados de las cinco primeras campañas del proyecto en curso.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

La fase experimental se llevó a cabo en Rancho Guareña (Castrillo de la Guareña, Zamora), una explotación mixta de producción lechera con 300 ha de cultivo. En la parcela seleccionada (Fig. 1), se realizó una plantación de *Olea europaea* L. 'Arbequina' en hileras y con riego por goteo subterráneo.



Figura 1. Ortofoto de la parcela obtenida con la composición de imágenes adquiridas con un dron DJI Mavic 3M.

2.2. Instrumentación

Se empleó un teléfono móvil iPhone 15 Pro Max (Apple Inc., EE. UU.) (Fig. 2), que combina imágenes RGB de alta resolución con información de profundidad obtenida con un sensor LiDAR de tiempo de vuelo. Ambas fuentes se fusionan en un único flujo en la aplicación Pix4Dcatch (Pix4D SA, Suiza) para mejorar la estabilidad geométrica del modelo 3D resultante.

La georreferenciación absoluta se obtuvo mediante una configuración RTK compuesta por una estación base Emlid Reach RS2+ y un receptor rover Emlid RX (Emlid Tech Kft., Hungría). La base se alineó al sistema oficial de referencia recibiendo correcciones mediante NTRIP (del inglés, *Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*) desde la estación permanente El Carpio de la Red de Estaciones Permanentes de Castilla y León. Posteriormente, transmitió correcciones RTCM (del inglés, *Radio Technical Commission for Maritime Services*) al rover RX. Este, a su vez, se vinculó al dispositivo móvil —*via Bluetooth*— proporcionando una solución fija (FIX) en tiempo real durante la adquisición.



Figura 2. Sistema móvil de captura de datos integrado por un iPhone 15 Pro Max y un receptor Emlid Reach RX.

2.3. Protocolo experimental

Se realizaron 17 adquisiciones sobre cuatro olivos jóvenes a lo largo de cinco meses; tras la muerte de uno de ellos, el seguimiento continuó con los tres restantes. En cada campaña, se colocaron las referencias calibradas del kit móvil de Pix4D y se registraron coordenadas UTM (del inglés, *Universal Transverse Mercator*) mediante Emlid Flow 360 (Emlid Tech Kft., Hungría), verificando así la coherencia geométrica y la precisión de la geolocalización. Para el plano XY se midieron las marcas impresas en cada modelo 3D; para el eje Z se obtuvieron los diámetros aparentes —de los tutores rígidos de 8 mm de las plantas— en tres alturas.

La medición de cada olivo siguió un protocolo reproducible: primero, se confirmó la estabilidad de la señal RTK FIX en el receptor rover; luego, el técnico se situó a 0,5 m del tronco, con el iPhone y el rover RX en posición vertical a ~1 m de altura; finalmente, se midió cada árbol siguiendo una órbita circular durante 30 s con un 90 % de solape entre imágenes.

Para validar la estimación del diámetro se tomaron dos medidas con calibre digital (Meterk, China) por debajo del primer nudo (Fig. 3), donde el fuste es homogéneo, asegurando la comparabilidad entre campañas. Esta variable es esencial tanto para evaluar la fiabilidad del modelo 3D híbrido como por su papel en ecuaciones alométricas para estimar la biomasa y el carbono almacenado (Conti et al., 2025; Disney et al., 2018).

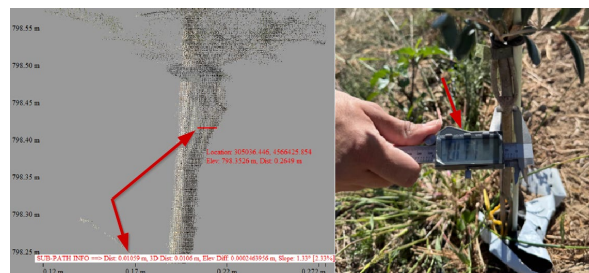


Figura 3. Estimación de la medida del tronco de un olivo mediante el modelo 3D y con el calibre.

2.4. Procesado de las nubes de puntos

2.4.1. Generación y preprocesado de las nubes de puntos

Los proyectos adquiridos con Pix4Dcatch se procesaron íntegramente en Pix4Dmatic (Pix4D SA, Suiza). Se ejecutó una calibración automática conjunta de los datos RGB y LiDAR a partir de la cual se generaron dos nubes intermedias: una nube densa fotogramétrica y una nube de profundidad derivada del LiDAR.

Se aplicaron diversos filtros predefinidos a ambas nubes para supresión de ruido, *deghosting* y eliminación de artefactos derivados de la fusión RGB-LiDAR. A continuación, se unificaron las dos nubes en una única solución 3D (Fig. 4) sobre la que se hicieron las medidas.

Debido al pequeño tamaño de los árboles y a la ausencia de rugosidades relevantes en la superficie del tronco, se optó por no generar una malla suavizada.

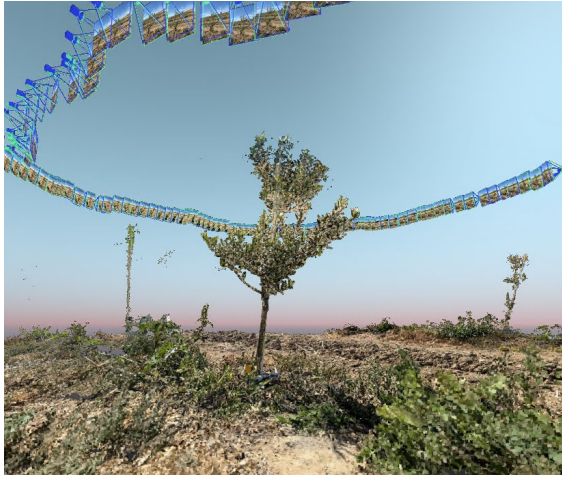


Figura 4. Generación de la nube de puntos en Pix4Dmatic.

2.4.2. Delimitación del tronco y generación de secciones transversales

Las nubes de puntos resultantes se exportaron y procesaron en Global Mapper v26 (Blue Marble Geographics, EE. UU.). Para cada olivo, se generó un búfer de 0.5 m a partir de sus coordenadas UTM. Este búfer se usó posteriormente para recortar la nube de puntos y así evitar incluir suelo o elementos ajenos al individuo estudiado (Fig. 5).



Figura 5. Nube de puntos recortada por el buffer de 0,5 m de uno de los olivos del estudio.

En paralelo, se evaluaron también búferes de menor tamaño para eliminar más elementos externos. Sin embargo, debido a la ligera inclinación y torsión de los troncos, propia de la edad fenológica de los olivos, estos búferes reducidos provocaron la pérdida parcial de las copas o distorsiones en la delimitación. Por ello, se adoptó el valor de 0,5 m como compromiso óptimo entre limpieza y completitud del modelo.

2.5. Análisis estadístico y métricas

Para evaluar la consistencia geométrica de las reconstrucciones 3D y la precisión de las estimaciones de diámetro, se aplicaron tres tipos de análisis sobre las nubes de puntos generadas.

2.5.1. Coherencia en el plano XY

Se midieron las distancias entre las marcas calibradas del patrón de referencia empleado en Pix4Dcatch. Para cada campaña y adquisición se calcularon métricas de error basadas en la comparación entre las distancias medidas en el modelo 3D y sus valores nominales. La métrica principal utilizada fue el error cuadrático medio (RMSE, del inglés *Root-Mean-Square Error*), acompañado del cálculo del sesgo como media de la diferencia entre las distancias observadas y esperadas.

2.5.2. Coherencia en el eje Z

Se extrajeron secciones horizontales de los tutores de diámetro conocido de 8 mm para analizar la estabilidad vertical del modelo. Cada sección se evaluó a través de la comparación entre el diámetro nominal del tutor y el diámetro reconstruido a partir de la nube de puntos. Para estas evaluaciones se calcularon el RMSE y la desviación estándar de los errores entre los diámetros de las secciones.

2.5.3. Estimación del diámetro del tronco

En la zona de medición de campo se generaron perfiles transversales a partir de la nube de puntos de cada individuo. Cada perfil se ajustó mediante una circunferencia obtenida por mínimos cuadrados, a partir de la cual se derivó el diámetro estimado (Fig. 6). La precisión de estas estimaciones se evaluó mediante el RMSE, el error absoluto medio (MAE, del inglés *Mean Absolute Error*) y el sesgo con respecto a las medidas de referencia tomadas con el calibre.

Además, se definieron criterios de aceptación y exclusión basados en los valores obtenidos en la calibración en el plano horizontal, la estabilidad en el eje vertical y la calidad de la nube de puntos (densidad, presencia de artefactos o deformaciones), con el fin de garantizar la comparabilidad entre campañas.

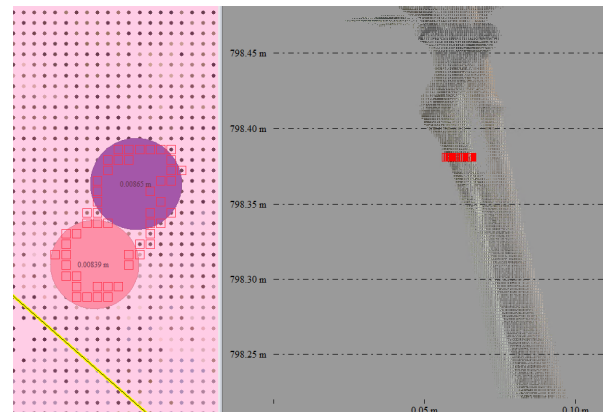


Figura 6. Medición de diámetros mediante la selección de puntos y ajuste geométrico a una circunferencia de un olivo.

3. RESULTADOS

3.1. Coherencia geométrica en el plano XY

La evaluación de la coherencia XY comparó las distancias nominales del patrón calibrado y las distancias reconstruidas en los modelos 3D. La Tabla 1 resume los estadísticos globales de todas las campañas aceptadas por control de calidad.

Tabla 1. Estadísticos globales de coherencia XY.

Distancia nominal (mm)	Distancia reconstruida media (mm)	RMSE (mm)	Sesgo (mm)
33,25	32,65	0,98	+0,60

3.2. Coherencia vertical (eje Z)

La estabilidad vertical se evaluó a través del análisis de tres secciones horizontales de los tutores de diámetro nominal conocido. La Tabla 2 muestra los estadísticos agregados para todas las alturas y campañas aceptadas.

Tabla 2. Estadísticos de coherencia vertical (eje Z).

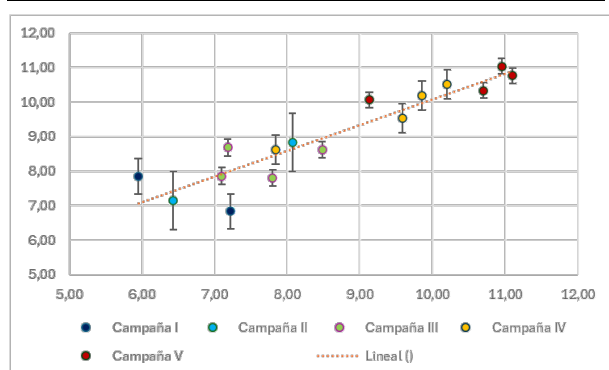
Diámetro nominal (mm)	Diámetro reconstruido medio (mm)	RMSE (mm)	SD (mm)
8,00	8,22	0,22	0,55

3.3. Estimación del diámetro del tronco

La precisión en la estimación del diámetro del tronco se evaluó comparando las mediciones obtenidas mediante el modelo 3D y las medidas realizadas en campo con el calibre digital. La Tabla 3 y la 7 Figura muestran, respectivamente, los estadísticos incluidos por campaña y un diagrama de dispersión de los diámetros estimados por el modelo frente a los medidos con el calibre.

Tabla 3. Estadísticos de la estimación del diámetro del tronco por campaña.

Campaña	N.º olivos	RMSE (mm)	MAE (mm)	Sesgo (mm)
I	2	0,76	1,14	-0,76
II	2	0,75	0,75	-0,75
III	4	0,60	0,80	-0,60
IV	4	0,35	0,58	-0,35
V	4	0,08	0,55	-0,08

**Figura 7.** Relación entre diámetros medidos con calibre y diámetros estimados.

Estos resultados sostienen la validez de la metodología propuesta para olivos jóvenes. Asimismo, confirman su capacidad para proporcionar diámetros comparables entre campañas y para derivar información sobre la tasa de crecimiento a nivel individual.

Las siguientes campañas del proyecto INNO4CFIs permitirán ampliar la serie temporal, consolidar la precisión, afinar umbrales de control de calidad y evaluar la transferibilidad de las medidas a ecuaciones alométricas para estimación de biomasa y carbono.

4. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido desarrollado dentro del proyecto INNO4CFIs, el cual ha recibido financiación de la Comisión Europea en el marco de las Inversiones Interregionales en Innovación (I3) del Fondo Europeo de Desarrollo Regional, con acuerdo de subvención n.º 101115156. Las opiniones y los puntos de vista expresados en este artículo son exclusivamente los de los autores y no reflejan necesariamente los de la Unión Europea. Ni la Unión Europea ni la autoridad que concede la subvención se responsabilizan de ellas.

5. REFERENCIAS

- Conti, N., Della Rocca, G., Franciamore, F., Marra, E., Nigro, F., Nigrone, E., Ramadhan, R., Paris, P., Tárraga-Martínez, G., Belenguer-Ballester, J., Scatena, L., Lombardi, E., & Garosi, C. (2025). Tree Biomass Estimation in Agroforestry for Carbon Farming: A Comparative Analysis of Timing, Costs, and Methods. *In Forests (Vol. 16, Number 8)*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/f16081287>
- Disney, M. (2019). Terrestrial LiDAR: a three-dimensional revolution in how we look at trees. *In New Phytologist (Vol. 222, Number 4, pp. 1736–1741)*. Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1111/nph.15517>
- Disney, M. I., Boni Vicari, M., Burt, A., Calders, K., Lewis, S. L., Raunonen, P., & Wilkes, P. (2018). Weighing trees with lasers: Advances, challenges and opportunities. *Interface Focus, 8*(2). <https://doi.org/10.1098/rsfs.2017.0048>
- Gao, J., Tang, L., Su, H., Chen, J., & Yuan, Y. (2025). Extraction of tree branch skeletons from terrestrial LiDAR point clouds. *Ecological Informatics, 85*(1), 102960. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102960>
- 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>
- Howie, N. A., & De Stefano, A. (2024). Measuring Tree Diameter Using LiDAR Equipped iPad: An Evaluation of ForestScanner and Arboreal Forest Applications. *Forest Science, 70*(4), 304–310. <https://doi.org/10.1093/forsci/fxae017>
- Sun, A., Su, R., Ma, J., & Lin, J. (2025). Individual Trunk Segmentation and Diameter at Breast Height Estimation Using Mobile LiDAR Scanning. *Forests, 16*(4). <https://doi.org/10.3390/f16040582>