

Martínez-Rodrigo, R.; Sabin, P.; García, C.; Blázquez-Casado, Á. Validación de mediciones dendrométricas y de volumen con dron bajo copa y dron sobre copa en masas de *Pinus sylvestris*

Validación de mediciones dendrométricas y de volumen con dron bajo copa y dron sobre copa en masas de *Pinus sylvestris*

Martínez-Rodrigo, Raquel ¹ Sabin, Pablo ¹ García, Carlos ² Blázquez-Casado, Ángela ¹

¹ Cesefor, España

² Carlibur, España

ORCID: Martínez-Rodrigo 0000-0002-4277-398X Sabin 0000-0002-1397-7887 Blázquez-Casado 0000-0003-2611-9176

Correspondencia: raquel.martinez@cesefor.com pablo.sabin@cesefor.com carlos.garcia@carlibur.es
angela.blazquez@cesefor.com

RESUMEN

La obtención eficiente de variables dendrométricas (diámetro normal, altura y volumen) es esencial para la planificación selvícola, la evaluación de existencias y el seguimiento del crecimiento en masas forestales. Este trabajo evalúa el potencial de un sistema UAV equipado con LiDAR para operar bajo copa, capaz de geolocalizar árboles, estimar el diámetro normal (DBH) a 1,30 m y calcular volumen a partir de nubes de puntos de alta densidad. El estudio se realizó en un rodal de *Pinus sylvestris* en Soria (España), donde se establecieron 11 parcelas circulares (radio 14,1 m) y se inventariaron 442 pies, midiendo DBH y altura en campo y calculando el volumen mediante ecuaciones de cubicación. El dron bajo copa detectó de forma inequívoca 397 árboles de los medidos, y el vuelo sobre copas permitió identificar 239 árboles coincidentes. Los DBH derivados del dron bajo copa mostraron una relación elevada con las mediciones de campo ($R^2 = 0,895$). Las alturas obtenidas desde el vuelo sobre copa presentaron alta concordancia con el campo ($R^2 = 0,863$). En términos de volumen, la estimación directa desde el dron bajo copa fue de 89,75 m³ frente a 99,53 m³ en campo (236 árboles). Sin embargo, la combinación de DBH bajo copa y alturas sobre copa, aplicando ecuaciones de cubicación mostró un ajuste perfecto (98,12 m³), mostrando una diferencia de 1,41 m³. Los resultados evidencian que la integración de vuelos bajo y sobre copa muestra una precisión muy elevada en la estimación de volumen. Por tanto, la ejecución de los trabajos de cubicación con una combinación de vuelos sobre y bajo copa puede reducir considerablemente los tiempos y costes



Palabras clave: LiDAR; UAV; vuelo bajo copa; estimación de DBH; Volumen


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

Validación de mediciones dendrométricas y de volumen con dron bajo copa y dron sobre copa en masas de *Pinus sylvestris*

Martinez-Rodrigo, Raquel ⁽¹⁾, Sabin, Pablo ⁽¹⁾, Garcia, Carlos ⁽²⁾, Blázquez-Casado, Ángela ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Cesefor, España.

 0000-0002-4277-398X, raquel.martinez@ceseфор.com ;  0000-0002-1397-7887, pablo.sabin@ceseфор.com.

 0000-0003-2611-9176, angela.blazquez@ceseфор.com.

⁽³⁾ Carlibur, España.

carlos.garcia@carlibur.es.

Resumen: La obtención eficiente de variables dendrométricas (diámetro normal, altura y volumen) es esencial para la planificación selvícola, la evaluación de existencias y el seguimiento del crecimiento en masas forestales. Este trabajo evalúa el potencial de un sistema UAV equipado con LiDAR para operar bajo copa, capaz de geolocalizar árboles, estimar el diámetro normal (DBH) a 1,30 m y calcular volumen a partir de nubes de puntos de alta densidad. El estudio se realizó en un rodal de *Pinus sylvestris* en Soria (España), donde se establecieron 11 parcelas circulares (radio 14,1 m) y se inventariaron 442 pies, midiendo DBH y altura en campo y calculando el volumen mediante ecuaciones de cubicación. El dron bajo copa detectó de forma inequívoca 397 árboles de los medidos, y el vuelo sobre copas permitió identificar 239 árboles coincidentes. Los DBH derivados del dron bajo copa mostraron una relación elevada con las mediciones de campo ($R^2 = 0,895$). Las alturas obtenidas desde el vuelo sobre copa presentaron alta concordancia con el campo ($R^2 = 0,863$). En términos de volumen, la estimación directa desde el dron bajo copa fue de 89,75 m³ frente a 99,53 m³ en campo (236 árboles). Sin embargo, la combinación de DBH bajo copa y alturas sobre copa, aplicando ecuaciones de cubicación mostró un ajuste perfecto (98,12 m³), mostrando una diferencia de 1,41 m³. Los resultados evidencian que la integración de vuelos bajo y sobre copa muestra una precisión muy elevada en la estimación de volumen. Por tanto, la ejecución de los trabajos de cubicación con una combinación de vuelos sobre y bajo copa puede reducir considerablemente los tiempos y costes.

Palabras clave: LiDAR; UAV; vuelo bajo copa; estimación de DBH; Volumen

Validation of dendrometric and volume measurements using under-canopy and over-canopy drones in *Pinus sylvestris* stands

Abstract: *The efficient collection of dendrometric variables (diameter at breast height, height, and volume) is essential for forest planning, stock assessment, and growth monitoring in forest stands. This study evaluates the potential of a LiDAR-equipped UAV system to operate under canopy, capable of geolocating trees, estimating diameter at breast height (DBH) at 1.30 m, and calculating volume from high-density point clouds. The study was conducted in a *Pinus sylvestris* stand in Soria (Spain), where 11 circular plots (radius 14.1 m) were established and 442 trees were inventoried, measuring DBH and height in the field and calculating volume using cubing equations. The under-canopy drone unequivocally detected 397 of the trees measured, and the over-canopy flight identified 239 matching trees. The DBH derived from the under-canopy drone showed a high correlation with the field measurements ($R^2 = 0.895$). The heights obtained from the over-canopy flight showed high agreement with the field ($R^2 = 0.863$). In terms of volume, the direct estimate from the under-canopy drone was 89.75 m³ compared to 99.53 m³ in the field (236 trees). However, the combination of DBH under canopy and heights above canopy, applying cubing equations, showed a perfect fit (98.12 m³), with a difference of 1.41 m³. The results show that the integration of under-canopy and over-canopy flights shows very high accuracy in volume estimation. Therefore, performing cubing work with a combination of over-canopy and under-canopy flights can significantly reduce time and costs.*

Keywords: LiDAR; UAV; under-canopy surveying; DBH estimation; LiDAR; UAV; vuelo bajo copa; estimación de DBH; Volume.

1. INTRODUCCIÓN

La obtención rápida de variables dendrométricas como el diámetro normal, la altura y el volumen es un requisito clave para planificar cortas, evaluar existencias en masas forestales, el seguimiento del crecimiento y evaluación económica y ambiental de las masas forestales. Para ello, los inventarios tradicionales basados en parcelas y mediciones manuales requieren de un esfuerzo elevado de tiempo y personal. Además, la densidad de muestreo suele ser limitada, especialmente en rodales complejos o de difícil acceso. Para ello la teledetección ha impulsado metodologías cada vez más eficientes (Torres-Rojas *et al.*, 2017), como la tecnología LiDAR que puede estimar eficazmente estas variables (Sánchez Alberola *et al.*, 2018), evitando los costes de mediciones manuales. Aunque la estimación detallada de la geometría del fuste sigue siendo un reto cuando se trabaja únicamente con datos captados desde arriba.

En los últimos años, la tecnología LiDAR se está empleando en todas sus variantes (aéreo, terrestre y móvil) para múltiples aplicaciones (Beland *et al.*, 2019) y en particular el LiDAR terrestre (TLS) proporciona gran detalle sobre las características del dosel inferior y por lo tanto del fuste (Martínez-Rodrigo *et al.*, 2022). Así mismo, se ha equipado con tecnología LiDAR, un dron para volar bajo las copas de la masa forestal para caracterizar el árbol a escala individual, generando nubes de puntos de alta densidad que permiten derivar diámetros normales y variables dendrométricas con un detalle difícil de alcanzar con los vuelos convencionales sobre copas. Además, el muestreo bajo copa puede reducir significativamente los tiempos de trabajo de campo y los costes operativos, manteniendo al mismo tiempo la trazabilidad y repetibilidad necesarias para tareas de seguimiento, tanto los costes de posicionamiento del TLS (Greco *et al.*, 2023).

No obstante, el empleo de un dron bajo copa presenta limitaciones importantes en la navegación a través de entornos forestales cerrados, por la oclusión por ramas y vegetación. Además, también existen limitaciones en la reconstrucción de la altura total del árbol, ya que la captura desde el interior del dosel no siempre incluye el ápice. Una potencial estrategia para superar este problema es combinar la información detallada del fuste obtenida bajo copa con un vuelo adicional sobre copa, que aporte una referencia completa de la coronación y permita estimar la altura total con mayor robustez (Reyes-Zurita *et al.*, 2022). La integración de ambas perspectivas —interna y superior— mejora la consistencia de las variables derivadas y su utilidad para cálculos de volumen y existencias.

Con este planteamiento, el presente trabajo valida, frente a las mediciones de campo, las estimaciones obtenidas mediante un dron que opera bajo copa para la caracterización de la geometría del fuste a nivel de árbol individual, y evalúa la ganancia de precisión al incorporar un vuelo complementario sobre copa para la estimación de la altura total. El objetivo es cuantificar la fiabilidad de estas métricas en condiciones reales de inventario y valorar el potencial de un flujo de trabajo combinado que reduzca esfuerzo y costes sin comprometer la calidad de

la información necesaria para la planificación selvícola y evaluación de recursos.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

Este trabajo se llevó a cabo en un rodal de 50 ha, ocupado por una masa de *Pinus sylvestris* en estado de fustal bajo, situado en la provincia de Soria (España). La masa había sido objeto de una primera clara y se localiza en una zona de escasa pendiente.

2.2. Trabajo de campo

Para la realización del trabajo de campo, se establecieron 11 parcelas circulares de radio 14,10 m (Figura 1). El centro de cada parcela se levantó con GPS submétrico y los árboles se georreferenciaron por rumbo y distancia al centro de la parcela. Para cada pie se midieron dos diámetros perpendiculares a 1,30 m (DBH) y la altura con hipsómetro Vertex. En total se inventariaron 442 pies. El volumen se calculó mediante las ecuaciones de cubicación para *Pinus sylvestris* publicadas en del Río *et al.*, (2006) (Figura 2).

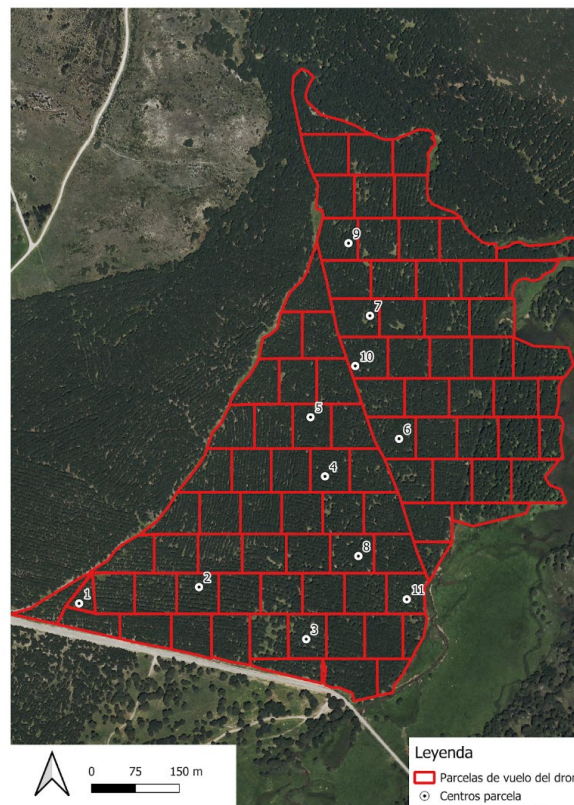


Figura 1. Posicionamiento de las parcelas de muestreo en el área de trabajo.

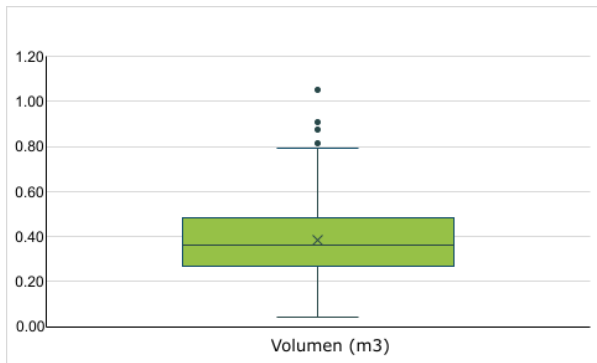


Figura 2. Distribución del volumen estimado por árbol individual

2.3. Dron bajo copa

El dron bajo copa geolocalizó cada pie, midió el diámetro del árbol cada 5 cm del cilindro de este desde la base (Figura 3) y calculó el volumen del fuste a partir de la nube de puntos. El volumen se estimó sobre el cilindro del árbol hasta un diámetro mínimo en punta delgada configurable (madera de sierra).

Para el diseño del vuelo del dron bajo copas se realizaron 25 parcelas de 0,50 has (Figura 1) garantizando el vuelo completo de todo el rodal.

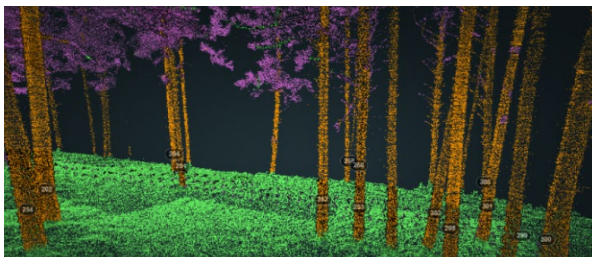


Figura 3. Nube de puntos del dron bajo copa con medición de diámetros.

2.4. Dron sobre copa e integración de datos

Para mejorar la estimación de la altura total se realizó el vuelo sobre copas, a partir del cual se individualizaron los pies y se derivaron alturas por árbol. Los árboles se emparejaron entre fuentes (campo, dron bajo copa y dron sobre copa) mediante su posición y correspondencia inequívoca.

3. RESULTADOS

3.1. Detección y emparejamiento de árboles

Se detectaron de manera inequívoca 397 árboles con el dron bajo copa de los 422 medidos en campo. En el vuelo sobre copas se identificaron 239 árboles coincidentes con los medidos y georreferenciados.

3.2. Diámetro normal (DBH)

Los diámetros derivados del dron tendieron a ser ligeramente superiores a los medidos en campo (Figura 4). La relación entre ambas mediciones para 397 árboles presentó un coeficiente de determinación $R^2=0,89$ (Figura 5).

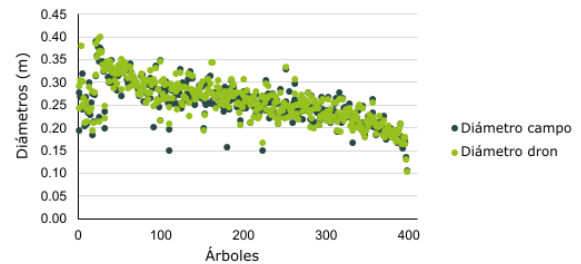


Figura 4. Diámetros comparados para los 397 árboles.

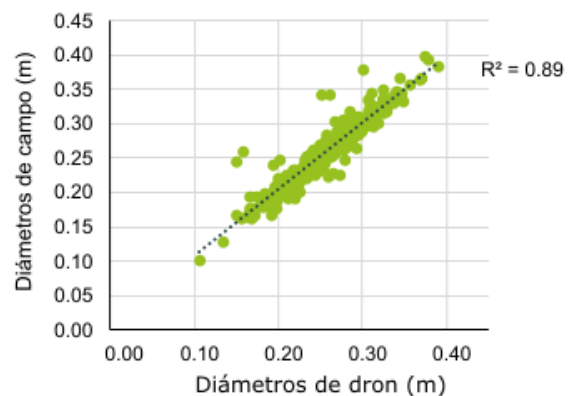


Figura 5. Relación entre diámetros medidos en campo y por el dron (procesado inicial).

3.3. Altura total

Las alturas obtenidas con el dron sobre copas mostraron alta concordancia con las mediciones en campo de los 239 árboles ($R^2=0,86$) (Figura 6), con pocas excepciones atribuibles a la forma del pie o a la complejidad de copa.

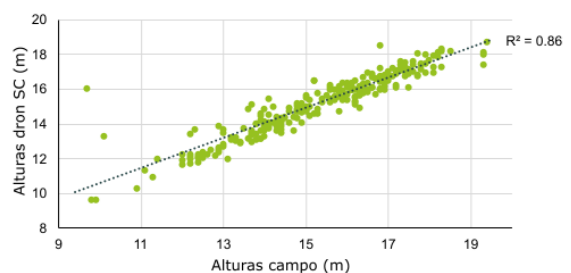


Figura 6. Relación de alturas medidas en campo y derivadas del dron sobre copas.

3.4. Volumen

El volumen estimado exclusivamente con el dron bajo copa presentó $89,75 \text{ m}^3$ frente a $99,53 \text{ m}^3$ calculados con datos de campo en 236 árboles, con una diferencia de $9,78 \text{ m}^3$. Al combinar diámetros del dron bajo copa con alturas del dron sobre copas y aplicar las ecuaciones de del Río *et al.*, (2006), para 236, se estimaron $98,12 \text{ m}^3$, con una diferencia de $1,41 \text{ m}^3$. (Figura 7)

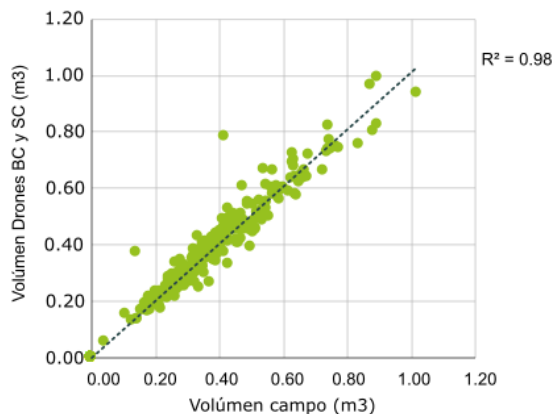


Figura 7. Relación de volúmenes estimados en campo y con drones (altura sobre copa + DBH bajo copa).

4. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos confirman que el uso de sistemas UAV bajo copa permitió obtener mediciones de diámetro normal (DBH) con una precisión elevada ($R^2=0,90$), validando su capacidad para la caracterización detallada de la geometría del fuste a nivel individual. Sin embargo, la estimación del volumen total del fuste presentó limitaciones cuando se empleó únicamente la perspectiva bajo copa, debido principalmente a la dificultad de capturar de forma completa la altura sobre todo a partir de las primeras ramas. Esta limitación técnica se superó eficazmente mediante la integración de datos de vuelos sobre copa, los cuales aportaron una referencia robusta de la altura total ($R^2=0,86$). La combinación de ambos sensores permitió reducir la diferencia en la estimación de volumen a tan solo $1,41 \text{ m}^3$ respecto a los datos de campo. Este ajuste casi perfecto demuestra que el flujo de trabajo combinado no solo es viable, sino que proporciona una fiabilidad equiparable o incluso superior a los inventarios tradicionales.

En relación con la precisión de los datos, es fundamental considerar que las mediciones manuales de campo no están exentas de sesgos humanos. El sistema LiDAR del dron ofrece una mayor repetibilidad y trazabilidad, aunque se debe tener en cuenta que al aplicar ecuaciones de cubicación externas se introduce el error inherente al propio modelo alométrico. No obstante, las reducidas desviaciones observadas afianzaron la utilidad de esta tecnología en el sector forestal.

Desde una perspectiva operativa, esta metodología supone una optimización significativa de los trabajos de campo, especialmente en condiciones donde el sotobosque denso o terrenos de difícil acceso (como áreas inundadas) dificultan el tránsito humano. La capacidad de generar nubes de puntos de alta densidad abre la puerta a aplicaciones avanzadas como el señalamiento automatizado y la integración directa con maquinaria forestal (procesadoras y autocargadores). Este avance permitiría cerrar el ciclo de gestión digital, asegurando la trazabilidad del producto bajo marcos regulatorios exigentes como la normativa europea EUDR.

5. CONCLUSIONES

La integración de sistemas UAV bajo y sobre copa constituye una metodología precisa y eficiente para la caracterización dendrométrica de masas forestales, permitiendo superar las limitaciones detectadas en la estimación del volumen. Este enfoque optimiza significativamente los tiempos y costes de inventario, especialmente en condiciones de difícil acceso. Futuros trabajos deberán centrarse en la automatización del proceso completo y la mejora de los algoritmos de individualización para facilitar la gestión forestal digital.

6. REFERENCIAS

- Beland, M., Parker, G., Sparrow, B., Harding, D., Chasmer, L., Phinn, S., Antonarakis, A., & Strahler, A. (2019). On promoting the use of lidar systems in forest ecosystem research. *Forest Ecology and Management*, 450, 117484. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117484>
- Greco, R., Barca, E., Raunonen, P., Persia, M., & Tartarino, P. (2023). Methodology for measuring dendrometric parameters in a mediterranean forest with UAVs flying inside forest. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 122, 103426. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103426>
- Martínez-Rodrigo, R., Gómez, C., Toraño-Caicoya, A., Bohnhorst, L., Uhl, E., & Águeda, B. (2022). Stand Structural Characteristics Derived from Combined TLS and Landsat Data Support Predictions of Mushroom Yields in Mediterranean Forest. *Remote Sensing*, 14(19), 5025. <https://doi.org/10.3390/rs14195025>
- Reyes-Zurita, N., Rodríguez-Ortiz, G., Enríquez-Del Valle, J. R., Jiménez-Colmenares, C. L., & Rincón-Ramírez, J. A. (2022). Estimación de variables dasométricas en rodales bajo manejo forestal con vehículos aéreos no tripulados. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 13(1), 22-31. <https://doi.org/10.29166/revfig.v13i1.3299>
- del Río, M., López, E., & Montero, G. (2006). Manual de gestión para masas procedentes de repoblación de *Pinus pinaster* Ait., *Pinus sylvestris* L. y *Pinus nigra* en Castilla y León. Junta de Castilla y León.
- Sánchez Alberola, J., Oliver, P., Estornell, J., & Dopazo, C. (2018). Estimación de variables forestales de *Pinus sylvestris* L. en el contexto de un inventario forestal aplicando tecnología LiDAR aeroportada. *GeoFocus Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 79-99. <https://doi.org/10.21138/GF.509>
- Torres-Rojas, G. T.-R., Romero-Sánchez, M. E., Velasco-Bautista, E., & González-Hernández, A. (2017). Estimación de parámetros forestales en bosques de coníferas con técnicas de percepción remota. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7(36), 7-24. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v7i36.56>