



2025 | **16-20**
GIJÓN | **JUNIO**

9º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

9CFE-1756

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

Organiza





Exactitud del escáner láser móvil para inventario y cubicación de choperas. Comparación entre escáneres (GeoSLAM ZEB Horizon y NavVis VLX 3) y trayectorias de medición

ARÉVALO-GONZÁLEZ, R. (1), ÁLVAREZ-CUEVAS, C. (2), CABO, C. (3), CASTEDO-DORADO, F. (1) y ÁLVAREZ-TABOADA, F. (1)

(1) Escuela de Ingeniería Agraria y Forestal, Universidad de León. 24401 Ponferrada, León, España.

(2) Garnica Plywood Valencia de Don Juan. 24200 Valencia de Don Juan, León, España.

(3) Escuela Politécnica de Mieres, Universidad de Oviedo. 33600 Mieres, Asturias, España.

Resumen

Se evaluó la idoneidad de dos escáneres láser portátiles (PLS) para estimar variables de árbol individual en plantaciones comerciales de *Populus x canadensis*, usando los escáneres con dos enfoques: (i) como una "forcípula 3D" (medición de diámetros a la altura del pecho -DAP-) y (ii) para crear un "gemelo digital" de cada árbol para estimar su volumen comercial (V, volumen del árbol hasta un diámetro de 20 cm). Las mediciones se realizaron en una plantación del clon I-214 de 16 años con un marco cuadrado de 5 m x 5 m (León), utilizando GeoSLAM ZEB Horizon y NavVis VLX 3. Para GeoSLAM ZEB Horizon, se siguieron dos trayectorias alternativas (A y B): pasando entre cada 2 filas y 3 filas de plantación, respectivamente. Para NavVis VLX 3, se siguió una trayectoria (C) en zigzag alrededor de cada pie. Las nubes de puntos se procesaron con 3DFin. Como referencia, se midió el DAP de todos los pies (225) con forcípula digital y para 15 de ellos (una vez apeados), se midió con cinta el diámetro del tronco cada 1 m (di) y se utilizó la fórmula de Smalian para calcular su V. GeoSLAM ZEB Horizon presentó menor rRMSE y rSesgo en la estimación del DAP que NavVis VLX 3 (rRMSE < 3,1 % vs rRMSE = 4,5 %), siendo la trayectoria cada 3 filas la más exacta (RMSE = 1,01 cm). El V más preciso se obtuvo con GeoSLAM ZEB Horizon cada 3 filas (rRMSE = 10,9 %) mediante el método de "gemelo digital". Los resultados de estimación de DBH obtenidos a partir de los escaneos con GeoSLAM Zeb Horizon mediante el algoritmo de procesamiento de 3DFin, presentaron errores menores a los obtenidos con el mismo escáner pero con otros algoritmos de procesamiento, al ser comparados otros estudios con el presente.

Palabras clave

Chopo, inventario forestal, , GeoSLAM, NavVis, , 3DFin

1. Introducción

Las limitaciones a nivel de versatilidad y capacidad de cobertura espacial de los inventarios forestales tradicionales han impulsado, en el marco de la silvicultura de precisión, el desarrollo y la adopción de métodos alternativos (BASKENT et al.,



2024), como son aquellos basados en la teledetección (MA et al., 2024). Así, el potencial de la aplicación de la teledetección en el inventario forestal ha sido reconocido tanto por la ciencia forestal, que indica la necesidad de una generación eficiente de datos de inventario útiles para la toma de decisiones en la gestión (AGUILAR et al., 2023), como por la práctica (WHITE et al., 2016). El progreso más significativo en el ámbito del inventario forestal basado en teledetección ha sido el desarrollo de la tecnología de escaneo láser, también conocida como *Light Detection and Ranging* (LiDAR) (WANG et al., 2019). El LiDAR se trata de una tecnología activa de teledetección que recopila datos espaciales tridimensionales de alta precisión (a modo de nubes de puntos, cada uno de ellos con coordenadas X, Y, Z) mediante técnicas de escaneo láser, medición de distancias, posicionamiento y orientación (NEWNHAM et al., 2015).

El LiDAR terrestre es utilizado preferentemente en entornos forestales para analizar variables de árbol individual como su volumen comercial, frente al LiDAR aéreo, ya que el primero permite escanear el entorno desde una perspectiva basal, registrando los fustes con reducidas oclusiones por parte del dosel (FOWLER & KADATSKIY, 2011; FAHEY et al., 2016). El LiDAR terrestre se implementa principalmente mediante dos sistemas: el escaneo láser terrestre (TLS) y el escaneo láser móvil (MLS), ambos diseñados para capturar datos tridimensionales de alta precisión en inventarios forestales (LIANG et al., 2022).

En las últimas décadas, el escáner láser terrestre (TLS) ha pasado de ser una herramienta experimental a un instrumento práctico para estimar, de forma no destructiva, características de los árboles que serían difíciles de medir en campo, como el perfil externo del tronco, las dimensiones de la copa, el volumen de madera o la biomasa aérea. Sin embargo, a pesar su potencial, el TLS aún no ha sido ampliamente adoptado por los profesionales del sector, debido al tiempo requerido de adquisición de datos, que supera lo considerado razonable para un inventario de campo, al tratarse de un sistema dependiente de uno o varios estacionamientos en trípode, generalmente múltiples para reducir las oclusiones (CALDERS et al., 2020).

Los escáneres láser móvil en su modalidad portátil (PLS), han demostrado su potencial para estimar variables a nivel de parcela y de árbol individual en inventarios forestales. Los PLS cuentan con algoritmos de localización y mapeo simultáneos (SLAM), lo que permite referenciar de manera continua mediciones de distancia láser en el espacio tridimensional recorrido con el escaneo, sin la necesidad de un sistema global de navegación por satélite (GNSS). PLS ofrece varias ventajas sobre TLS, como mayor velocidad de adquisición de datos, movilidad para evitar obstáculos entre árboles, menor peso del equipo o geolocalización eficiente de los datos (LIANG et al., 2022; FASSNATCH et al., 2024). Sin embargo, en comparación con los datos obtenidos con TLS, las nubes de puntos generadas por PLS suelen ser más ruidosas, presentando una menor precisión espacial, dadas las características de sus sensores y la propagación de errores de posicionamiento a lo largo de la trayectoria de escaneo (LIANG et al., 2014). Sin embargo, esto se ve compensado al disminuir las posibles oclusiones con trayectorias que escanean puntos desde más perspectivas que con múltiples



posicionamientos TLS. De este modo, la propia geometría del espacio virtualizado se corrige entre sí de forma homogénea.

La determinación de variables de árbol individual con PLS podría contar con un grado de precisión similar a la obtenida con TLS en condiciones forestales de complejidad espacial fácil-media (KÜKENBRINK et al., 2022), como es el caso de las plantaciones de chopo. Los aprovechamientos de la madera de chopo en auge se destinan a la industria de las maderas de sierra y contrachapado, con un alto valor añadido (PAILLASSA, 2014), por lo que la realización, precisa y eficiente, de un inventario y cubicación en las plantaciones de chopo, resulta crítica. Estudios previos han demostrado su capacidad para localizar árboles y precisión suficiente para estimar atributos como el DAP (diámetro a la altura del pecho) o la HT (altura total) (BALENOVIĆ et al., 2021; DONAGER et al., 2021). Sin embargo, la calidad de las estimaciones de atributos más complejos, como los diámetros a lo largo del tronco (di) o su volumen comercial o maderable (V, volumen del árbol hasta un diámetro dado en punta delgada), sigue siendo incierta (CHIAPPINI et al., 2022). Así mismo, los análisis comparativos entre escáneres portátiles de alta gama y diferentes intensidades y trayectorias de escaneo en el ámbito forestal son escasos, por lo que este ámbito de estudio supone un alto interés.

Es esencial evaluar el rendimiento del PLS, dada su versatilidad en grandes áreas forestales (GONZÁLEZ et al., 2023). Su rendimiento puede variar en función del sensor de escaneo 3D y de su algoritmo de localización y mapeo simultáneo (SLAM), dependiendo además de la trayectoria de medición seguida (TUPINAMBÁ-SIMÕES et al., 2023).

Por otro lado, las alternativas de inventario 3D mediante LiDAR, posibilitan la obtención de una gran variedad de datos registrados gracias a recientes algoritmos libres de procesado (MURTIYOSO et al., 2024), como 3DFin (LAÍNO et al., 2024), que permiten obtener, de manera automatizada, mediciones precisas a partir de las nubes de puntos registradas (AGUILAR et al., 2023).

2. Objetivos

Los objetivos del estudio fueron: (1) analizar la exactitud de dos escáneres láser portátiles en la estimación del diámetro normal (DAP) y del volumen comercial (V) usando diferentes trayectorias de escaneo; y (2) validar su uso para inventario y cubicación de choperas.

3. Metodología

Se evaluó la idoneidad de dos PLS de alta gama (GeoSLAM ZEB Horizon y NavVis VLX 3) para: (i) medir el diámetro a la altura del pecho (DAP), *i.e.*, usando el escáner como si de una "forcípula 3D" se tratase y (ii) calcular su volumen comercial (V, el volumen del árbol hasta un diámetro de 20 cm en punta delgada), a partir de un "gemelo digital" de cada árbol con el registro de los diámetros a las diferentes alturas del tronco (di).

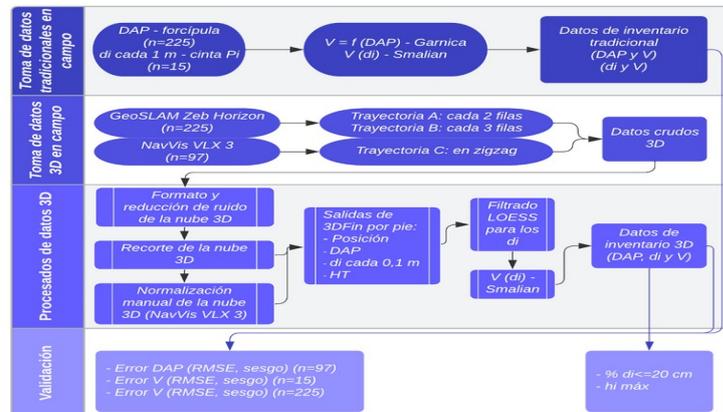


Figura 1. Flujo de trabajo, diferenciando las fases de Toma de datos tradicionales en campo y Toma de datos 3D en campo, Procesado de datos 3D y Validación.

El trabajo se realizó en una plantación de 225 pies de *Populus × canadensis*, clon I-214, de 16 años, con un marco de plantación cuadrado de 5 m x 5 m y podada en altura, en la parcela de La Aldea del Puente (León, España).

El flujo de trabajo que se siguió puede visualizarse en la Figura 1, diferenciando las fases de Toma de datos tradicionales en campo y Toma de datos 3D en campo, Procesado de datos 3D y Validación.

Sobre la toma de datos 3D en campo, la plantación se escaneó el 15 de septiembre de 2023, en condiciones de dosel con hoja, mediante los PLS citados anteriormente (Figura 2), teniendo en cuenta como especificaciones técnicas de GeoSLAM Zeb Horizon y de NavVis VLX 3, respectivamente, las siguientes: 300.000 vs 2.560.000 puntos emitidos y registrados por segundo (Hz), 100 vs 300 m de rango de alcance y 6 vs 5 mm de precisión relativa.



Figura 2. Aspecto de los escáneres GeoSLAM Zeb Horizon (izda.) y NavVis VLX 3 (dcha.). Fuentes web: www.navvis.com, www.faro.com.

En el caso del escáner GeoSLAM ZEB Horizon, se siguieron dos trayectorias de escaneo alternativas (A y B en la Figura 4), realizando pasadas cada 2 y cada 3 filas de plantación, respectivamente. En el caso del escáner NavVis VLX 3, se siguió una trayectoria de escaneo en zigzag (C, en la Figura 4), indicada por el distribuidor para cerrar la trayectoria con su algoritmo SLAM en el entorno de plantación.

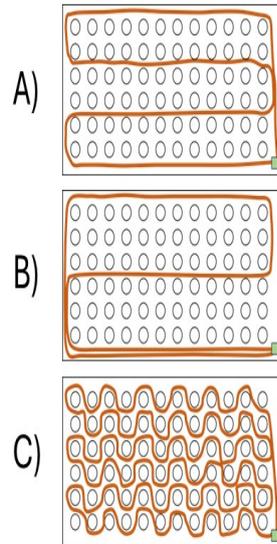


Figura 2. Trayectorias de escaneo seguidas: A) GeoSLAM cada 2 filas; B) GeoSLAM cada 3 filas; C) NavVis en zigzag. El cuadrado verde indica el inicio y fin de cada trayectoria. Las circunferencias representan los árboles en las filas de plantación.

Sobre los procesados de los datos 3D, las nubes registradas fueron preprocesadas, en primer lugar, mediante el *software* propietario de cada casa de escáner (Geoslam Connect, incluyendo un filtrado automático de ruido y valores paramétricos adaptados a entornos forestales y NavVis IVION Processing, incluyendo los valores paramétricos por defecto, a falta de valores optimizados para entornos forestales). Para los escaneos realizados con GeoSLAM Zeb Horizon, se procesaron los 225 pies, mientras que para los de NavVis VLX 3, se preprocesaron 97 pies, por una limitación del software.

La normalización de las alturas de la nube tomada con el escáner NavVis VLX 3 se llevó a cabo mediante dos metodologías alternativas: (i) normalización manual, mediante los *software* libres LASTools y CloudCompare y (ii) normalización estándar, según el algoritmo CSF (ZHANG et al., 2016), adaptado e implementado en 3DFin. Se testó la primera de las opciones para corregir el incorrecto registro estándar del terreno con la geometría de la superficie obtenida a través de los puntos basales registrados con este escáner, lo cual no fue necesario para las nubes obtenidas con GeoSLAM Zeb Horizon. Posteriormente, las nubes de puntos (Figura 3) se procesaron con el *software* libre 3DFin (LAÍNO et al., 2024) con valores paramétricos a medida adaptados al entorno de chopera, obteniéndose valores diametrales (d_i) en secciones de 10 cm a lo largo del tronco (Figura 4), incluyendo también el valor del DAP ($d_i = 1,30$ m) de cada árbol, individualizado y posicionado.

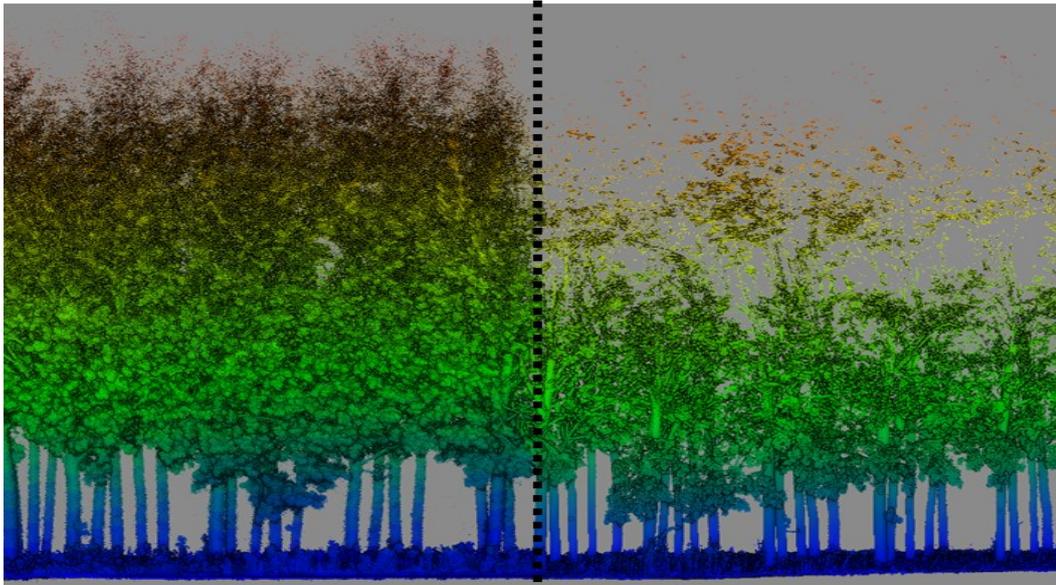


Figura 3. Nubes de puntos 3D obtenidas con GeoSLAM Zeb Horizon (izda.) y con NavVis VLX 3 (dcha.).

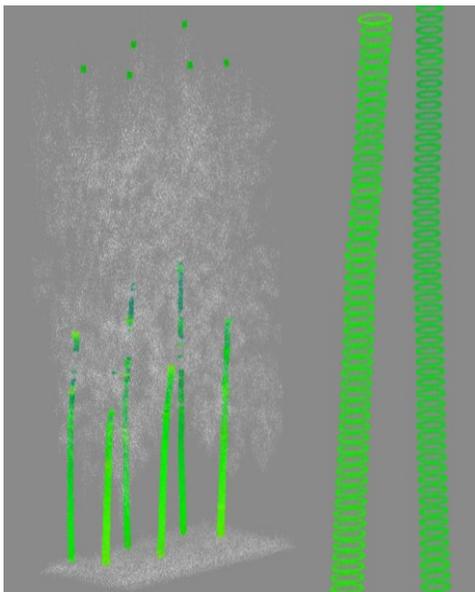


Figura 4. Secciones diametrales cada 10 cm obtenidas con el software 3DFin.

Las secciones brutas correspondientes al perfil externo del tronco presentaban numerosos valores extremos, por lo que se realizó una depuración previa. Para ello se empleó una función LOESS (*Locally Estimated Scatterplot Smoothing*). Una vez depurados los diámetros del perfil externo del tronco (d_i), se calcularon los valores de V para cada árbol, aplicando de manera integrada la fórmula de Smalian entre secciones contiguas.

Sobre la toma de datos tradicionales en campo, por un lado, los valores de referencia de DAP fueron tomados en septiembre de 2023 utilizando mediciones



únicas con forcípula digital con una precisión de 0,1 cm. Los valores de V para cada uno de los 225 árboles fueron estimados con las tablas de cubicación de la empresa Garnica. Por otro lado, se apearon 15 árboles, cuyos perímetros a lo largo del tronco fueron medidos en intervalos de 1 m con cinta con una precisión de 0,1 cm. A partir de estas mediciones se calcularon los perímetros de cada sección (d_i) y se estimaron los valores de V con corteza mediante la fórmula de Smalian integrando cada par de secciones contiguas. Estos valores de DAP, D_i y de volumen se emplearon como verdad-terreno para validar las mediciones de los escáneres.

La exactitud de los valores de DAP y de V fue determinada mediante los siguientes estadísticos de error: RMSE, rRMSE, Sesgo y rSesgo (ecuaciones 1 a 4),

Donde N es el número de pies, \hat{x}_i denota el conjunto de valores estimados, x_i son los correspondientes valores de referencia y \bar{x}_r denota la media de los valores de referencia: (aquí no nos deja meter los símbolos del editor de ecuaciones, antes de "denota", "son" y "denota", es una cuestión de la plataforma)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \hat{x}_i)^2}{N}} \quad (1)$$

$$rRMSE = \frac{RMSE}{\bar{x}_r} * 100 \quad (2)$$

$$Sesgo = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \hat{x}_i)}{N} \quad (3)$$

$$rSesgo = \frac{Sesgo}{\bar{x}_r} * 100 \quad (4)$$

La raíz cuadrada del error medio cuadrático (RMSE), al estar expresada en las mismas unidades que la variable dependiente, permitió estimar error medio que se comete con los datos a comparar respecto de los considerados como referencia. El Sesgo se trató como una medida de la media de la diferencia entre los valores a evaluar y los valores tomados como referencia (PERUGIA et al., 2019; HYYPPÄ et al., 2020; TUPINAMBÁ-SIMÕES et al., 2023). (RMSE y Sesgo se dan en unidades absolutas, mientras que rRMSE y rSesgo se dan en unidades relativas (%)). Además, la exactitud también fue evaluada con el estadístico de Media.

Así mismo, se comprobó el porcentaje de pies en los que se llegó al diámetro en punta delgada (en ese caso $DPD = 20$ cm), diferenciada por el escáner portátil de medición, la trayectoria de escaneo y la modalidad de normalización de las alturas. Finalmente, para cada nube, se analizó la altura máxima de detección de secciones (h_i máx).

4. Resultados

Las nubes obtenidas con ambos escáneres permitieron alcanzar valores en la

detección de árboles del 100 % de integridad (proporción de pies detectados respecto del total de pies presentes) y corrección (proporción de elementos detectados como pies que realmente eran pies).

Para los 97 árboles de la parcela comparables entre ambos escáneres, GeoSLAM ZEB Horizon proporcionó un menor RMSE y un menor Sesgo en la estimación del DAP que NavVis VLX 3, independientemente de la trayectoria de escaneo utilizada (Tabla 1 y Figura 5) ($rRMSE < 3,07\%$ vs $3,58\%$). El escáner GeoSLAM ZEB Horizon, usando una trayectoria de escaneo cada 2 filas, permitió estimar el DAP de la manera más exacta ($rRMSE = 2,68\%$).

Tabla 1. Valores de error en la estimación de DAP y V y proporción de pies con detecciones diametrales hasta el diámetro en punta delgada, según escáneres, trayectorias de escaneo y modalidades de normalización de alturas.

Nube de puntos		1	2	3	4
Escáner		ZEB Horizon	ZEB Horizon	VLX 3	VLX 3
Trayectoria de escaneo		A) cada 2 filas	B) cada 3 filas	C) en zigzag	C) en zigzag
Normalización de alturas		Estándar	Estándar	Estándar	Manual
DAP (n = 97 árboles en pie)	Media (cm)	37,61	37,65	39,7	39,17
	RMSE (cm)	1,15	1,01	1,73	1,38
	rRMSE (%)	3,07	2,68	4,49	3,58
	Sesgo (cm)	-0,02	+0,03	+1,2	+0,66
	rSesgo (%)	-0,04	+0,08	+3,12	+1,73
Pies en los que se alcanza a medir el diámetro en punta delgada (20 cm)	(%)	93,81	92,78	17,53	26,8
Volumen comercial (n = 15 árboles apeados)	Media (m ³)	0,87	0,88	1,09	0,93
	RMSE (m ³)	0,12	0,10	0,21	0,13
	rRMSE (%)	12,44	10,97	22,74	13,32
	Sesgo (m ³)	-0,08	-0,06	+0,15	-0,01
	rSesgo (m ³)	-8,08	-6,16	+15,99	-8,08
Volumen comercial (n = 225 árboles en pie)	Volumen total (m ³)	221,55	217,81		
	rRMSE (%)	2,83	4,47		
	rSesgo (%)	-2,83	-4,47		

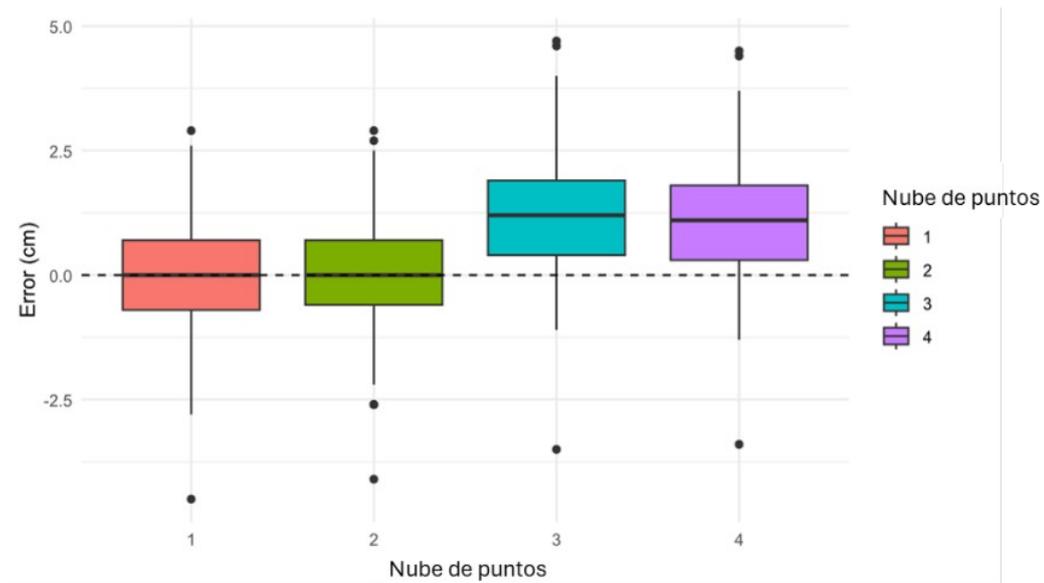


Figura 5. Distribución de los errores en la estimación de DAP para las 4 nubes de puntos analizadas ($n = 97$) mediante diagramas de cajas.

Para los 15 árboles apeados, el rRMSE para V mediante GeoSLAM ZEB Horizon fue menor que utilizando NavVis VLX 3 (mediante la nube normalizada manualmente) ($<12,44$ vs $13,32$ %). El V más preciso se obtuvo empleando el escáner ZEB Horizon con una trayectoria de escaneo cada 3 filas (rRMSE = $10,97$ % y RMSE = $0,10$ m³) (Tabla 1 y Figura 6).

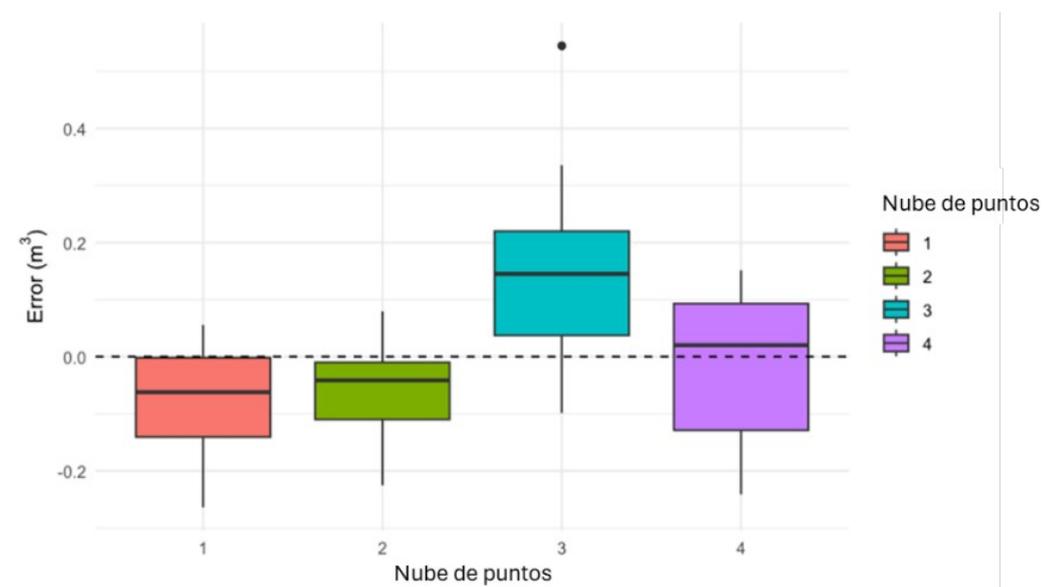


Figura 6. Distribución de los errores en las estimaciones de V para las 4 nubes analizadas ($n = 15$) mediante diagramas de cajas.

En cuanto al volumen comercial de toda la parcela ($n=225$ árboles) y considerando el valor estimado por la empresa Garnica con sus tablas de cubicación como referencia, los rRMSE obtenidos utilizando GeoSLAM ZEB Horizon fueron un $4,47$ % menores, independientemente de la trayectoria de escaneo seguida (Tabla 2). El diámetro maderable en punta delgada (20 cm) se

detectó en aproximadamente el 93 % de los árboles con las mediciones mediante GeoSLAM Zeb Horizon, frente a menos del 27 % con las mediciones a través de NavVis VLX 3 (Tabla 1). Por otro lado, GeoSLAM Zeb Horizon pudo registrar diámetros detectables (di) en el procesado a mayor altura (hi máx) que NavVis VLX 3 (Figura 7).

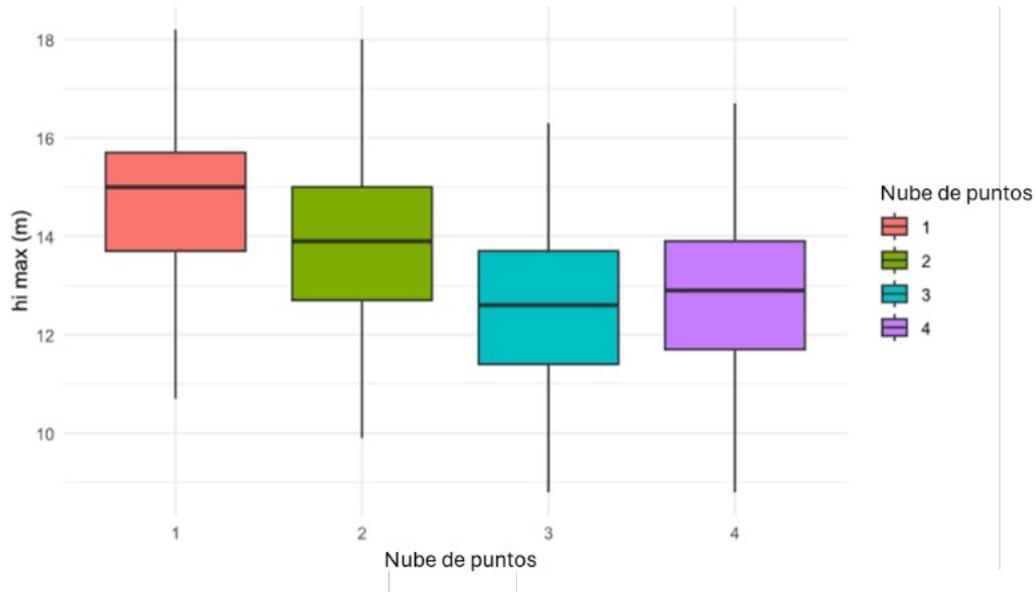


Figura 7. Diagramas de cajas de las alturas de la sección di más alta detectada (hi máx), para las 4 nubes analizadas, registradas con diferentes escáneres, trayectorias de escaneo y métodos de normalización de alturas (n = 97).

5. Discusión

La exactitud de las estimaciones mediante escaneos con GeoSLAM ZEB Horizon fue mayor que la obtenida con las estimaciones mediante escaneos con NavVis VLX 3. Así, se determinó la idoneidad del empleo de GeoSLAM ZEB Horizon frente a NavVis VLX 3 a la hora de realizar inventarios forestales mediante datos 3D. NavVis VLX 3, a pesar de contar con especificaciones técnicas a priori más favorables, presentó un desempeño menor en entornos forestales, debido probablemente a las diferencias entre los algoritmos SLAM de ambas marcas y las opciones de optimización para entornos forestales, sin disponibilidad en el caso de NavVis VLX 3. Además, NavVis VLX 3 requirió una trayectoria de escaneo altamente intensiva, reduciendo su operatividad en campo y al contar con un registro tan denso de puntos, aumentando los requerimientos computacionales a nivel de potencia y tiempo en las fases de preprocesado y procesado.

Las estimaciones de DAP más exactas por el método 3D se obtuvieron a partir de nubes registradas con GeoSLAM Zeb Horizon, presentándose a continuación los valores de error absoluto promediados para ambas trayectorias empleadas (i.e., cada 2 y cada 3 filas): RMSE = 1,08 cm y sin sesgo. Estos resultados resultaron similares a los obtenidos por BALESTRA et al. (2024), que con el mismo escáner y



software de procesamiento obtuvieron valores de RMSE = 1,47 cm y Sesgo = -0,84 cm en parcelas de *Pinus sylvestris*. Por otro lado, AGUILAR et al. (2023) presentaron resultados con diferentes *software* de procesamiento, agrupando 6 parcelas de *Pinus halepensis* escaneadas con TLS y 3 parcelas de chopo escaneadas con GeoSLAM Zeb Horizon con una trayectoria cada fila de plantación. Los errores expuestos se corresponden a aquellos en el percentil 75 de los presentados para las 9 parcelas en conjunto, suponiéndose una relación de los mayores errores con la alternativa PLS y no la TLS: RMSE \approx 3,1 cm al procesar con AID-Forest, RMSE \approx 4,1 cm al procesar con UALtree y RMSE \approx 6,7 cm al procesar con 3D Forest, presentando en todos los casos errores mayores a los obtenidos en el presente estudio con el algoritmo de procesamiento 3Dfin. Por otro lado, TUPINAMBÁ-SIMÕES et al. (2023), con GeoSLAM Zeb Horizon, lograron errores generalmente menores al estimar el DAP cuando la trayectoria de escaneo, para parcelas de 100 m x 100 m, era cada 5 filas de plantación, respecto a cuando se realizaba una trayectoria de recorrido en “X”, lo que seguir una trayectoria recorriendo las filas de plantación, podría indicar una ventaja en el registro y la reducción de oclusiones.

Los resultados más exactos en la estimación de volumen comercial por el método 3D se obtuvieron a partir de nubes registradas con GeoSLAM Zeb Horizon, presentándose a continuación los valores de error relativo promediados para ambas trayectorias empleadas (i.e., cada 2 y cada 3 filas): rRMSE = 11,71 % y sin sesgo. HYYPPÄ et al. (2020) lograron un rRMSE del 10,00 % en estimaciones de volúmenes totales con el mismo escáner, en parcelas circulares con radio de 25 m de *Picea abies* siguiendo una trayectoria en “X”. Esto podría indicar una capacidad limitante alrededor del 10 % a la hora de estimar volúmenes con la tecnología que ofrece GeoSLAM Zeb Horizon..

Por otro lado, en el presente estudio se consideró el uso de dos PLS diferentes de gama alta. Futuros análisis podrían incluir enfoques comparativos con PLS de bajo coste, aunque como indicaron BALESTRA et al. (2024), esta gama de escáneres aún requiere mejoras a nivel de la tecnología del sensor y de sus algoritmos SLAM para el cierre virtual de la trayectoria de escaneo. Por ello, se descarta su uso, al menos por el momento, para inventario y cubicación de plantaciones comerciales de alto valor añadido como son las de chopo.

6. Conclusiones

GeoSLAM ZEB Horizon es lo suficientemente preciso para estimar el DAP y el V en plantaciones de chopo, incluso con una trayectoria de escaneo poco intensiva (e.g., cada 3 filas) y en condiciones de dosel con hoja. Se recomienda la trayectoria cada 3 filas de plantación frente a la trayectoria cada 2 filas, para reducir el tiempo de toma y el tamaño de datos de la nube de puntos, aumentando la eficiencia de todo el flujo operativo. NavVis VLX 3 permite obtener estimaciones con menor exactitud, así como representaciones del suelo menos adecuadas que dificultan una normalización estandarizada de las alturas de las nubes obtenidas y obligan a generar una normalización de alturas manual. Además, requiere una trayectoria de escaneo altamente intensiva (i.e., en zigzag alrededor de cada pie) y un preprocesado y procesamiento con una elevada carga computacional (debido a la elevada densidad de puntos de escaneo).



Los resultados de estimación de DBH obtenidos a partir de los escaneos con GeoSLAM Zeb Horizon mediante el algoritmo de procesamiento de 3DFin, presentaron errores menores a los obtenidos con el mismo escáner pero con otros algoritmos de procesamiento, al ser comparados otros estudios con el presente, y permiten validar su uso para inventario y cubicación de choperas.

7. Bibliografía

AGUILAR, F. J.; NEMMAOUI, A.; ÁLVAREZ-TABOADA, F.; RODRÍGUEZ, F. A.; AGUILAR, M. A.; 2023. New Efficient and Automatic Approach to Extract Dendrometric Features from Terrestrial LiDAR Point Clouds in Forest Inventories. *Advances in Design Engineering IV* pp. 330-341 http://dx.doi.org/10.1007/978-3-031-51623-8_32

BALENOVIĆ, I.; LIANG, X.; JURJEVIĆ, L.; HYYPPÄ, J.; SELETKOVIĆ, A.; KUKKO, A.; 2021. Hand-held personal laser scanning—current status and perspectives for forest inventory application. *Croatian Journal of Forest Engineering* 42(1) pp. 165-183. <https://doi.org/10.5552/crojfe.2021.858>

BALESTRA, M.; CABO, C.; MURTIYOSO, A.; VITALI, A.; ÁLVAREZ-TABOADA, F.; CANTERO-AMIANO, A.; BOLAÑOS, R.; LAINO, D.; PIERDICCA, R.; 2024. Advancing forest inventory: a comparative study of low-cost MLS lidar device with professional laser scanners. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 48 pp. 9-15. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-W8-2024-9-2024>

BASKENT, E. Z.; BORGES, J. G.; KAŠPAR, J.; 2024. An Updated Review of Spatial Forest Planning: Approaches, Techniques, Challenges, and Future Directions. *Current Forestry Reports* pp. 1-23. <https://doi.org/10.1007/s40725-024-00222-8>

CALDERS, K.; ADAMS, J.; ARMSTON, J.; BARTHOLOMEUS, H.; BAUWENS, S.; BENTLEY, L. P.; CHAVE, J.; DANSON, F. M.; DEMOL, M.; DISNEY, M. ; GAULTON, R.; MOORTHY, S. M. K.; 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. *Remote Sensing* 251 p. 112102. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112102>

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. *Computers and Electronics in Agriculture* 198 p. 107069. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107069>

DONAGER, J. J.; SÁNCHEZ MEADOR, A. J.; BLACKBURN, R. C.; 2021. Adjudicating



perspectives on forest structure: how do airborne, terrestrial, and mobile lidar-derived estimates compare? *Remote Sensing* 13(12) p. 2297. <https://doi.org/10.3390/rs13122297>

FAHEY, R. T.; TALLANT, J.; GOUGH, C. M.; HARDIMAN, B. S.; ATKINS, J.; SCHEUERMANN, C. M.; 2016. Comparison of Aerial and Terrestrial Remote Sensing Techniques for Quantifying Forest Canopy Structural Complexity and Estimating Net Primary Productivity. *AGU Fall Meeting Abstracts* 2016, p. 7.

FASSNACHT, F. E.; WHITE, J. C.; WULDER, M. A.; NÆSSET, E.; 2024. Remote sensing in forestry: current challenges, considerations and directions. *Forestry* 97(1) pp. 11-37. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpad024>

FOWLER, A.; KADATSKIY, V.; 2011. Accuracy and error assessment of terrestrial, mobile and airborne lidar. *Proceedings of ASPRP 2011* 1(5) pp. 1-9.

GONZÁLEZ, R. A.; GÓMEZ, C. C.; LÓPEZ, J. G.; DORADO, F. C.; CUEVAS, C. Á.; ÁLVAREZ-TABOADA, F.; 2023. Is handheld mobile scanner data operational for the evaluation of field performance of poplar clones? *IEEE MetroAgriFor 2023* pp. 618 – 623. <https://doi.org/10.1109/MetroAgriFor58484.2023.10424331>

HYYPPÄ, E.; YU, X.; KAARTINEN, H.; HAKALA, T.; KUKKO, A.; VASTARANTA, M.; HYYPPÄ, J.; 2020. Comparison of Backpack, Handheld, Under-Canopy UAV, and Above-Canopy UAV Laser Scanning for Field Reference Data Collection in Boreal Forests. *Remote Sensing* 12(20) pp. 1-31.

KÜKENBRINK, D.; MARTY, M.; BÖSCH, R.; GINZLER, C.; 2022. Benchmarking laser scanning and terrestrial photogrammetry to extract forest inventory parameters in a complex temperate forest. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 113(102999) pp. 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102999>

LAÍNO, D.; CABO, C.; PRENDES, C.; JANVIER, R.; ORDOÑEZ, C.; NIKONOVAS, T.; DOERR, S.; SANTÍN, C.; 2024. 3DFin: a software for automated 3D forest inventories from terrestrial point clouds. *Forestry* 97(4) pp. 479 - 496. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpae020>

LIANG, X.; KUKKO, A.; KAARTINEN, H.; HYYPPÄ, J.; YU, X.; JAAKKOLA, A.; WANG, Y.; 2014. Possibilities of a Personal Laser Scanning System for Forest Mapping and Ecosystem Services. *Sensors* 14(1), pp. 1228-1248. <https://doi.org/10.3390/s140101228>

LIANG, X. ; KUKKO, A. ; BALENOVIC, I. ; NINNI, S. ; JUNTILA, S. ; KANKARE, V. ; HOLOPAINEN, M. ; MARTIN, M. ; SUROVY, P. ; KAARTINEN, H. ; LUKA, J. ; HONKAVAARA, E. ; NASI, R. ; JINGBIN, L. ; HOLLAUS, M. ; TIAN, J. ; YU, X. ; JIE, P. ;



SHANGSHU, C. ; VIRTANEN, J. P. ; WANG, Y. ; HYYPPA, J. ; 2022. Close-Range Remote Sensing of Forests: The State of the Art, Challenges, and Opportunities for Systems and Data Acquisitions. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine* pp. 2-41. <https://doi.org/10.1109/MGRS.2022.3168135>

MA, T.; ZHANG, C.; JI, L.; ZUO, Z.; BECKLINE, M.; HU, Y.; LI, X. ; XIAO, X.; 2024. Development of forest aboveground biomass estimation, its problems and future solutions: A review. *Ecological Indicators* 159 p. 111653. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111653>

MURTIYOSO, A.; CABO, C.; SINGH, A.; OBAYA, D. P.; CHERLET, W.; STODDART, J.; FOL, C. R.; SCHWENKE, M. B.; REHUSH, N.; STEREŃCZAK, K.; CALDERS, K.; GRIESS, V. C.; MOKROŠ, M.; 2024. A review of software solutions to process ground-based point clouds in forest applications. *Current Forestry Reports* 10(6) pp. 401-419. <https://doi.org/10.1007/s40725-024-00228-2>

NEWNHAM, G. J.; ARMSTON, J. D.; CALDERS, K.; DISNEY, M. I.; LOVELL, J. L.; SCHAAF, C. B.; STRAHLER, A. H.; DANSON, F. M. (2015). Terrestrial laser scanning for plot-scale forest measurement. *Current Forestry Reports* 1 pp. 239-251. <https://doi.org/10.1007/s40725-015-0025-5>

PAILLASSA, É. (2014) Les peupleraies : Quels enjeux pour l'avenir de la populiculture française ? *Revue Forestière Française* 66(3), pp. 301-311. <http://dx.doi.org/10.4267/2042/56060>

PERUGIA, B. D.; GIANNETTI, F.; CHIRICI, G.; TRAVAGLINI, D; 2019. Influence of Scan Density on the Estimation of Single-Tree Attributes by Hand-Held Mobile Laser Scanning. *Forests* 10(3) p. 277. <https://doi.org/10.3390/f10030277>

Stovall, A. E. L.; MacFarlane, D. W.; Crawford, D.; Jovanovic, T.; Frank, J.; Brack, C.; 2023. Comparing mobile and terrestrial laser scanning for measuring and modelling tree stem taper. *Forestry* pp. 1-13. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpad012>

TUPINAMBÁ-SIMÕES, F.; PASCUAL, A.; GUERRA-HERNÁNDEZ, J.; ORDÓÑEZ, C.; DE CONTO, T.; BRAVO, F.; 2023. Assessing the performance of a handheld laser scanning system for individual tree mapping—A Mixed forests showcase in Spain. *Remote Sensing* 15(5) p. 1169. <https://doi.org/10.3390/rs15051169>

WANG, Y.; LEHTOMÄKI, M.; LIANG, X.; PYÖRÄLÄ, J.; KUKKO, A.; JAAKKOLA, A.; LIU, J.; FENG, Z.; CHEN, R.; HYYPPÄ, J.; 2019. Is field-measured tree height as reliable as believed – A comparison study of tree height estimates from field measurement, airborne laser scanning and terrestrial laser scanning in a boreal forest. *Remote Sens* 147 pp. 132–145. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.11.008>



WHITE, J. C.; COOPS, N. C.; WULDER, M. A.; VASTARANTA, M.; HILKER, T.; TOMPALSKI, P.; 2016. Remote Sensing Technologies for Enhancing Forest Inventories: A Review. *Remote Sens* 42(5) pp. 619–641. <https://doi.org/10.1080/07038992.2016.1207484>

ZHANG, W.; QI, J.; WAN, P.; WANG, H.; XIE, D.; WANG, X.; YAN, G; 2016. An Easy-to-Use Airborne LiDAR Data Filtering Method Based on Cloth Simulation. *Remote Sensing* 8(6) pp. 1-22. <https://doi.org/10.3390/rs8060501>