

9CFE-1341

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



Organiza



Evaluando el escáner laser terrestre para la obtención de atributos biométricos de parcelas de inventario forestal en pinares de *Pinus sylvestris L*.

<u>CABALLERO GARZÁS, C. (1)</u>, BENITO, L. F. (1), NAVAS, S. (2), PARRAS, A. (1), BACHILLER, A. (1), VISCASILLAS, E. (1), AULLÓ-MAESTRE, I. (1), CHACÓN, S. (3), VÁZQUEZ, A. (1), MONTES, F. (1), HERNÁNDEZ, L. (1).

(1) Departamento de gestión forestal para el cambio climático, Instituto de Ciencias Forestales, INIA-CSIC

(2) Departamento de biodiversidad, conservación y evolución, Universidad Complutense de Madrid.

(3) ACRE Surveying Solutions

Resumen

En las últimas décadas se han ido incorporando nuevas tecnologías LiDAR para el seguimiento de los sistemas forestales con el fin de optimizar la toma de datos y proporcionar la información necesaria para la investigación y la gestión forestal. El objetivo de este trabajo es evaluar el potencial del escáner láser terrestre (TLS) para la caracterización de la estructura de la masa y analizar los factores que determinan la precisión de las estimaciones. Para ello se escanearon con el escáner laser Leica BLK360 nueve parcelas de 0,5 ha en masas de Pinus sylvestris en diferentes estados de desarrollo en los montes de Pinar de Valsaín y Pinar de Navafría, en los que se aplican diferentes métodos de gestión forestal. Se midieron en campo los diámetros a la altura del pecho y altura de los árboles así como su localización dentro de la parcela. La segmentación de la nube de puntos y estimación de variables dendrométricas se realizó con la aplicación 3DFin, comparando con las mediciones de campo a nivel de árbol individual. Los resultados muestran una alta tasa de detección de los árboles y alta precisión de las estimaciones de DBH y altura. La detección de los árboles y los errores de estimación no se han visto influenciados por la estructura de la masa, pero sí están influenciados por la posición de los árboles situados entre los últimos escaneos y el borde de la parcela. Estos resultados demuestran que el TLS proporciona información precisa de la estructura forestal.

Palabras clave

Digitalización, nube de puntos, estructura forestal, metodología de toma de datos. **1.Introducción**

Los principales retos a los que se enfrentan actualmente los bosques son los cambios en la potencialidad de las condiciones climáticas a las que actualmente están adaptadas algunas especies (AITKEN et al.N 2008; THUILLER et al., 2008), modificando su distribución, dinámica y biodiversidad. Para poder diseñar estrategias de mitigación de los efectos del cambio climático y de los cambios de uso del suelo es necesario analizar la dinámica forestal y el régimen de perturbaciones en el que se han desarrollado los ecosistemas forestales y modelizar su respuesta a diferentes escenarios climáticos y de gestión. En las últimas décadas la gestión forestal ha ido incorporando prácticas para la conservación de hábitats y especies amenazadas, con técnicas para evaluar el estado de conservación en los inventarios forestales (CRECENTE et al., 2015; ALBERDI et al., 2018). Los métodos tradicionales para la realización de inventario forestal han consistido en mediciones en campo e imágenes aéreas, presentando limitaciones en términos de precisión y eficiencia. Las nuevas tecnologías, como



las aeronaves por control remoto (RPAs), el escáner laser o técnicas basadas en fotos hemisféricas como ForeStereo (RODRÍGUEZ-GARCÍA et al., 2014) permiten obtener datos precisos de la cubierta forestal para caracterizar el hábitat, su composición o estructura.

Entre estas tecnologías, el Escáner Láser Terrestre (Terrestrial Laser Scanning, TLS) se ha consolidado como una herramienta clave para obtener información detallada del entorno forestal. El TLS emplea un sensor que emite pulsos laser, midiendo la distancia a la que choca el láser con el árbol y la intensidad del retorno. Así genera una nube de puntos tridimensional y detallada representativa de la parcela (WILKES et al., 2017). Gracias a su capacidad para recrear la estructura tridimensional de forma exhaustiva, con gran detalle y precisión, así como capacidad de combinar con imágenes RGB, HDR y térmicas, permiten múltiples aplicaciones ecológicas desde la escala de individuo a la escala poblacional (CALDERS et al., 2020). Además, permite realizar estimaciones de forma no destructivas como es en el caso de la estimación de biomasa (WILKES et al., 2017; MÉNDEZ-MIGUELEZ et al., 2023), y la combinación con técnicas complementarias como teledetección aérea y satelital o técnicas de aprendizaje profundo ofrece nuevas posibilidades a su desarrollo y aplicación (CALDERS et al., 2020). Numerosos estudios han demostrado las ventajas del TLS sobre los métodos convencionales, optimizando la toma de datos y midiendo con alta precisión (LIANG et al., 2018; LAINO et al., 2024). Sin embargo, entre los desafíos que enfrenta se encuentran las oclusiones causadas por la superposición de elementos vegetales, que dificultan la captura completa de datos en entornos forestales complejos y densos, especialmente de las hojas y copas (WILKES et al., 2017). Además, el procesamiento y análisis de las grandes cantidades de datos generados para la reconstrucción 3D hace necesario de disponer de ordenadores con grandes capacidades computacionales y programas automatizados y robustos que permitan manejar la gran variabilidad de bosques (LIANG et al., 2018).

Este trabajo se desarrolla en el monte de *Pinar de Valsaín* y en el monte de *Pinar de Navafría*, situados en la provincia de Segovia, en la vertiente norte de la Sierra de Guadarrama. La mayor parte de la superficie de ambos montes se encuentra poblada por pinar natural de *Pinus sylvestris*, mezclándose con *Quercus pyrenaica* en las cotas inferiores. En el monte de *Pinar de Valsaín* el método de ordenación es el Tramo Móvil con un turno de corta de 120 años, llevándose a cabo un aclareo sucesivo de forma gradual que da lugar a la distribución irregular de los pies de regenerado de la masa. Esto permite que los pies menores formen un patrón espacial agregado, atenuándose con la edad de la masa. En el *monte de Pinar de Navafría* el métodod de ordenación aplicado de 1899 es de Tramos Permanentes con un turno de 100 años, distribución de la masa es muy regular y la regeneración es homogénea, debido a un régimen de clara más intenso. (MONTES, 2004).

El objetivo de este trabajo es evaluar el potencial del TLS para la caracterización de la estructura de la masa y analizar los factores que determinan la precisión de las estimaciones, así como explorar los retos asociados a su implementación en campo, proporcionando una comparación cuantitativa con métodos de inventario convencionales para así contribuir al avance de las tecnologías de inventario forestal, necesaria para la investigación y la gestión forestal.

2.Metodología

Durante el año de 2024 se escanearon nueve parcelas cuadradas y rectangulares de 0,5 ha de masas puras de *Pinus sylvestris* en diferentes estados de desarrollo en



los montes de *Pinar de Valsaín* y *Pinar de Navafría*. En estos montes se aplican métodos de gestión diferentes, por los que cuentan con diferentes estructura y distribución de edades (**Tabla 1**). Estas parcelas forman parte de la Red de Parcelas Permanentes del ICIFOR-INIA (CSIC) y son inventariadas cada cuatro años con métodos tradicionales, obteniendo los diámetros y alturas de los árboles identificados y posicionados, con diámetro mayor a 10 centímetros.

Se empleó el escáner laser Leica BLK360 G1, de un kilogramo de peso, alcance de 60m, campo de visión de 360° x 360°, velocidad de escaneo de 360.000 puntos por segundo y precisión de 8 milímetros a 20 metros de distancia. Cuenta con una aplicación móvil (Cyclone Field 360) para realizar los escaneos, en los que se estableció una densidad de escaneo media con imágen RGB. Se realizó un escaneo múltiple en cuadricula para abarcar toda la extensión de la parcela estableciendo una distancia máxima de 15 metros entre puntos de escaneos. Esta distancia es menor que la distancia de alcance del escáner porque, aunque se encuentran retornos a más de 15 metros, estos tienen una menor precisión y resolución (WILKES et al., 2017). Se usó el criterio de no establecer los puntos de escaneo demasiado cerca de árboles para evitar problemas de oclusión, y se tomó su posición con un GPS Emlid Reach RS3 con precisión submétrica.

Para el posterior registro de estos escaneos se emplearon como dianas artificiales jalones con esferas de 20 cm de diámetros (Figura 2a), de forma que pudiesen ser reconocidas 360°. Se probaron dos metodologías diferentes para el escaneo de las parcelas. En el primer método se distribuyeron, previamente al escaneo, entre 20 y 25 dianas artificiales por toda la parcela de forma que fueran vistas desde los puntos de escaneos fijados (Figura 1a). La segunda metodología se basó en la configuración de escaneo en cadena siguiente la propuesta de WILKES et al. En esta solo se necesitan dos conjuntos con un mínimo de 4 dianas, que se colocan enlazando el con el punto de escaneo inmediatamente anterior y posterior, como se muestra en la Figura 1b. Una vez realizado el escaneo, se desplaza el conjunto de dianas que enlazaba con el escaneo anterior al siguiente. Las diferencias logísticas de estas dos metodologías se resumen en la Tabla 2. El registro de las nubes de puntos obtenidas en campo se realizó con el programa Cyclone Register BLK360 mediante la correspondencia de las dianas artificiales entre escaneos (Figura 1b y c). En los casos donde las dianas artificiales no se visualizaban correctamente se empleó la alineación visual. Se recortaron las parcelas, eliminaron los elementos extraños (objetos en movimientos, artefactos) y optimizaron los enlaces entre escaneos, atendiendo su solapamiento, fuerza y error de conjunto.

Tabla 1. Descripción de las parcelas muestreadas considerando el inventario tradicional. Número de árboles, edad aproximada de la parcela, diámetro normal (DBH) medio, máximo y mínimo, altura (H) media, máxima y mínima, densidad de árboles (D), área basimétrica (AB), forma de la parcela (cuadrada o rectangular) y otras consideraciones estructurales.

Parcela	V1	V2	V3	V4	V5	V6	N2	N3	N4
Nº árboles	205	576	375	310	210	111	478	259	126
Clase de	20-40	40-60	60-80	80-100	100-120	120-140	40-60	60-80	80-100



edad (años)									
DBH medio (m)	0.25	0.23	0.28	0.35	0.38	0.43	0.23	0.39	0.45
DBH máx. (m)	0.56	0.47	0.52	0.66	0.69	0.61	0.44	0.65	0.64
DBH mín. (m)	0.08	0.08	0.13	0.18	0.23	0.22	0.11	0.10	0.33
H media (m)	17.67	20.80	21.07	26.84	24.60	25.60	17.36	25.56	22.98
H máx. (m)	29.60	29.30	26.30	32.40	31.90	33.00	21.10	31.10	27.20
H mín. (m)	7.30	9.20	12.10	2.70	18.90	18.90	13.00	7.00	19.40
D (pies/ha)	410	1152	750	620	420	222	956	518	240
ÁB (m2/ha)	44.86	102.25	95.93	121.83	99.64	65.81	80.34	125.47	80.68
Forma de la parcela	Rect.	Rect.	Rect.	Rect.	Cuad.	Rect.	Rect.	Cuad.	Cuad.
Compleji dad estructur al	Alta	Alta	Alta	Baja	Baja	Baja	Alta	Baja	Baja

Tabla 2. Características de las dos técnica de posicionamiento de las dianas para el escaneo con TLS de parcelas forestales.

	Dianas por toda la parcela	Dianas en cadena entre escaneos		
Tiempo completo	3-5 horas	3-5 horas		
Material	20-25 dianas artificiales	8 dianas artificiales		
Mano de obra	3 personas	2 personas		
Gasto de batería del escáner	Menor	Mayor		
Complejidad de la parcela	Solo con poca densidad de pies y matorral, sin problemas de oclusión	Muy recomendables en alta densidad de pies y matorral, con problemas de oclusión.		







Figura 1. Esquemas de los métodos de escaneo considerando la posición de dianas evaluadas. Los círculos enumerados son los escaneos y los círculos coloreados son las dianas esféricas. A la derecha se muestra la digitalización de un croquis de escaneo con las dianas artificiales repartidas por la parcela y elementos orientativos. A la izquierda se muestra el esquema de distribución y movimiento de las dianas entre los escaneos en cadena propuesta por WILKES et al. Cada color de diana corresponde a un conjunto de dianas diferente.





Figura 2. Fotografía de a) una parcela de estudio con una diana artificial, b) vista dentro de la nube de puntos de la parcela registrada utilizando el reconocimiento de dianas (dianas reconocidas por el programa en verde), y c) vista superior de la nube de puntos registrada. Los círculos azules corresponden a los escaneos registrados y las líneas a los enlaces creados entre dichos escaneos, cuyos colores indican la calidad del escaneo en cuanto a su error y solape. Autor: Carolina Caballero.

Tabla 3. Características técnicas de las nubes de puntos y método de posicionamiento de las dianas para el escaneo de las parcelas. "Cadena" se refiere al método de dianas entre los escaneos en cadena y "toda" al método de repartir las dianas por toda la parcela.

Parcela	V1	V2	V3	V4	V5	V6	N2	N3	N4
Nº escaneos	18	15	18	18	16	18	18	16	16
Nº puntos (millones)	180	148	175	172	145	158	201	153	123
Tamaño de archivo (GB)	3.36	2.76	3.28	3.22	2.72	2.95	3.76	2.86	2.30
Método de posiciona miento de dianas	Toda	Toda	Toda	Toda	Cadena	Toda	Cadena	Cadena	Cadena

Para el procesado de las nubes de puntos y obtención de información, se exportaron al programa de libre acceso Cloud Compare como una nube de puntos de origen único. En este se georreferenciaron las parcelas escaneadas empleando las coordenadas tomadas por el GPS y se limpiaron los puntos atípicos con la función "filtro SOR". La segmentación de la nube de puntos, identificación de los árboles y estimación de variables dendrométricas se realizó con la extensión de este programa 3DFin (LAINO et al., 2024). Esta herramienta mide el diámetro a la altura del pecho (DBH) y altura individual (H) de cada árbol que cumple ciertos requisitos de calidad, así como la posición de todos los árboles identificados y sus



diámetros a diferentes alturas. Para ello se pueden modificar tres niveles de parámetros: básicos, avanzados y expertos. Para este trabajo se ha probado a modificar los parámetros hasta el nivel experto para obtener un resultado lo más preciso posible, según las indicaciones aportadas por los autores disponible en https://github.com/3DFin/3DFin_Tutorial/. Se ha empleado los mismos parámetros para todas las parcelas (Tabla 4). Los resultados se presentaron archivo XLSX con las estimaciones realizadas, así como valores de calidad, y un archivo con los valores de los parámetros. Además, se genera un conjunto de nubes de puntos que permiten evaluar la actuación realizadas por el programa (modelo digital del terreno, ejes de los árboles detectados, distancia de la nube de punto al eje más cercano, secciones dibujadas a lo largo del eje con su calidad, etc.). Para comparación de las mediciones en campo con las obtenidas mediante TLS se emparejaron los árboles de ambas bases de datos. Se compararon las coordenadas (x, y) de ambos métodos de forma visual en Cloud Compare, inspeccionando visualmente las nubes de puntos resultantes para anotar aquellos árboles que había segmentado por duplicado o que 3DFin había detectado pero sin calcular su DBH y altura.



Figura 3. Flujo de trabajo empleado para la obtención de nubes de puntos de entornos forestales con TLS en este trabajo.

Tabla 4. Valores de los parámetros empleados, iniciales y definitivos (tras realizar múltiples pruebas), en la obtención de información con el programa 3DFin. Tan solo se muestran los valores de los parámetros a nivel experto que se han modificado.

Parámetros básicos	Stripe Upper Limit (m)	Stripe Lower Limit (m)	Pruning Intensity	Cloth resolution (m)
Inicial	3.5	0.5	3	0.5
Definitivo	3	0.5	3	0.5



Parámetros avanzados	Expected maximun diameter (m)	Steam serch diameter (m)	Lowest section (m)	Highest section (m)	Distance between sections (m)	Section width (m)	
Inicial	1	2	0.3	25	0.2	0.05	
Definitivo	1	2	0.5	30	0.1	0.05	
Parámetros expertos	Identificación del tronco		Extracción	del tronco e indivi	dualización		
(x,y) voxel resolut.	(z) voxel resolut.	(x,y) voxel resolut.	(z) voxel resolut.	Voxel resolut. for height	Max. vertical deviation		
Inicial	0.02	0.02	0.035	0.035	0.3	25	
Definitivo	0.01	0.01	0.01	0.01	0.1	20	
Parámetros expertos	Computing sections	Drawing circles and axis		Height n	ormaliz.		
	Points within section	Máx. point distance	Nº of sector	N° of occupied sectors	Points to draw a circle	(x,y) voxel resolut.	
Inicial	80	0.02	16	9	200	0.15	
Definitivo	50	0.05	32	8	100	0.1	

La detección de los árboles se evaluó calculando el porcentaje de error de omisión (completeness), entendidas como la cantidad de árboles del inventario detectados por el TLS, y el porcentaje del error de comisión (correctness), entendido como la cantidad de árboles detectados por el TLS que corresponden al inventario. Se calcularon mediante las fórmulas: completeness (%) = $(n_{mat}/n_{ref})*100$ y correctness (%) = $(n_{mat}/n_{det})*100$, donde n_{mat} es el número de árboles detectados por el TLS. Para el cálculo de estos valores se descartaron los árboles repetidos y con menos de 10 centímetros de DBH detectados por el 3DFin.

Para analizar la precisión de las estimaciones del DBH y altura del TLS se calculó el error medio cuadrático (RMSE) y el sesgo de cada parcela, así como el coeficiente de correlación (R²). El RMSE indica la desviación de las estimaciones a nivel del árbol individual, mientras que el sesgo indica el error sistemático o desviación de la media de las estimaciones con respecto al valor real (medición en campo). El RMSE y sesgo (bias) se calcularon mediante las fórmulas:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (y_i - \hat{y}_i)^2}$$
$$Bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (y_i - \hat{y}_i)$$

Donde n son el número de mediciones, y_i es la medición en campo tomada de referencia, \hat{y}_i es la estimación de la medición por parte del TLS. Para identificar la magnitud de estas métricas, se calcularon el RMSE y sesgo como porcentaje de las mediciones de referencia: RMSE (%) = (RMSE/ \bar{y}) *100 y Bias (%) = (Bias/ \bar{y}) *100,



donde \bar{y} es la media de las mediciones de referencia.

Para analizar el posible efecto de la estructura de la parcela sobre la detección de árboles y precisión de la estimación del TLS, se han categorizado las parcelas en función de su complejidad estructural, de forma similar a LIANG et al. (2018) se estableció como complejidad alta aquellas parcelas donde la densidad de pies mayores (más de 900 pies por hectárea) y/o de regenerado (parcela V1) es alta y como complejidad baja aquellas donde la densidad es baja (menor a 600 pies por hectárea) y la distribución de los pies es homogénea (Tabla 1).

En este protocolo no se han realizado escaneos exteriores a la parcela, dejando una distancia media entre escaneos y el borde de la parcela de 12 m. Para ver el posible efecto que tiene en la segmentación y la precisión de las estimaciones la posición de los árboles respecto a límite de la cuadrícula de los puntos de estimación, se han categorizado los árboles de las parcelas en 1) árboles entre escaneos, 2) árboles en la franja de 0 a 7,5 m de distancia a los escaneos, y 3) árboles en la franja de distancia a los escaneos desde 7,5 a 12 m. Se han comparado como se modifica la detección y precisión de las estimaciones en las diferentes categorías de posición con respecto a los escaneos y borde de parcela. **3.Resultados**

El ajuste de los parámetros de la herramienta 3DFin para la obtención de unos resultados óptimos posibles se resumen en la **Tabla 4**. En esta se muestra los valores iniciales que presenta el programa para los parámetros (siendo el mejor ajuste para la mayoría de situaciones) y los valores definitivos obtenidos tras múltiples modificaciones de los parámetros, usados en todas las parcelas. La decisión de elección de los parámetros se tomó en base a los criterios presentados en la **Tabla 5**. En la mayoría de las parcelas el ajuste definitivo supuso una disminución en el número de árboles duplicados, un aumento de los criterios de calidad de las secciones por árbol detectadas y un aumento del porcentaje de árboles detectados en los que el programa pudo calcular su DBH. Además, la detección de los árboles de DBH menor a 10 cm también aumentó.

Tabla 5. Criterios de calidad calculados del 3DFin con los conjuntos de parámetros para establecer la idoneidad de los resultados. "DBH < 0.1 m" son los árboles detectados con un DBH menor a 0.1 metros, "Nº repetidos" son los árboles que el 3DFin ha calculado dos veces, "% calidad" es el porcentaje de las secciones por árbol que el programa da una buena calidad y "% detectados con DBH" es el porcentaje de árboles detectados con respecto al total en los que el programa ha podido calcular el DBH.

Parcela		V1	V2	V3	V4	V5	V6	N2	N3	N4
Nº DBH	Inicial	45	12	0	0	0	3	0	0	0
< 0.1 m	Definitiv o	68	15	0	0	0	3	0	0	0
Nº	Inicial	114	50	3	6	11	10	21	3	0
repetid os	Definitiv o	95	30	4	52	11	5	18	5	0
%	Inicial	28%	51%	75%	76%	92%	81%	72%	81%	77%
calidad	Definitiv o	32%	53%	81%	90%	96%	81%	72%	91%	92%
%	Inicial	73%	67%	72%	77%	78%	72%	80%	70%	60%



detecta	Definitiv	98%	78%	53%	97%	77%	85%	84%	87%	82%
dos con	0									
DBH										

La detección media con la parametrización óptima de 3DFin de los árboles ha sido de un 84.78% de completeness y un 76.77% de correcteness (Tabla 6). La baja tasa de detección en la parcela N4 se debe a que se realizó una corta entre el inventario de campo y el escaneo con TLS, mientras que el alto número de pies detectados por el escáner pero que no tienen correspondencia en el inventario de campo en la parcela V1 es debida a la incorporación de pies mayores en los últimos inventarios de los que no se dispone de algunas mediciones de campo. Las estimaciones del DBH por parte del TLS y el 3DFin tienen una buena correlación con las mediciones tradicionales de inventario, con un coeficiente de determinación (R²) de 0.9 para el monte de Valsaín y de 0.88 para el monte del Navafría (Figura 4.a). En el monte de Valsaín la estimación de la altura tiene un ajuste con un R2 de 0.91, mientras que en el monte de Navafría presenta un peor ajuste, con un R2 de 0.58 (Figura 4.b), debido a la homogeneidad de la masa. A nivel de parcela, el RMSE promedio del DBH ha sido de 4.55 cm (14.19%), con un el sesgo medio negativo de 2.5 cm (7.61%). La altura tiene un RMSE promedio de 2.2 m (10.69%) y un sesgo promedio de 0.7 m (1.04%). Las diferencias entre la precisión de las estimaciones del TLS en función de la complejidad estructural de la parcela se muestran en la Figura 5.

Tabla 6. Resultados de la evaluación de la captura de datos en la detección de los árboles y obtención del diámetro a la altura del pecho (DBH) y altura con TLS, empleando los parámetros a nivel experto en 3DFin.

Parcela	V1	V2	V3	V4	V5	V6	N2	N3	N4
complete ness (%)	84.34	78.84	92.35	77.70	94.29	89.91	91.84	93.44	60.32
correcten ess (%)	34.08	74.87	90.37	82.29	80.82	73.13	73.53	91.32	90.48
				D	BH				
RMSE (cm)	5.07	3.65	2.99	5.64	4.50	4.56	4.26	4.54	5.73
RMSE (%)	20.09	15.49	10.66	16.09	11.69	10.65	18.73	11.87	12.44
sesgo (cm)	-1.94	-0.53	-1.94	-3.33	-3.25	-3.46	-2.77	-3.02	-2.57
sesgo (%)	-7.69	-2.24	-6.89	-9.50	-8.45	-8.07	-12.15	-7.89	-5.59
	-		-	Alt	ura	-	-	-	
RMSE (m)	5.64	2.64	1.63	2.81	1.37	1.48	1.06	1.47	1.75
RMSE (%)	33.90	13.40	8.11	10.04	5.49	5.92	6.19	5.74	7.41
sesgo (m)	1.04	1.24	0.96	-1.28	-0.43	0.37	0.25	-0.08	-0.70
sesgo (%)	5.87	5.93	4.58	-4.80	-1.74	1.46	1.44	-0.31	-3.07





Figura 4. Correlación de a) los diámetros a la altura del pecho (DBH) y b) alturas, y línea de regresión del modelo linear de cada monte, donde el naranja es el monte de Valsaín y el azul es el monte de Navafría.





La detección y precisión de las estimaciones del TLS en función de las categorías de posición de los árboles con respecto a los escaneos y el borde de la parcela se muestra en la *Figura 6*. En estos se ve una disminución general en el porcentaje (sector) de detección a 1.3 metros de altura, correspondiente al DBH, y en el porcentaje de árboles del inventario detectados por el TLS en las franjas más lejanas a los escaneos, siendo notablemente inferior en la última franja. Por otro lado, el RMSE para el DBH no muestra diferencias significativas entre las tres categorías de posición respecto al escáner.





Figura 6. Resultados de detección y error por posición de los árboles con respecto al borde. En el eje horizontal muestra las categorías de posición de los árboles con respecto a los escaneos y el borde de parcela. Las barras corresponden al porcentaje medio de ocupación del sector a 1.3 metros de altura, correspondiente al DBH, para cada parcela y la línea corresponde al porcentaje de detección media (árboles del inventario detectados por el TLS). En la zona inferior del gráfico se muestra los valores medios de RMSE (m) del DBH.

4.Discusión

La tecnología LiDAR terrestre avanza rápidamente, por lo que adaptar y mejorar las metodologías para su óptimo uso es imprescindible. En nuestro caso, se ha comprobado que la metodología en cadena propuesta por WILKES et al. (2017) resulta más adecuada que el uso de dianas fijas en masas forestales, especialmente en parcelas en las que la densidad de arbolado, regenerado y/o sotobosque eran tan alta que imposibilitaban la visión de las dianas desde los puntos de escaneo más alejados, distribuyendo el esfuerzo de replanteo de las dianas a lo largo de toda la jornada de escaneo y reduciendo el peso del material necesario. El mayor inconveniente es un mayor gasto de batería del escáner al permanecer encendido mientras se distribuyen las dianas.

Se ha mostrado una buena detección de los árboles por parte del TLS, incluso en aquellas parcelas más complejas, sin una diferencia entre las dos categorías. Esto denota que el método multi-escaneo empleado ha conseguido una representación completa de las parcelas escaneadas. Esto se debe a que visualiza los árboles desde diferentes ángulos, lo que evita errores de omisión (WILKES et al., 2017; LIANG et al., 2018). Sin embargo, no es necesario que los árboles estén escaneados desde todos los ángulos para ser detectados. Los árboles dentro de la franja más cercana a los últimos escaneos (categoría 2) apenas han sufrido disminución de su detección, aunque sí ha disminuido el porcentaje (sector) de detección a la altura del DBH. En este caso la detección es buena hasta cierta distancia del escáner, ya que en la franja de árboles posicionados a más de 7.5 m (categoría 3) la detección ha disminuido a un 20%. Realizar escaneos fuera de la parcela supone un incremento en el tiempo y esfuerzo de escaneo, así como tamaño de la nube de



puntos, lo que reduciría la optimización en la toma y procesamiento de datos. Así, en caso de no realizar dicho escaneo, la distancia entre el límite de la cuadrícula de puntos de escaneo y el borde de la parcela debe ser menor de 7.5 m para obtener una buena detección de los árboles.

En cuanto a la estimación del DBH, la correlación entre el DBH medido en campo y estimado con TLS ha sido superior a 0.9, obteniendo un RMSE entre el 10% y 20%, similares a los descritos en LIANG et al. (2018) pero superiores a los descritos por LAINO et al. (2024) Se ha visto una infraestimación sistemática de los valores de DBH mayor en las parcelas de baja complejidad. La estimación del DBH por parte del TLS siempre va a tener un cierto error debido al registro de los escaneos del TLS, que puede introducir pequeñas deformaciones en la nube de puntos que afectarían a las relaciones espaciales de los puntos que representan los tallos (LAINO et al., 2024). A diferencia del trabajo de LIANG et al. (2018), no se ha visto una diferencia en la precisión de la estimación del DBH respecto a la complejidad de la parcela, denotando que este método es preciso para bosques complejos estructuralmente. Tampoco se han visto diferencias entre las clases de posición con respecto al borde de la cuadrícula, por lo que, para la distancia máxima posible entre un árbol y un escaneo de 12 metros, no se pierde precisión de estimación del DBH.

La estimación de la altura ha sido más precisa de lo esperado. La propia oclusión por parte de la parte inferior de las copas de los árboles dificulta obtener retornos de la parte superior de la copa con TLS; por lo tanto, las medidas de altura de los árboles de TLS comúnmente se subestiman, y la situación empeora cuando la condición del rodal se vuelve más compleja (LIANG et al., 2018). Sin embargo, hemos obtenido un RMSE entre el 6% y 14%, inferior a los resultados de LIANG et al. (2018) y LAINO et al. (2024), a excepción del RMSE de la parcela V1 excepcionalmente grande. El progresivo aclarado del bosque hace que, a medida que los árboles crecen en diámetro y longitud, se reduce la densidad de las parcelas. Las parcelas más jóvenes (20-40 años, V1) tienen un regenerado denso que obstaculiza la visibilidad, pero no se representa en el inventario (el diámetro mínimo considerado es de 10 centímetros). Al pasar a la siguiente clase de edad (40-60 años, V2 y N2), este regenerado pasa a formar parte de los pies mayores considerados en el inventario, aumentando la densidad de la parcela, que disminuirá progresivamente hasta que se cierre el ciclo de corta. En la altura sí se ha visto diferencias entre los dos montes y categorías de complejidad estructural. El monte de Navafría tiene un coeficiente de correlación menor a nivel de parcela por la homogeneidad de la masa, pero le RMSE y el sesgo son menores en Navafría que en Valsaín como consecuencia de las claras intensas que reducen la densidad de la masa, aumentando la precisión en la determinación de la altura. En las parcelas de mayor complejidad hay una sobreestimación de la altura, que podría ser debida al solapamiento con las copas de árboles más altos, mientras en las parcelas de menor complejidad hay un menor error y una infraestimación de la altura.

El programa 3DFin (LAINO et al., 2024) ha resultado ser una herramienta muy útil para la obtención de variables dasométricas. Es una herramienta totalmente automática y no requiere un tiempo de procesado ni requerimientos computacionales muy elevados. La detección está cerca del 85% y la precisión en la estimación de diámetro y altura es precisa está en torno al 15% y por debajo del 10% respectivamente, infraestimando ligeramente el diámetro (sesgo en torno al 8%) y sobreestimando la altura en masas complejas, mientras que se infraestima



en masas regulares, a considerar en su posible aplicación para estimación de biomasa. Los resultados son muy completos y visuales, y ofrece criterios para evaluar su calidad de forma rápida. A pesar de necesitar cierto nivel de comprensión de su funcionamiento para manejar los parámetros expertos, sus diferentes niveles de ajuste y diseño intuitivo hacen que sea una herramienta sencilla de manejar. Además, el hecho de ser de acceso abierta y tener información detallada hace que tenga un gran potencial para su uso a gran escala en la realización de sistemática de mediciones forestales.

5. Conclusiones

En los últimos 20 años se ha desarrolla y sigue desarrollando la tecnología TLS, reduciendo costos y tamaño, aumentando la calidad y sofisticación del análisis de datos dasométricos. Estos avances han conseguido que el TLS sea una herramienta útil para el inventario forestal y que su puesta en práctica, aunque progresiva, sea una realidad, como se pretende mostrar en este trabajo. La detección está cerca del 85% y la precisión en la estimación de diámetro y altura está en torno al 15% y por debajo del 10% respectivamente, demostrando que el TLS proporciona información precisa de la estructura forestal.

7. Agradecimientos

Este trabajo se ha financiado con el proyecto I101 WHATIF que cuenta con el apoyo de la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), financiado por la Unión Europea - NextGenerationEU, y con el proyecto PID2020-119204RB-C21 Seguimiento y evaluación de la provisión de servicios ecosistémicos de las masas forestales en gradientes de gestión: diversidad vulnerabilidad y respuesta al cambio climático, que cuenta con el apoyo del Ministerio de Ciencia e Innovación. **6.Bibliografía**

AITKEN, S. N.; YEAMAN, S.; HOLLIDAY, J. A.; WANG, T.; CURTIS-MCLANE, S.; 2008. Adaptation, migration or extirpation: climate change outcomes for tree populations. Evol Appl. 1. 95–111

ALBERDI, I.; NUNES, L.; KOVAC, M.; BONHEME, I.; CAÑELLAS, I.; REGO, F. C.; DIAS, S.; DUARTE, I.; NOTARANGELO, M.; RIZZO, M.; GASPARINI, P.; 2019. The conservation status assessment of Natura 2000 forest habitats in Europe: capabilities, potentials and challenges of national forest inventories data. Ann For Sci. 76-34

CALDERS, K.; ADAMS, J.; ARMSTON, J.; BARTHOLOMEUS, H.; BAUWENS, S.; BENTLEY, I. 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.; TERRYN, L.; WILKES, P.; VERBEECK, H.; 2020. Terrestrial laser scanning in forest ecology: Expanding the horizon. Remote Sens Environ. 251. 112102.

CASTORENA, J.; DICKMAN, L.T.; KILLEBREW, A.J.; GATTIKER, J.R.; LINN, R.; LOUDERMILK, E.L.; 2025. ForestAlign: Automatic forest structure-based alignment for multi-view TLS and ALS point clouds. Science of Remote Sensing. 100194.

CRECENTE. F.; PASALODOS-TATO, M.; ALBERDI. I.; HERNÁNDEZ. L.; IBÁÑEZ, J.; CAÑELLAS, I.; 2015. Assessing and modelling the status and dynamics of deadwood through national forest inventory data in Spain. For Ecol Manag. 360. 297-310

LAINO, D.; CABO, C.; PRENDES, C.; JANVIER, R.; ORDONEZ, C.; NIKONOVAS, T.; DOERR, S.; CRISTINA, S.; 2024. 3DFin: a software for automated 3D forest



inventories from terrestrial point clouds. Forestry: An International Journal of Forest Research. 97. 479-496.

Liang, X.; Hyyppä, J; Kaartinen, H.; Lehtomäki, M.; Pyörälä, J.; Pfeifer, R.; Holopainen, M.; Brolly, G.; Francesco, P.; Hackenberg, J.; Huang, H.; Jo, H.; Katoh, M.; Liu, L.; Mokroš, M.; Morel, J.; Olofsson, K.; Poveda-Lopez, J.; Trochta, J.; Wang, D.; Wang, J.; Xi, Z.; Yang, B.; Zheng, G.; Kankare, V.; Luoma, V.; Yu, X.; Chen, L.; Vastaranta, M.; Saarinen, N.; Wang, Y.; 2018. International benchmarking of terrestrial laser scanning approaches for forest inventories. ISPRS J Photogramm Remote Sens. 144. 137-179.

Menéndez-Miguélez, M.; Madrigal, G.; Sixto, H.; Oliveira, N.; Calama, R.; 2023. Terrestrial laser scanning for non-destructive estimation of aboveground biomass in short rotation poplar coppices. Remote Sens. 15. 1942.

MONTES, F.; 2004. Estudio de la relación entre selvicultura y la diversidad estructural en los montes *Pinar de Valsaín* y *Pinar de Navafría*. Tesis doctoral. Escuela de Montes. Universidad Politécnica de Madrid.

RODRÍGUEZ-GARCÍA, C.; MONTES, F.; RUIZ, F.; CAÑELLAS, I.; PITA, P.; 2014. Stem mapping and estimating standing volume from stereoscopic hemispherical images. Eu J Forest Res. 133. 895-904.

THUILLER, W.; ALBERT, C.; ARAÚJO, M. B.; BERRY, P. M; CABEZA, M.; GUISAN, A.; HICKLER, T.; MIDGLEY, G. F.; PATERSON, J.; SCHURR, F. M.; SYKES, M. T.; ZIMMERMANN, N. E.; 2008. Predicting global change impacts on plant species' distributions: future challenges. Perspect Plant Eco. 9. 137–152.

WARDIUS, Y.; HEIN, S.; 2024. Terrestrial laser scanning vs. manual methods for assessing complex forest stand structure: a comparative analysis on plenter forests. *Eur J Forest Res.* 143. 635–649.

WILKES, P.; LAU, A.; DISNEY, M.; CALDERS, K.; BURT, A.; GONZALEZ DE TANAGO, J.; BARTHOLOMEUS, H.; BREDE, B; HEROLD, M.; 2017. Data acquisition considerations for Terrestrial Laser Scanning of forest plots. Remote Sens Environ. 196. 140-153.