



8º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

La **Ciencia forestal** y su contribución a
los **Objetivos de Desarrollo Sostenible**



8CFE

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales

Cataluña | Catalunya - 27 junio | juny - 1 julio | juliol 2022

ISBN 978-84-941695-6-4

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Organiza



Estimación automática de los parámetros de forma de árbol individual en masas forestales a partir de nubes de puntos tomadas con escáner láser terrestre (TLS)

PRENDES PÉREZ, C.¹, CANGA LÍBANO, E.¹, ORDOÑEZ GALÁN, C.³, MAJADA GUIJO, J.¹, CABO GÓMEZ, C.^{2,3}

¹ Área de Geomática. Fundación Centro Tecnológico y Forestal de la Madera de Asturias (CETEMAS).

² Facultad de Ciencia e Ingeniería. Universidad de Swansea.

³ Departamento de Explotación y Prospección de Minas. Universidad de Oviedo

Resumen

La rectitud y la inclinación de los fustes influyen claramente en la calidad de la madera de *Pinus pinaster*, pero no son variables medidas sistemáticamente en los inventarios tradicionales, debido a la dificultad y subjetividad de su estimación. En este estudio se desarrolló y aplicó una metodología para estimar la rectitud e inclinación de los troncos a nivel de árbol individual en masas forestales y se compararon los resultados con los obtenidos por técnicas tradicionales (clasificación visual de los árboles en categorías de rectitud e inclinación). Para ello, se utilizaron datos tomados con un escáner láser terrestre (TLS) de una parcela de mejora genética de *Pinus pinaster* compuesta por individuos de distintas procedencias y familias de medios hermanos que presentan diferentes caracteres morfológicos. A partir de estos datos, se obtuvo de forma automática una medición objetiva de la rectitud y la inclinación de cada individuo, analizando cada tronco por secciones definidas por su centro y radio. Los resultados muestran que existe un problema de mala clasificación de los árboles cuando se usan técnicas tradicionales. La metodología constituye una alternativa a las técnicas tradicionales para la obtención de medidas precisas de la rectitud e inclinación de los troncos.

Palabras clave

Metodología, diámetros, forma del tronco, productos forestales.

1. Introducción

La forma del tronco es un factor muy relevante que debe ser considerado en la gestión selvícola, ya que está íntimamente relacionado con la calidad de la madera y tiene una fuerte influencia en el porcentaje de volumen rentable, es decir, en la cantidad de volumen que se puede aprovechar en el aserradero con respecto al volumen total de la troza (DEL RÍO et al., 2004). En consecuencia, condiciona profundamente el uso que se le puede dar a la madera y su sostenibilidad económica.

De entre todas las variables de forma, la rectitud y la inclinación tienen gran importancia tanto desde una perspectiva científica como técnica (BENNETER et al., 2018; DEL RÍO et al., 2004; MACDONALD et al., 2009). La rectitud del fuste es importante porque condiciona enormemente el aprovechamiento de la madera y su aserrado. Más concretamente, la optimización del tronzado de los troncos requiere una determinación muy precisa de su forma que permita determinar los puntos de corte a lo largo del tronco y el volumen comercial de acuerdo con especificaciones particulares (LIANG et al., 2014). Además, la rectitud también es una variable muy importante en los ensayos de mejora genética de especies forestales donde la selección de las procedencias más rectas es la base para desarrollar un programa (MACDONALD et al., 2009). En el caso de la inclinación, su importancia radica en que influye en la calidad porque está directamente relacionada con la proporción madera de reacción que se genera en los troncos (BOSCHETTI et al., 2017; THIES et al., 2004). La madera de

reacción suele tener una densidad más alta, y aunque sus propiedades mecánicas no se reducen, sufre mayores deformaciones durante los procesos de secado y tiende a romperse más fácilmente, por lo que no es deseable para el aprovechamiento industrial de la madera (MURPHY, 2008).

La rectitud que tradicionalmente se define como la flecha máxima por cada metro de tronco (HAMNER et al., 2007) es el parámetro más común para medir la rectitud de un árbol. Sin embargo, no es el único, hay otros como la sinuosidad que también tienen gran interés. La sinuosidad se expresa como el cociente entre la línea (no necesariamente recta) que define el eje del tronco y la distancia euclíadiana (línea recta) entre sus extremos (DWIVEDI et al., 2019). En el caso de la inclinación, se define como la desviación angular del tronco con respecto a la vertical (GARMS et al., 2020).

A pesar de su importancia, en la mayoría de los casos no es posible o práctico medir estas variables en campo para cada árbol con métodos tradicionales, ya que la medición de árboles individuales es costosa y requiere mucha mano de obra (HYYPÄ et al., 2020). Los llamados métodos tradicionales tienen diferentes grados de sofisticación, que van desde clasificaciones visuales realizadas por uno o más observadores que agrupan los árboles según categorías predefinidas (muy comunes en los programas de mejora genética) a los más evolucionados que utilizan medidas (hechas con calibres, cintas métricas e hipsómetros) principalmente basadas en la desviación o inclinación del eje del árbol (HAMNER et al., 2007). Incluso en los métodos que utilizan mediciones de campo, los resultados están sujetos a la interpretación del observador y profundamente influenciados por su experiencia y criterio, así como por las características del rodal.

El uso de técnicas de teledetección, y más concretamente del TLS, puede ser de gran utilidad en la estimación de la forma del tronco. Este tipo de escáneres aportan una representación tridimensional de gran detalle de la estructura de los árboles (LIANG et al., 2018) y además el hecho de que los datos se recopilen desde el suelo, hace que sean especialmente adecuados para el estudio de los perfiles del tronco. Presumiblemente, TLS será una tecnología fundamental en los inventarios forestales en un futuro cercano (CALDERS et al., 2020) y hará que la medición automática de variables de forma como la rectitud y la inclinación sea posible en los inventarios rutinarios con muy poco esfuerzo por parte de los operarios. Para que esto sea una realidad rentable y sencilla, es fundamental disponer de metodologías de procesamiento de la nube fáciles de usar y hechas con software libre que permitan extraer mediciones de las variables forestales de interés (MASUDA et al., 2021; MOLINA-VALERO et al., 2020).

2. Objetivos

El objetivo de este estudio fue doble: (i) desarrollar una metodología que permita medir la rectitud (flecha máxima y sinuosidad) y la inclinación de los fustes a nivel de árbol individual y de forma automática, a partir de datos tomados con un TLS; (ii) comparar los resultados obtenidos con medidas hechas mediante métodos tradicionales (clasificación visual de los fustes en clases predefinidas de rectitud e inclinación).

3. Metodología.

3.1 Toma de datos

3.1.1 Características de la parcela de estudio

El área de estudio está ubicada en Asturias y se caracteriza por tener un clima oceánico, con abundantes lluvias durante todo el año y temperaturas suaves. Los suelos son silíceos. La parcela donde se realizó el estudio pertenece a una red de ensayos del programa Nacional de Mejora Genética de *Pinus pinaster*, especie que muestra especial tendencia a la tortuosidad. El terreno es irregular con mucha pendiente (> 60%) y presencia de diferentes especies de arbustos como *Ulex*,

Ericas, Pteridium entre otros (Figura 1A) lo cual la convierte en una zona exigente para la metodología. Se plantó en 2005 siguiendo un diseño experimental de cuatro bloques al azar, donde se sembraron 225 familias en hileras de cuatro árboles; algunas familias procedían de la misma región donde se estableció la plantación (Asturias), y algunas de diferentes lugares dentro de Italia, Francia, España, Portugal y el norte de África. El número actual de árboles es de 408 (806 pies/ha).

3.1.2 Datos TLS

Adquisición y preprocesado

La adquisición de datos se llevó a cabo en noviembre de 2018 utilizando un TLS FAROFocus3D (Faro, 2021) (Figura 1C). Fueron necesarios 24 escaneos para garantizar una cobertura completa y minimizar el efecto de las occlusiones. Con el objetivo de fusionar las nubes de puntos de los escaneos individuales en un mismo sistema de coordenadas, se utilizaron esferas de poliestireno de 25 cm de diámetro fijadas a un jalón (Figura 1B). Además, se midió en campo la posición de las esferas mediante GNSS (*Global Navigation Satellite System*), para conseguir que la nube de puntos unificada tuviera coordenadas absolutas.

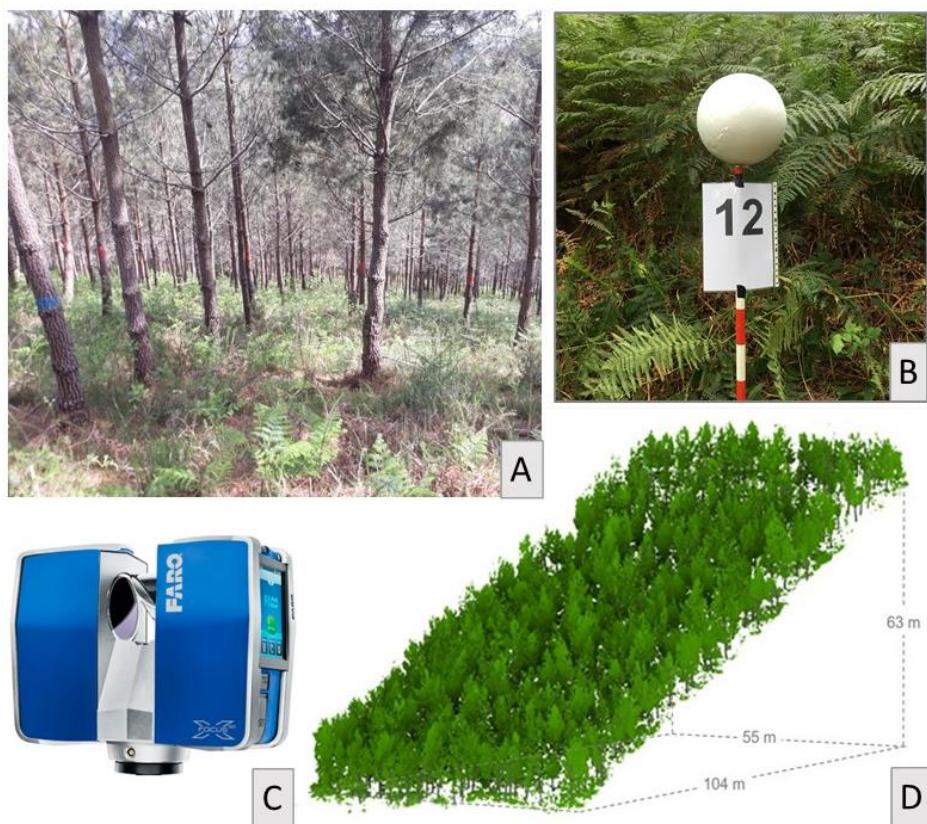


Figura 1. A) Masa de *Pinus pinaster* con sotobosque dentro de la parcela de estudio B) Esfera de poliestireno utilizada para la georreferenciación de la nube de puntos C) Escáner FARO Focus utilizado para el escaneo de la parcela de estudio D) Representación tridimensional del tamaño y la pendiente de la parcela de estudio.

La nube de puntos (Figura 1D) se analizó con la metodología para la estimación automática de los diámetros a lo largo del tronco y la altura total descrita en (CABO et al., 2018ab) y (PRENDES et al., 2021). Como resultado, para cada árbol se obtuvieron de forma automática las medidas de los diámetros de las secciones espaciadas 20 cm (entre 0.5 sobre el suelo y 4.9 m) así como sus centros (definidos por las coordenadas X, Y, Z) (Figura 2A).

Algunos de los árboles no tenían el rango completo de secciones debido principalmente a que: (i) el número de puntos en las secciones fue insuficiente para realizar el ajuste del círculo (ii) las secciones ajustadas por la metodología presentaban anomalías (ver secciones rosas en Figura 2A). En ese sentido, la metodología incluye varios filtros para detectar dichas anomalías de forma automática (CABO et al., 2018a; PRENDÉS et al., 2021) por lo que las secciones potencialmente incorrectas son marcadas para su revisión por un operador humano que verifica si el ajuste es correcto, o en caso de que la metodología no haya podido ajustar un círculo, si es posible lo ajusta manualmente (Figura 2B).

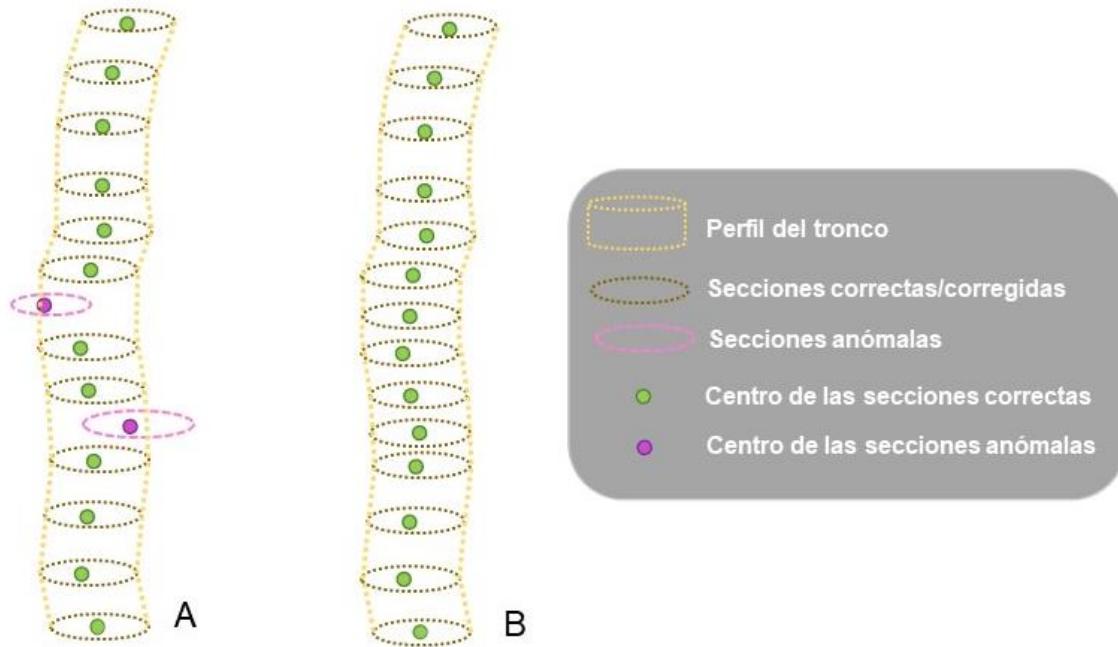


Figura 2. A) Secciones del tronco definidas por su centro (X , Y , Z) y radios calculados automáticamente por el algoritmo presentado Cabo et al. (2018a) y Prendes et al. (2021). En rojo las secciones etiquetadas como anómalas por el algoritmo. B) Secciones del tronco después de la corrección de los casos anómalos.

3.1.3 Datos de inventario

Paralelamente a la adquisición de datos de TLS, se midió el diámetro a la altura del pecho (DBH) en el campo con una forcipula, con precisión de 1 mm, y la altura total (h), con precisión de 10 cm, utilizando un hipsómetro digital (Vertex IV 360°). Como complemento a estos datos de inventario, todos los troncos de árboles dentro de la parcela también se geoposicionaron usando el mismo GNSS que se usó para las esferas TLS y una estación total. Esto permite relacionar los árboles inventariados con los de la nube de puntos, por lo que es posible realizar comparaciones entre las dos fuentes de datos. El promedio de DBH y h para la parcela fue de 17,6 cm y 10,20 m respectivamente.

Con respecto a la realización de inventarios de variables de forma en el campo (como se menciona en la Introducción) en los programas de mejora genética de árboles, se han utilizado ampliamente como criterios de selección a lo largo de los años las clasificaciones visuales que agrupan los árboles según categorías predefinidas para la evaluación de la rectitud y de la inclinación del tronco. En este estudio, ambas variables fueron evaluadas visualmente a nivel de árbol individual por un observador de campo utilizando la clasificación propuesta por DEL RIO et al. (2004) para *Pinus pinaster* que se detalla en la Tabla 1.

Tabla 1. Escala de valores utilizada como referencia para la medición de la rectitud y la inclinación en campo.

CATEGORÍA	RECTITUD	INCLINACIÓN
1	Recto	Inclinación no apreciable a simple vista
2	Curvado en la zona intermedia o basal menos de dos veces el dbh	Inclinación apreciable de hasta 15° con respecto a la vertical
3	Curvado en la zona intermedia o basal más de dos veces el dbh	Inclinación mayor de 15° con respecto a la vertical

3.2 Variables de forma a partir de datos TLS

3.2.1 Metodología de estimación

Los centros de las secciones del tronco de cada árbol son los únicos datos de entrada necesarios para la estimación de la rectitud y la inclinación. Cada coordenada (X, Y, Z) se almacena en una matriz independiente que tiene tantas filas como árboles en la parcela y tantas columnas como secciones. El flujo de trabajo para las estimaciones de rectitud e inclinación se articuló en un script escrito en Python, que permite la obtención automática de estas variables para cada árbol individual. En consecuencia, la metodología se puede aplicar en conjuntos de datos con diferentes características (especies, condiciones del rodal, pendiente...) de forma sencilla y rápida.

3.2.1.1 Rectitud

Para la evaluación de la rectitud se ha implementado en la metodología el cálculo de dos variables: flecha máxima y sinuosidad. A continuación, se detallan los pasos necesarios para su obtención.

Flecha máxima

Para cada árbol individual, se toma como referencia el segmento de línea recta que conecta el centro de la sección inicial y final del tronco. Luego, para cada sección se calcula su flecha, es decir, la distancia entre su centro y el segmento de línea recta (Figura 3A). Posteriormente se identifica la flecha máxima (en adelante F_{max}), así como la posición que ocupa en el tronco. Como se explicó en la Sección 2.1.2, algunos árboles no tienen datos a lo largo de todo el rango de altura (es decir, 23 secciones a lo largo de 4,4 m: de 0,5 a 4,9 m desde el suelo). En consecuencia, para esos árboles a los que les faltan secciones es necesario estandarizar la flecha máxima a la mayor altura obtenida para el conjunto de datos (en adelante, rango de altura estandarizado, es decir, 4,4 m), de forma que los resultados obtenidos para cada árbol individual dentro de la parcela sean comparables. Para ello, se consideró que los centros están distribuidos a lo largo de una circunferencia de radio R (Figura 3B). R se calcula mediante la fórmula que relaciona el radio de una circunferencia con la flecha de su arco y la longitud de la cuerda que conecta los dos extremos del arco. En este caso, la flecha es F_{max} y la cuerda es el rango de altura de cada árbol. A partir de estas dos variables, R se puede estimar mediante la eq.2. Una vez que se conoce el valor de R para cada árbol, se puede obtener la flecha máxima estandarizado (en adelante FE_{max}) para el rango de altura estandarizado (4,4 m), esta vez, sustituyendo F_{max} por FE_{max} y despejando su valor de la eq.2.

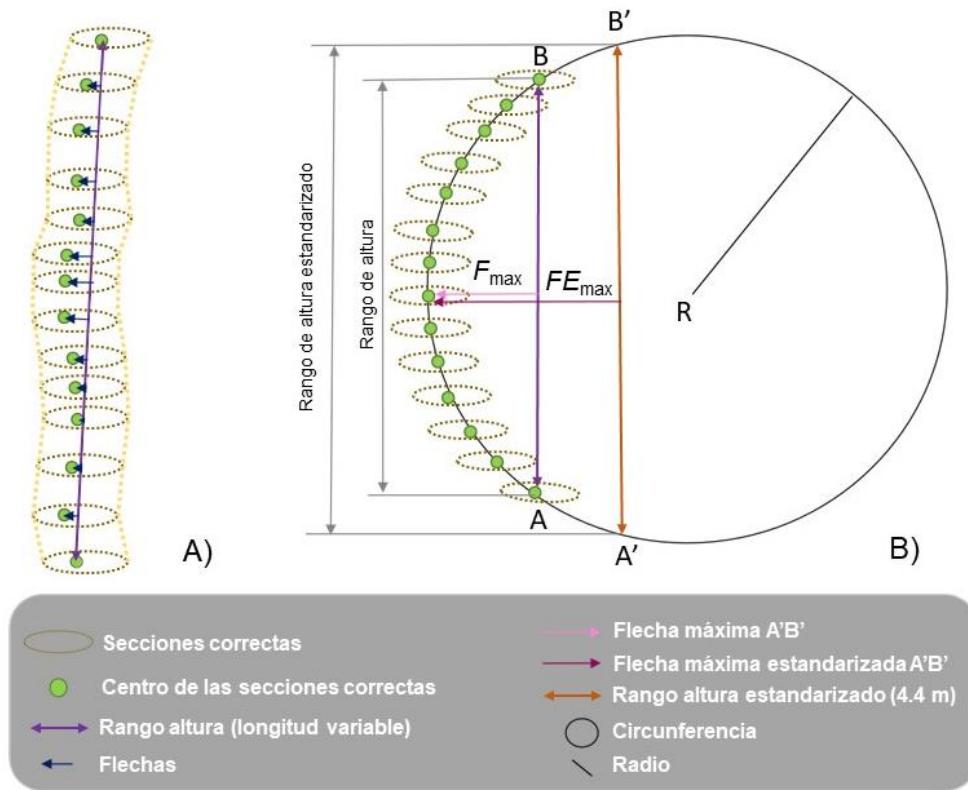


Figura 3. A) Secciones del tronco definidas por sus centros (X, Y, Z) y radio con las flechas (definidas por la distancia desde el centro de la sección al segmento de línea recta) de cada sección del tronco B) Cálculo de la flecha máxima estandarizada considerando que los centros de las secciones se distribuyen a lo largo de una circunferencia de radio R .

$$R = \frac{[F_{max} AB]^2 + [Rango altura/2]^2}{2 * [F_{max} AB]} \quad \text{eq.2}$$

Sinuosidad

En términos generales, la sinuosidad de una línea se calcula como el cociente entre su longitud y la longitud de una línea de referencia. En el caso de un árbol, esa línea de referencia es el segmento de línea recta que los extremos del tronco (rango altura), y su longitud (L) calculada como la suma de los segmentos rectilíneos que conectan los centros de las secciones del tronco (eq.3). Según esto, el valor mínimo de sinuosidad sería 1, valor que significaría ausencia total de sinuosidad.

$$\text{Sinuosidad} = \frac{L}{\text{Rango altura}} \quad \text{eq.3}$$

3.2.1.2 Inclinación

Se realizó un análisis de componentes principales (PCA) basado en las coordenadas X, Y, Z de los centros de las secciones. Cuando este tipo de análisis se aplica a una nube de puntos tridimensional, se crean 3 componentes principales (direcciones), que pueden considerarse como 3 ejes de coordenadas perpendiculares entre sí ($PC1, PC2$ y $PC3$) (Figura 3A). Por definición, $PC1$ se ubicará siguiendo la dirección con la mayor variación posible. Dado que los troncos de los árboles son objetos eminentemente lineales, la dirección del primer componente sigue la dirección del eje del tronco y, de acuerdo con ello, la inclinación o falta de verticalidad se calcula como en eq.4 (Figura 3B).

$$\alpha = \arctan \frac{|\Delta z|}{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}} \quad \text{eq.4}$$

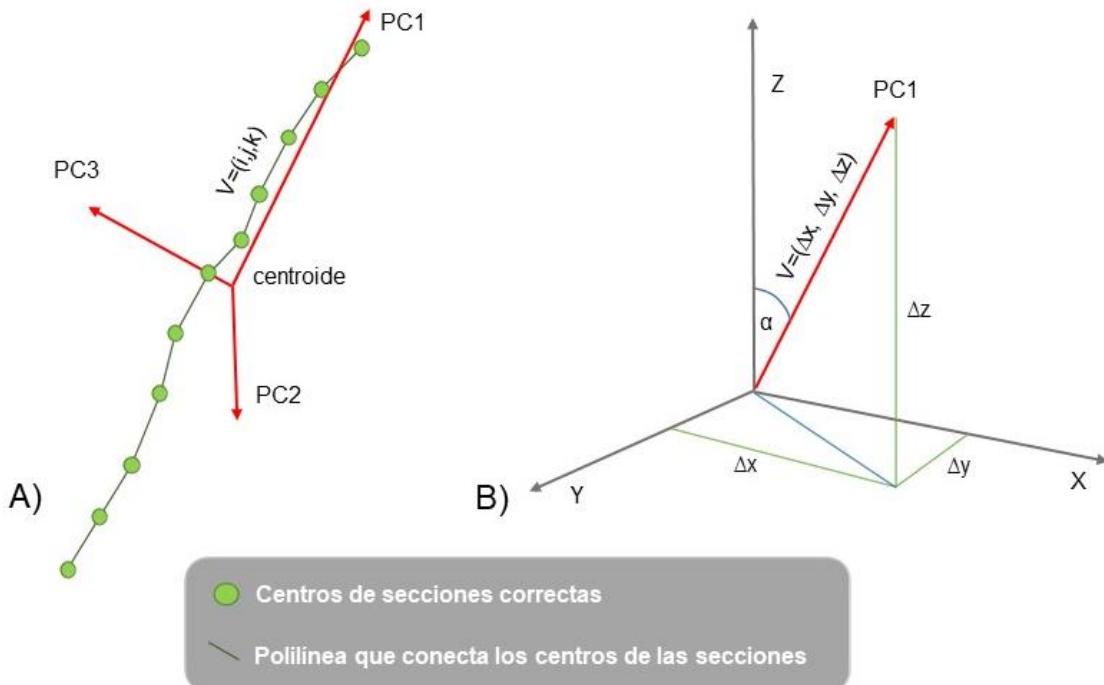


Figura 4. A) Eje de coordenadas resultante del análisis PCA aplicado a los centros de las secciones del fuste B) Cálculo del ángulo de inclinación (α) de PC1 con respecto a la vertical.

3.2.3. Comparación con estimaciones tradicionales

La comparación entre una variable continua (de datos TLS) y una categórica (inventario de campo) no es sencilla debido a su diferente naturaleza. Sin embargo, es posible evaluar si la categorización de los árboles en campo en función de su rectitud e inclinación sigue un patrón similar al de las mediciones de esas mismas variables obtenidas con TLS. El procedimiento consiste en agrupar los árboles de la parcela por categorías siguiendo el método tradicional (Tabla 1), y calcular la flecha máxima y la inclinación para cada árbol en cada categoría utilizando las observaciones TLS. Luego, se compararon las funciones de densidad de probabilidad para cada variable y para cada categoría. La comparación se realizó tanto visual como numéricamente. El análisis numérico se realizó analizando los estadísticos de ambas variables mediante el test de Tukey-Kramer (SEIDEL et al., 2021; TUKEY, 1949) que compara las medias individuales a partir de un análisis de varianza de varias muestras con diferentes características.

4. Resultados

4.1 Variables de forma del tronco mediante TLS

Una vez probada la metodología en la parcela, se obtuvieron las variables de forma para 385 árboles de los 408 iniciales. Los que faltaban estaban mal definidos en la nube de puntos y por lo tanto no era posible aplicar la metodología en ellos, o tenían un número muy pequeño de secciones, que hizo que los resultados obtenidos no fueran fiables. La Tabla 2 resume el mínimo, el máximo, la media, la desviación estándar, la mediana y la moda de las variables de forma estimadas por la metodología.

Tabla 2. Estadísticos descriptivos de las variables de forma estimadas a partir de la nube TLS.

	MÍNIMO	MÁXIMO	MEDIA	DESVIACIÓN	MEDIANA	MODA
INCLINACIÓN (º)	0,15	14,10	4,01	2,604	3,686	1
FLECHA MÁXIMA ESTANDARIZADA (m)	0,020	0,390	0,104	0,058	0,092	0,094
SINUOSIDAD (adimensional)	1,000	1,250	1,008	0,018	1,004	1,003

El rango de los valores de inclinación es bajo (14 °) y el valor máximo corresponde a un árbol que fue clasificado como no inclinado en el campo. Estos resultados demuestran que la mayoría de los árboles están ligeramente inclinados. La desviación estándar es de alrededor de 0,5 °, por lo que los valores de inclinación están ligeramente dispersos alrededor de la media. Según los valores de la mediana y la moda, la distribución tiene un sesgo negativo y el rango es pequeño, lo que significa que hay poca variabilidad en la inclinación.

En cuanto a las estadísticas de la flecha máxima estandarizada, los árboles de la parcela pueden considerarse rectos en la mayoría de los casos de acuerdo con su valor medio de 10,4 cm, que está muy cerca del radio medio de los árboles dentro de la parcela (8,8 cm). La desviación estándar es aproximadamente la mitad del valor medio y la distribución es un sesgo negativo de acuerdo con los valores de la mediana y la moda. El rango es del orden de 37 cm lo que indica una gran variabilidad en los valores máximos de la flecha. En el caso de la sinuosidad, los valores promedio son cercanos a 1 (sin sinuosidad), y la desviación estándar es baja, lo que significa que en términos generales los troncos de los árboles no son tortuosos. La distribución tiene sesgo negativo y el rango es pequeño, lo que significa que hay poca variabilidad en los valores de sinuosidad.

4.2 Comparación con estimaciones tradicionales

La Figura 7 muestra las funciones de densidad de probabilidad obtenidas para los árboles dentro de la parcela de estudio: una para cada una de las tres categorías establecidas siguiendo el criterio de la Tabla 1 (categoría de rectitud e inclinación en función de la clasificación visual de campo) Concretamente, la Figura 7A muestra las 3 curvas correspondientes a la FE_{max} y la Figura 7B las relativas a la inclinación. En el caso de la FE_{max} existe una alta superposición entre las 3 categorías, especialmente la 2 y la 3, lo que indica que los límites entre ellas no están bien definidos. Existe una tendencia al aumento de la FE_{max} a medida que aumenta el valor de la categoría. En la categoría 1, su valor está alrededor de 5 cm para la mayoría de los árboles, mientras que en las otras dos categorías el pico de la función de densidad se desplaza ligeramente hacia la derecha, lo que indica una mayor frecuencia de valores de FE_{max} más altos. En el caso de la inclinación, los resultados son muy similares. Las curvas muestran un alto grado de superposición entre sí y revelan una ligera disminución en el valor de la inclinación a medida que aumenta la categoría estando el pico de la distribución muy cercano a 0 ° en la clase 1, y ligeramente desplazado hacia la izquierda en las clases 2 y 3.

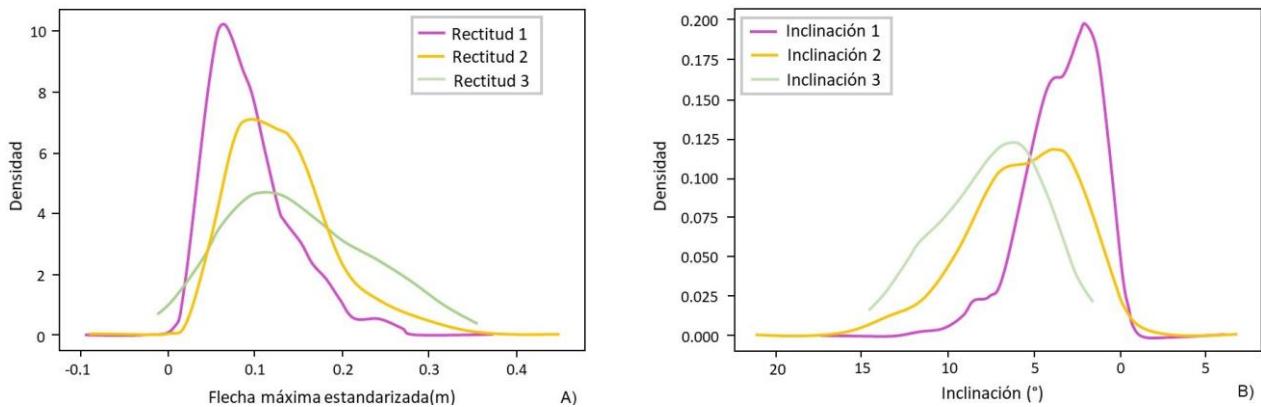


Figura 7. Funciones de densidad de probabilidad que representan los valores de flecha máxima estandarizada (A) e inclinación (B) obtenidos a partir de las nubes TLS usando la clasificación del inventario de campo para establecer las categorías que se muestran en el gráfico.

La Tabla 3 resume los estadísticos descriptivos (media, mediana y desviación estándar) de FE_{\max} e inclinación por categoría. A la vista de los resultados, la tendencia detectada previamente en las funciones de densidad de probabilidad se confirma estadísticamente. En el caso de FE_{\max} , los valores medios aumentan con el número de categoría (ver Tabla 1). Entre las categorías 1-2 el aumento es de 4,4 cm, mientras que entre las 2-3, es de solo 0,5 cm.

En el caso de la inclinación, también se aprecia una tendencia clara: hay una disminución de su valor a medida que aumenta la categoría de campo, lo que indica que, en términos generales, los árboles están más inclinados en las categorías superiores que en la primera. El mayor incremento en el valor medio se ubica entre la categoría 1 y 2 con 2,28 °, mientras que entre la categoría 2 y 3 su valor es 1,39 °.

Tabla 3. Estadísticos de FE_{\max} e inclinación obtenidos para las diferentes categorías representadas en las funciones de densidad de probabilidad.

FLECHA MÁXIMA ESTANDARIZADA (m)					INCLINACIÓN (°)					
	N _R *	Media	Desv.	Mín	Máx	N _I	Media	Desv.	Mín	Máx
1	260	0,095	0,060	0,020	0,355	272	3,352	2,068	0,149	11,573
2	120	0,139	0,080	0,047	0,390	108	5,633	3,051	0,206	14,102
3	5	0,144	0,074	0,074	0,256	5	7,026	2,651	4,87	11,314

* $N_{Rectitud}$, $N_{Inclinación}$ son el número de árboles incluidos en cada categoría de rectitud e inclinación respectivamente de acuerdo al inventario de campo.

Conclusiones similares fueron obtenidas al comparar las medias de las tres categorías mediante el test de Tukey-Kramer. Para un nivel de significación alfa = 0.05, el resultado del test muestra que no es posible afirmar que existan diferencias significativas entre las tres categorías para la FE_{\max} . En cuanto a la inclinación, solo hay diferencias significativas entre la categoría 1 y las otras dos.

5. Discusión

Este estudio presenta una metodología para la medición automática de rectitud (flecha máxima estandarizada y sinuosidad), y la inclinación a nivel de árbol individual, a partir de datos capturados con un TLS. Además, los resultados obtenidos se compararon con las mediciones realizadas en

campo mediante una clasificación visual categórica que agrupa los árboles en clases según su grado de rectitud e inclinación (métodos tradicionales)

En el caso de la comparación entre las variables obtenidas por la metodología y las obtenidas por la clasificación categórica realizada en el inventario de campo, los resultados muestran que existe una clara mezcla entre las categorías establecidas en campo. Si bien los resultados obtenidos muestran que los valores medios tienden a aumentar levemente a medida que aumenta la categoría, como era de esperar, el análisis estadístico muestra que no existen diferencias entre ninguno de los grupos en el caso de la rectitud y solo diferencias significativas en el caso de dos grupos en el caso de la inclinación. Este hecho sugiere que los métodos tradicionales tienen grandes limitaciones que los convierten en no adecuados para un análisis preciso a nivel de árbol individual, especialmente en una parcela de mejora genética de árboles como la utilizada en este estudio, donde es crucial tener mediciones confiables de la morfología tronco que permitan estudiar de forma correcta los rasgos de heredabilidad individual y familiar y su correlación genética con las distintas procedencias.

Estos resultados no son del todo inesperados, ya que varios autores han señalado que la evaluación manual de los parámetros de forma del tronco en árboles en pie es extremadamente difícil, requiere mucho tiempo y es costosa (LIANG AND HYPPÄ, 2013; MENGESHA ET AL., 2015). Además, la comparación entre diferentes resultados es difícil debido a la variabilidad de los métodos utilizados para evaluar la rectitud y la inclinación del tronco (particularmente los que se basan en escalas subjetivas), agravada con la variación en las características del entorno, las especies y la edad en el momento de la evaluación. Estas son las principales razones por las que las mediciones numéricas de variables de forma en árboles en pie no están instauradas en los inventarios forestales clásicos (MENGESHA et al., 2015). Todo lo anterior está en consonancia también con el alto grado de subjetividad de las estimaciones que, al utilizar clasificaciones exclusivamente visuales sin apoyo de ningún dispositivo de medición, aumentan el riesgo de error.

El uso de la metodología propuesta en este estudio en nubes de puntos tomadas con TLS proporciona, para cada variable de forma, un valor numérico que la cuantifica de manera absoluta y precisa. En consecuencia, desaparece la subjetividad y ambigüedad asociadas a otras alternativas, como el establecimiento de categorías visuales en el campo, permitiendo la comparación entre diferentes parcelas, especies o períodos de tiempo. Además, en base a los resultados obtenidos con los datos de TLS, se podrían establecer umbrales para definir categorías si se desea. Algunos autores como (THIES et al., 2004) y (GARMS et al., 2020) definieron un valor de inclinación a partir del cual un árbol puede considerarse inclinado, y el mismo procedimiento podría aplicarse a otras variables de forma. Además, la metodología proporciona estimaciones de la sinuosidad, que es difícil de medir en el campo por métodos tradicionales (DWIVEDI et al., 2019; MIDDLETON et al., 1989).

En este caso, se ha realizado una caracterización simple de los troncos con un enfoque eminentemente práctico centrado en las variables de forma que se evalúan tradicionalmente. Sin embargo, el uso de nubes de puntos TLS es una herramienta extremadamente poderosa que ofrece una reconstrucción tridimensional del bosque en el momento del escaneo, lo cual tiene muchas ventajas (CABO et al., 2018a; PITKÄNEN et al., 2019; TORRESAN et al., 2021). La más obvia es que los datos de la masa forestal están disponibles permanentemente, por lo que se pueden realizar estudios multitemporales con varios objetivos (LIANG et al., 2012; SRINIVASAN et al., 2014), además de facilitar la búsqueda de nuevas variables de interés en estudios retrospectivos. Además, el trabajo futuro podría centrarse en estimar otras variables de la forma del tronco, como la curvatura o el ahusamiento, con los mismos datos de entrada utilizados en este estudio (es decir, la posición y el diámetro de las secciones a lo largo de los tallos de una masa forestal).

Este estudio proporciona una nueva metodología que contribuye a aumentar la disponibilidad de información sobre la forma y calidad del tronco en los inventarios previos al aprovechamiento. Por un lado, este tipo de información posibilita (i) mejores estimaciones del valor de los troncos en

función de una especificación deseada, (ii) el estudio de rasgos relacionados con la forma del tronco que influyen en el rendimiento del volumen comercial (iii) sirve como punto de partida para un procedimiento automático que permita estimar el volumen comercializable en árboles en pie considerando no solo los diámetros a diferentes alturas y las alturas totales, sino también las variables de la forma del tronco (iv) planificar el tronzado de los troncos en trozos utilizando datos más detallados sobre su forma y mejorar así el beneficio global a obtener (GARMS et al., 2020; THIES et al., 2004). Complementariamente, la metodología también tiene muchas aplicaciones en el campo de la mejora genética de árboles donde tanto la rectitud del tronco como la inclinación son variables clave para seleccionar las mejores procedencias según criterios de calidad de madera.

Finalmente, cabe destacar que uno de los principales retos a los que se enfrentan los gestores forestales a la hora de trabajar con datos TLS es el de reducir el tiempo invertido en la toma de datos en campo y el procesado de las nubes para que sea similar o menor al tiempo requerido para hacer evaluaciones visuales en campo. Esto depende en gran medida del nivel de automatización que se pueda lograr mediante el análisis asistido por software de las parcelas escaneadas (THIES et al. 2004). En este caso el nivel de automatización para la obtención de variables de forma es total. Además, la metodología presentada es válida para ser aplicada a cualquier nube de puntos tomada desde el suelo que tenga una buena definición, incluyendo las tomadas con un escáner de mano (WLS- Wearable Laser Scanner). En términos de adquisición y tiempo de procesado, para escenarios complejos y áreas grandes, la tecnología WLS permite obtener un modelo 3D del bosque en la mitad del tiempo que se necesitaría con un TLS. Para áreas más simples o pequeñas donde se pueda utilizar solo una línea de escaneo ese tiempo se reduce a un cuarto (CABO et al. 2018b)

6. Conclusiones

En este estudio se presenta una metodología para la medición automática de variables de forma del tronco enfocadas en rectitud e inclinación, a nivel de árbol individual, a partir de datos capturados con un TLS. Esta metodología se aplicó a una parcela de mejora genética de *Pinus pinaster* y proporcionó resultados precisos para todas las variables evaluadas. Asimismo, la metodología es robusta a errores en la estimación de los centros de las secciones, que son la base para estimar las variables de forma. Sin embargo, el análisis relacionado con la propagación del error solo se ha llevado a cabo en una parcela de estudio, por lo que sería aconsejable realizar más investigaciones para evaluar la metodología con diferentes especies y condiciones del rodal.

La comparación con técnicas de campo subjetivas y no rigurosas (categorización visual de los individuos según su nivel de rectitud e inclinación) ha demostrado que existe una superposición muy alta entre las categorías establecidas, lo que revela que existe un problema de clasificación errónea de árboles al utilizar estas técnicas. La metodología propuesta se presenta como una alternativa que supera los inconvenientes de las técnicas de campo clásicas al proporcionar automáticamente estimaciones cuantitativas y objetivas de las variables tradicionalmente medidas en campo (rectitud e inclinación, y además también es aplicable a nubes de puntos tomadas con distintos tipos de escáneres como el WLS).

7. Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA) en el marco del proyecto RTA2017-00063-C04-02 (2017) titulado: "Evaluación de caracteres relevantes para la gestión sostenible de *Pinus pinaster* Ait. y su interacción bajo nuevos escenarios climáticos. Carlos Cabo recibió fondos del UK Natural Environment Research Council (NE/T001194/1), y del Gobierno de España (Ministerio de Universidades) y la Unión Europea (NextGenerationEU), dentro del proyecto MU-21-UP2021-030

8. Bibliografía

- BENNETER, A.; FORRESTER, D.I.; BOURIAUD, O.; DORMANN, C.F.; BAUHUS, J.; 2018. Tree species diversity does not compromise stem quality in major European forest types. *For. Ecol. Manag.* 422, 323–337.
- BOSCHETTI, W.T.N.; DE OLIVEIRA, R.C.; CARVALHO, A.M.M.L.; ROCHA, M.F.V.; 2017. The effect of reaction wood on the properties of eucalyptus kraft pulp–Part II. *Nord. Pulp Pap. Res. J.* 32, 428–435.
- CABO, C.; ORDÓÑEZ, C.; LÓPEZ-SÁNCHEZ, C.A.; ARMESTO, J.; 2018a. Automatic dendrometry: Tree detection, tree height and diameter estimation using terrestrial laser scanning. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation* 69, 164–174.
- CABO, C.; DEL POZO, S.; RODRÍGUEZ-GONZÁLVEZ, P.; ORDÓÑEZ, C., GONZALEZ-AGUILERA, D.; 2018b. Comparing terrestrial laser scanning (TLS) and wearable laser scanning (WLS) for individual tree modelling at plot level. *Remote Sens.*, 10(4), 540.
- CALDERS, K.; ADAMS, J.; ARMSTON, J.; BARTHOLOMEUS, H.; BAUWENS, S.; BENTLEY, L.P.; CHAVE, J.; DANSON, F.M.; DEMOL, M.; DISNEY, M.; 2020. Terrestrial laser scanning in forest ecology: Expanding the horizon. *Remote Sens. Environ.* 251, 112102.
- CANGA, E.; CÁMARA-OBREGÓN, A.; DIÉGUEZ-ARANDA. U.; 2008. Crecimiento y producción de pinares regulares de *Pinus radiata* d.Don en Asturias. Tesis doctoral. Universidad de Oviedo
- DEL RIO, M.; BRAVO, F.; PANDO, V.; SANZ, G.; DE GRADO, R.S.; 2004. Influence of individual tree and stand attributes in stem straightness in *Pinus pinaster* Ait. stands. *Ann. For. Sci.* 61, 141–148.
- DWIVEDI, P.; SUCRE, E.; TURNBLOM, E.C.; HARRISON, R.B.; 2019. Investigating Relationships between Nutrient Concentrations, Stem Sinuosity, and Tree Improvement in Douglas-Fir Stands in Western Washington. *Forests* 10, 541.
- GARMS, C.G.; SIMPSON, C.H.; PARRISH, C.E.; WING, M.G.; STRIMBU, B.M.; 2020. Assessing lean and positional error of individual mature Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) trees using active and passive sensors. *Can. J. For. Res.* 50, 1228–1243.
- HAMNER, P.; WHITE, M.S.; ARAMAN, P.A.; 2007. The frequency and level of sweep in mixed hardwood saw logs in the eastern United States. *For. Prod. J.* 57 9 23–27.
- HYYPPÄ, E.; KUKKO, A.; KAIJALUOTO, R.; WHITE, J.C.; WULDER, M.A.; PYÖRÄLÄ, J.; LIANG, X.; YU, X.; WANG, Y.; KAARTINEN, H.; 2020. Accurate derivation of stem curve and volume using backpack mobile laser scanning. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 161, 246–262.
- LIANG, X.; HYYPPÄ, J.; 2013. Automatic stem mapping by merging several terrestrial laser scans at the feature and decision levels. *Sensors* 13, 1614–1634.

LIANG, X.; HYPPÄ, J.; KAARTINEN, H.; LEHTOMÄKI, M.; PYÖRÄLÄ, J.; PFEIFER, N.; HOLOPAINEN, M.; BROLLY, G.; FRANCESCO, P.; HACKENBERG, J.; 2018. International benchmarking of terrestrial laser scanning approaches for forest inventories. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 144, 137–179.

LIANG, X.; KUKKO, A.; KAARTINEN, H.; HYPPÄ, J.; YU, X.; JAAKKOLA, A.; WANG, Y.; 2014. Possibilities of a personal laser scanning system for forest mapping and ecosystem services. *Sensors* 14, 1228–1248.

LIANG, X.; LITKEY, P.; HYPPÄ, J.; KAARTINEN, H.; VASTARANTA, M.; HOLOPAINEN, M.; 2012. Automatic stem mapping using single-scan terrestrial laser scanning. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 50, 661–670.

MACDONALD, E.; MOCHAN, S.; CONNOLLY, T.; 2009. Validation of a stem straightness scoring system for Sitka spruce (*Picea sitchensis* (Bong.) Carr.). *Forestry* 82, 419–429.

MASUDA, H.; HIRAOKA, Y.; SAITO, K.; ETO, S.; MATSUSHITA, M.; TAKAHASHI, M.; 2021. Efficient Calculation Method for Tree Stem Traits from Large-Scale Point Clouds of Forest Stands. *Remote Sens.* 13, 2476.

MENGESHA, T.; HAWKINS, M.; NIEUWENHUIS, M.; 2015. Validation of terrestrial laser scanning data using conventional forest inventory methods. *Eur. J. For. Res.* 134, 211–222.

MIDDLETON, G.R.; CARTER, R.E.; MUNRO, B.D.; MACKAY, J.F.G.; 1989. Losses in timber values associated with distorted growth in immature Douglas-fir. *FRDA Rep.*

MOLINA-VALERO, J.A.; VILLAMAYOR, M.J.G.; PÉREZ, M.A.N.; ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, J.G.; MONTES, F.; MARTÍNEZ-CALVO, A.; PÉREZ-CRUZADO, C.; 2020. FORTLS: An R Package for Processing TLS Data and Estimating Stand Variables in Forest Inventories, in: *Environmental Sciences Proceedings*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, p. 38.

MURPHY, G.; 2008. Determining stand value and log product yields using terrestrial lidar and optimal bucking: a case study. *J. For.* 106, 317–324.

PITKÄNEN, T.P.; RAUMONEN, P.; KANGAS, A.; 2019. Measuring stem diameters with TLS in boreal forests by complementary fitting procedure. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 147, 294–306.

PRENDÉS, C.; CABO, C.; ORDOÑEZ, C.; MAJADA, J.; CANGA, E., 2021. An algorithm for the automatic parametrization of wood volume equations from Terrestrial Laser Scanning point clouds: application in *Pinus pinaster*. *GIScience Remote Sens.* 1–21.

SEIDEL, D.; ANNIGHÖFER, P.; AMMER, C.; EHBRECHT, M.; WILLIM, K.; BANNISTER, J.; SOTO, D.P.; 2021. Quantifying Understory Complexity in Unmanaged Forests Using TLS and Identifying Some of Its Major Drivers. *Remote Sens.* 13, 1513.

SRINIVASAN, S.; POPESCU, S.C.; ERIKSSON, M.; SHERIDAN, R.D.; KU, N.-W.; 2014. Multi-temporal terrestrial laser scanning for modeling tree biomass change. *For. Ecol. Manag.* 318, 304–317.

THIES, M.; PFEIFER, N.; WINTERHALDER, D.; GORTE, B.G.; 2004. Three-dimensional reconstruction of stems for assessment of taper, sweep and lean based on laser scanning of standing trees. *Scand. J. For. Res.* 19, 571–581.

TORRESAN, C.; PELLERI, F.; MANETTI, M.C.; BECAGLI, C.; CASTALDI, C.; NOTARANGELO, M., CHIAVETTA, U., 2021. Comparison of TLS against traditional surveying method for stem taper modelling. A case study in European beech (*Fagus sylvatica* L.) forests of mount Amiata. *Ann. Silvic. Res.* 46.

TUKEY, J.W.; 1949. Comparing individual means in the analysis of variance. *Biometrics* 99–114.