

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA  
ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL

USO DEL ESCÁNER LÁSER TERRESTRE (TLS) PARA LA  
CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL DE BOSQUE SECO  
TROPICAL Y PLANTACIONES FORESTALES EN COSTA RICA

TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO FORESTAL CON EL GRADO  
ACADÉMICO DE LICENCIATURA

JOSÉ ORLANDO JIMÉNEZ MÉNDEZ

CARTAGO, COSTA RICA, 2023



**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA  
ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL**

**USO DEL ESCÁNER LÁSER TERRESTRE (TLS) PARA LA  
CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL DE BOSQUE SECO  
TROPICAL Y PLANTACIONES FORESTALES EN COSTA RICA**

**TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO FORESTAL CON EL GRADO  
ACADÉMICO DE LICENCIATURA**

**JOSÉ ORLANDO JIMÉNEZ MÉNDEZ**

**CARTAGO, COSTA RICA, 2023**

# USO DEL ESCÁNER LÁSER TERRESTRE (TLS) PARA LA CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL DE BOSQUE SECO TROPICAL Y PLANTACIONES FORESTALES EN COSTA RICA

Orlando Jiménez-Méndez<sup>1</sup>

## RESUMEN

El monitoreo de los bosques es una labor imprescindible para el entendimiento y manejo de las masas forestales, sin embargo, la recolección de la información necesaria para realizar esta labor es una actividad tardada y costosa. Ante la necesidad del sector forestal de desarrollar nuevas alternativas de monitoreo de bosques tropicales, que sean eficientes, precisas y permitan complementar las metodologías actuales, surge este estudio para caracterizar los atributos estructurales de sistemas boscosos a través del uso del escáner láser terrestre (TLS). Se caracterizaron cinco sitios de diferentes estadios sucesionales de bosque seco tropical (BsT) y cinco plantaciones forestales con diferentes edades y bajo distintos regímenes de manejo, al extraer las variables de Altura de dosel, Efective Number of Layers (ENL), Índice de Complejidad Estructural (SSCI) y % de Apertura de dosel, por medio de nubes de puntos obtenidas con TLS. Los resultados obtenidos sugieren que no existe un patrón de comportamiento normal dependiente de la etapa de sucesión del BsT evaluado, sin embargo, la comparación entre las distintas plantaciones forestales con el BsT refleja un fuerte contraste entre los distintos grupos, lo que representa un potencial para seguir investigando el uso de esta tecnología en distintos paisajes forestales tropicales.

**Palabras clave:** TLS, LiDAR, SSCI, ENL, Cronosecuencia, Lianas.

---

<sup>1</sup> Jiménez-Méndez, O. 2023. Uso del Escáner Láser Terrestre (TLS) para la caracterización estructural de bosque seco tropical y plantaciones forestales en Costa Rica. (Tesis de Licenciatura.) Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.

## ABSTRACT

Forests monitoring is an essential task for the understanding and management of forest stands, however, the collection of the necessary information to carry out this task is a costly and time-consuming activity. Given the forestry sector's need to develop new efficient and accurate alternatives for tropical forests monitoring that can complement current methodologies, this study was conducted to characterize the structural attributes of forest systems using a terrestrial laser scanner (TLS). Five sites with different successional stages of tropical dry forest (TdF) and five forest plantations of different ages and under different management regimes were characterized by extracting the variables of Stand Height, Effective Number of Layers (ENL), Stand Structural Complexity Index (SSCI) and Canopy Openness %, out of point clouds obtained from TLS. The results suggest that there is no normal behavior pattern correlated with successional stages of the TdF evaluated, however, the comparison between the different forest plantations with TdF reflect a strong contrast between the different groups, which represents a potential for further research on the use of this technology in different tropical forest landscapes.

**Key words: Chronosequence, LiDAR, TLS, Lianas, SSCI, ENL.**



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución No Comercial Sin Derivadas 4.0 Internacional.

## CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE PROYECTO DE GRADUACIÓN

Trabajo final de graduación defendido públicamente ante el Tribunal Evaluador, integrado por M.Sc. Mario Guevara Bonilla, Ph.D. Ruperto Quesada Monge y M.Sc. Casia Soto Montoya como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Forestal, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

---

Mario Guevara Bonilla M.Sc.  
Director de tesis

---

Ruperto Quesada Monge Ph.D.  
Lector

---

Casia Soto Montoya M.Sc.  
Lectora

---

Dorian Carvajal Vanegas M.Sc.  
Coordinador de Trabajos Finales de  
Graduación



---

José Orlando Jiménez Méndez  
Estudiante

# DEDICATORIA

## **Dedicado a:**

A Elisio, Pilar, Cecilia y Martín, por apoyarme e impulsarme a crecer y por darme el mejor ejemplo de esfuerzo y trabajo que podría tener.

A Cristina, por su apoyo incondicional y por acompañarme en los momentos difíciles y alegres de esta etapa universitaria.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Mario Guevara, por motivación, consejo, orientación y ayuda en el planeamiento y desarrollo de este proyecto.

A Dominik Seidel, por el apoyo en la computación y análisis de los resultados obtenidos y por darme la oportunidad de utilizar nuevas herramientas y reforzar la alianza con la Universidad de Göttingen.

A Ruperto Quesada y Casia Soto, por el apoyo durante el desarrollo del proyecto y por la ayuda en la revisión de este documento.

A David, Ronald, Jimmy, Marlon y Pedro, por ayudarme y acompañarme durante la recolección de datos en la EEFH.

A Adriana y Javier, por ayudarme y acompañarme durante la recolección de datos en las plantaciones forestales.

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN .....	i
ABSTRACT .....	ii
DEDICATORIA .....	iv
AGRADECIMIENTOS .....	v
ÍNDICE GENERAL .....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS .....	vii
ÍNDICE DE ANEXOS .....	vii
INTRODUCCIÓN .....	1
MATERIAL Y MÉTODOS .....	4
Sitios de estudio.....	4
Bosque seco tropical .....	4
Plantaciones Forestales .....	5
Diseño muestral y captura de información.....	7
Procesamiento y análisis de los datos .....	8
Análisis estadístico .....	10
Bosque seco tropical .....	10
Plantaciones forestales.....	11
RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	11
Caracterización de bosque seco tropical .....	11
Caracterización de plantaciones forestales.....	14
CONCLUSIONES.....	17
RECOMENDACIONES .....	17
REFERENCIAS.....	18

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Ubicación de la Estación Experimental Forestal Horizontes (EEFH) y las 10 parcelas permanentes de muestreo (PPM) evaluadas.....	4
<b>Figura 2.</b> Ubicación de los puntos de escaneo realizados en bosque seco tropical y plantaciones forestales.....	6
<b>Figura 3.</b> Distribución de los puntos de escaneo dentro de la PPM. ....	7
<b>Figura 4.</b> Gráficos de cajas para los resultados obtenidos de las variables Altura de dosel, ENL, SSCI y apertura de dosel, para cada sitio evaluado (sitios ordenados de menor a mayor tiempo en regeneración, izquierda a derecha en el eje x).....	12
<b>Figura 5.</b> Gráficos de cajas para los resultados obtenidos de las variables Altura de dosel, ENL, SSCI y apertura del dosel, para las diferentes plantaciones forestales evaluadas y el BsT. ....	16

## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>Anexo 1.</b> Protocolo para el uso del Escáner Láser Terrestre (TLS) Faro Focus 3d 120s y el manejo de nubes de puntos de sistemas boscosos tropicales .....	24
---	----

## INTRODUCCIÓN

Los bosques tropicales son ecosistemas de gran importancia para la conservación de la biodiversidad y la mitigación del cambio climático [1]. Dentro de estos se encuentran los bosques secos tropicales (BsT) que cubren un 42% del área total de bosques en el mundo [2], [3]. Estos albergan una amplia variedad de especies animales y vegetales, muchas de las cuales son endémicas y están en peligro de extinción [4]. Los bosques secos tropicales en un sentido amplio son un tipo de vegetación típicamente dominado por árboles caducifolios (al menos el 50% de los árboles presentes son caducifolios por sequía), donde la temperatura media anual es  $\geq 25^{\circ}\text{C}$ , la precipitación anual total es de entre 700 y 2000 mm y hay al menos tres meses cada año con precipitación menor a los 100 mm/mes [5].

Actualmente una gran proporción de los BsT corresponden a bosques secundarios, también llamados bosques en sucesión, especialmente en Costa Rica, donde cambios legislativos y sociales han promovido la regeneración de este tipo de paisajes [6]. En el decreto R-SINAC-CONAC-115-2017, se define a los bosques secundarios como “Tierra con vegetación leñosa de carácter sucesional secundario, que se desarrolla una vez que la vegetación original ha sido eliminada por actividades humanas y/o fenómenos naturales, con una superficie mínima de 0.5 hectáreas.” Estos ecosistemas son naturalmente complejos y se ven afectados por factores históricos climáticos y de uso de la tierra [7], [8]. Además, actúan como sumideros de carbono en su biomasa y suelos, por lo que el monitoreo de los bosques tropicales es esencial para la protección de la biodiversidad y la mitigación del cambio climático [9].

A partir del monitoreo forestal se pueden conocer cambios en la estructura y composición de los bosques secundarios, generalmente mediante el estudio de cronosecuencias [1], [7], cuya tendencia generalmente responde a un aumento en la diversidad, densidad, altura y complejidad conforme aumenta la edad y con ella la madurez del bosque [7], [10]–[12]. Dichos cambios en las masas forestales también responden a gradientes climáticas o catástrofes ambientales [13]; esto es de especial

importancia para los bosques tropicales ya que son especialmente vulnerables a estos eventos [14]. Sin embargo, el monitoreo de bosques tropicales es una tarea compleja y costosa debido a su extensión, a la diversidad de especies presentes y a los procesos ecológicos que se deben evaluar [9].

Para caracterizar adecuadamente un bosque se deben tomar en cuenta variables que representen su desarrollo, de las cuales se puedan inferir tendencias o comportamientos de la masa forestal en el tiempo. Para ello se deben obtener métricas propias del sitio que permitan realizar una caracterización vertical y horizontal del bosque en estudio [15]. La obtención manual de estas métricas de campo requiere de una inversión de tiempo y esfuerzo considerable, además, está sujeta a errores humanos. Es por este motivo que el uso de herramientas como los sensores remotos, que son capaces de facilitar y agilizar esta labor, son de suma importancia para mejorar la eficiencia en la recolección de la información de los bosques [16], [17].

Una de las tecnologías de sensores remotos más prometedoras para el monitoreo de bosques tropicales es el LiDAR (Light Detection and Ranging), el cual utiliza pulsos de luz láser para medir la distancia entre el sensor y la superficie del terreno o la vegetación, permitiendo generar un modelo tridimensional de la estructura del bosque [18], [19]. La tecnología LiDAR puede ser utilizada por encima del dosel con sensores instalados en vehículos aéreos o desde el nivel del suelo con sensores fijos o móviles [20], [21] y pueden proporcionar datos altamente precisos sobre la densidad y la distribución de la vegetación [22], la estructura vertical de los bosques [23]–[25] y la detección de cambios en la estructura del bosque a lo largo del tiempo [26]–[28].

Una de las tecnologías LiDAR que se ha utilizado con éxito para la caracterización de bosques es el escáner láser terrestre (TLS por sus siglas en inglés), esta herramienta genera una nube de puntos densa y detallada desde una observación por debajo del dosel [21], [29]. El TLS es muy efectivo para la caracterización de la estructura de los árboles, permitiendo obtener información detallada sobre la forma, el diámetro y la altura de los árboles, así como sobre la densidad de la copa y el volumen de madera o combustible presente [30], [31], así mismo, ha demostrado ser de utilidad para el

estudio de BsT en Costa Rica [32], lo que representa una oportunidad de estudiar nuevos estándares para el monitoreo forestal [33], permitiendo que la obtención de información objetiva, automatizada y de manera no invasiva, sea posible [34], [35].

Una de las maneras más eficientes de utilizar el TLS es mediante el uso del escaneo simple, que a diferencia del escaneo múltiple no requiere de un correregistro de nubes de puntos y por ende la toma de datos en campo y el procesamiento de las nubes de puntos es más rápido [34], [36]. El uso del escaneo simple ha demostrado ser no sólo eficiente y preciso, sino que también con una cantidad y calidad de información que no presenta diferencia significativa en comparación con la metodología de escaneo múltiple [24]. De la mano del escaneo simple, varios autores mencionan el “escaneo simple múltiple” [24], [30], [34], [37], donde se realizan varios escaneos de manera sistemática o aleatoria en una misma área de interés, pero se procesan por aparte y no se correregistran en una misma nube de puntos, de esta manera el procesamiento de la información es más sencillo, pero se obtiene una base de datos más robusta para inferir sobre la muestra, la cual puede ser procesada por algoritmos programados para obtener variables de interés específicas de manera automatizada [38], [39].

A partir de esta metodología se han desarrollado algoritmos que generan variables para caracterizar la estructura espacial de los bosques a partir de las nubes de puntos generadas por el TLS. En este estudio se evaluaron cuatro variables, el "Stand Structural Complexity Index" (SSCI), que se utiliza para medir la complejidad estructural de un bosque [39]–[42], el porcentaje de Apertura del dosel para la caracterización horizontal del bosque [43], el "Effective Number of Layers" (ENL) para cuantificar de manera simple y objetiva la estructura vertical del bosque [24], [41], y la Altura de dosel, la cual es un subproducto de la computación del ENL.

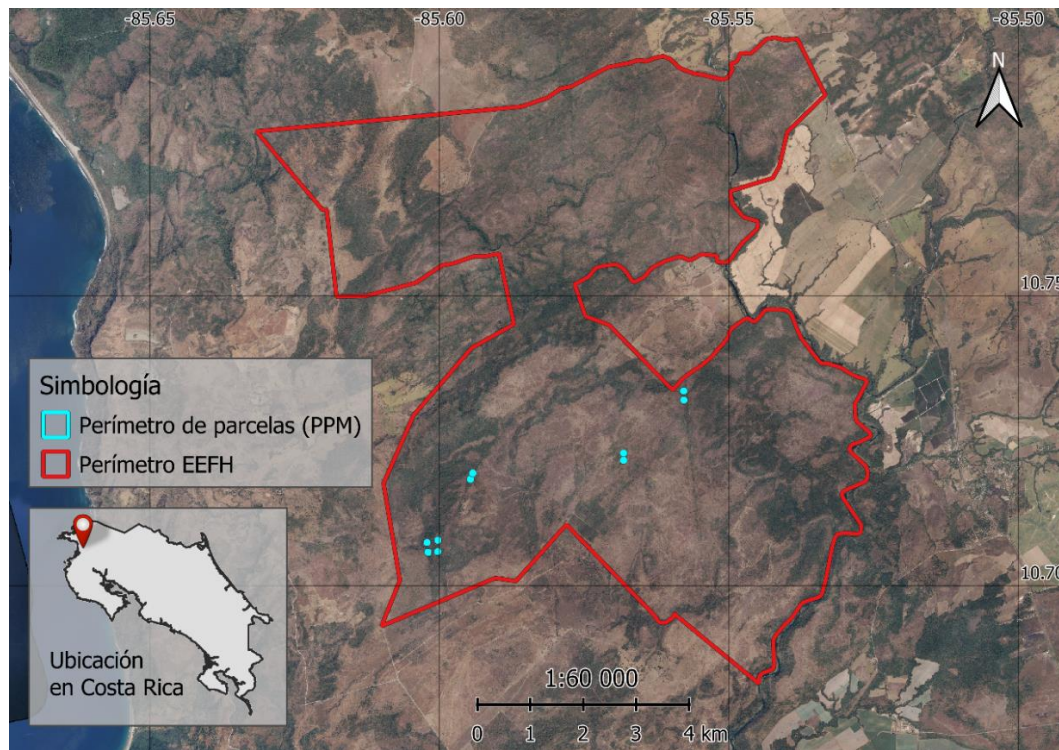
En el presente trabajo se realizó una caracterización estructural de cinco diferentes estadios sucesionales del BsT de la estación experimental Horizontes, así mismo, se realizó la misma caracterización en plantaciones forestales de diferentes edades para comparar la diferencia en la distribución espacial de sus atributos, utilizando escaneos simples no clasificados obtenidos a partir del uso del TLS.

# MATERIAL Y MÉTODOS

## Sitios de estudio

### Bosque seco tropical

El estudio de cronosecuencia de BsT se realizó en la Estación Experimental Forestal Horizontes (EEFH), en un área sometida a un proceso de restauración pasiva de bosque secundario. La EEFH se encuentra en el distrito de Nacascolo, entre las coordenadas geográficas 10°47'38" norte, 85°37'55" oeste y 10°40'58" norte, 85°31'30" oeste (WGS84), perteneciente al cantón de Liberia de la provincia de Guanacaste, Costa Rica. La zona se clasifica como bosque seco tropical "Bs-T" según la clasificación de zonas de vida de Holdridge [44], con elevaciones no mayores a los 500 msnm [45], con una precipitación media anual entre 1100 y 1500 mm y temperaturas de entre 24° y 27,8° C [46].



**Figura 1.** Ubicación de la Estación Experimental Forestal Horizontes (EEFH) y las 10 parcelas permanentes de muestreo (PPM) evaluadas.

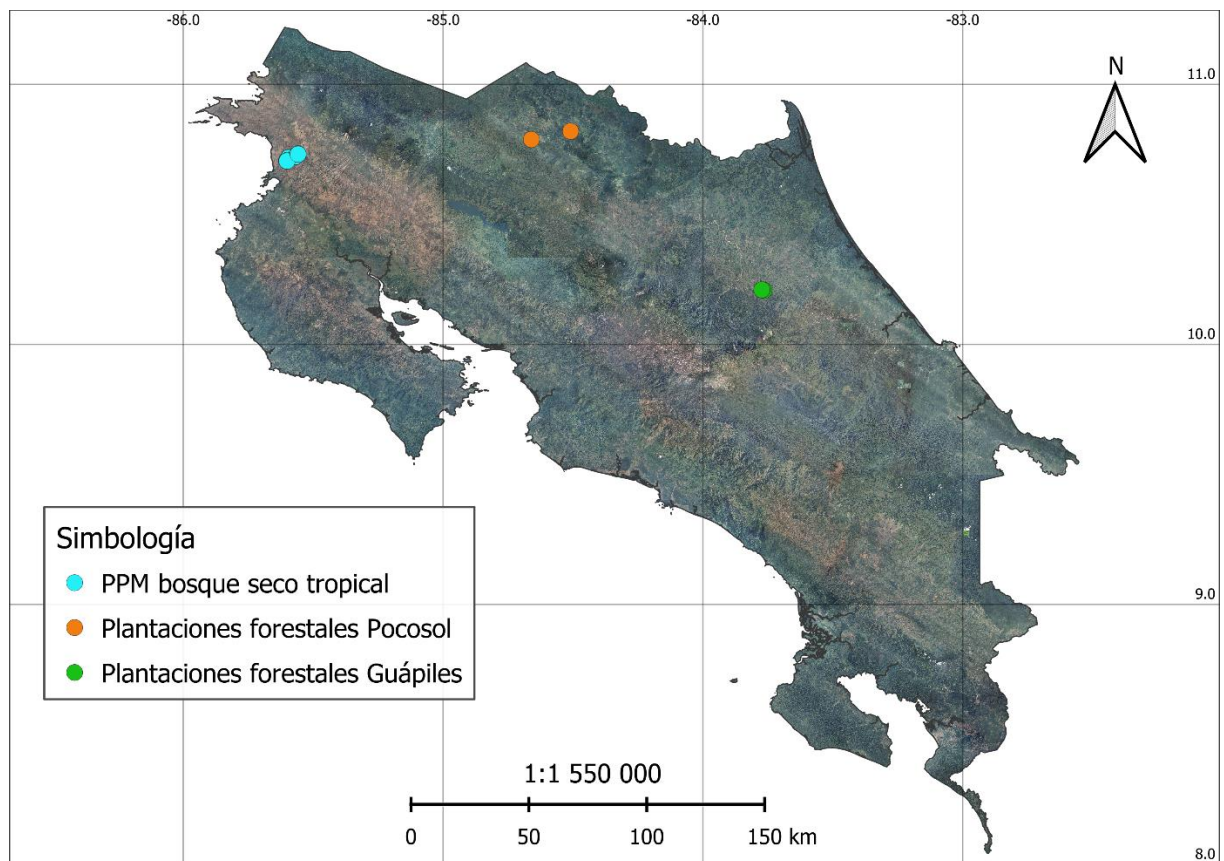
La selección de los sitios de muestreo se basó en el trabajo realizado originalmente por Splitter [47], del cual Reyes [48] usó como base para el establecimiento de 10 parcelas permanentes de muestreo (PPM) en 5 sitios dentro del bosque secundario con distintos periodos de regeneración (Fig. 1), posteriormente estas parcelas fueron medidas por [46] en 2012 y [45] en 2019. En cada uno de los sitios de estudio se establecieron dos PPM de 3600 m<sup>2</sup>, de forma cuadrada con lados de 60 metros, compuestas por nueve subparcelas cuadradas de 400 m<sup>2</sup> con lados de 20 metros (Fig. 2). Cada sitio tiene un nombre asignado desde el 2001 y la edad de regeneración para cada uno de ellos es la siguiente, en el sitio de mayor edad llamado Saravia (SAR) han pasado 48 años desde que se dejó en regeneración natural, le sigue Bajo Sombra (BS) con 46 años, La Laguna (LAG) con 36, Detrás de Bajo Sombra (DBS) con 29 y Pista de Aterrizaje (PA) con 23 años desde que se dejó en regeneración natural.

La obtención de los datos de campo se realizó en el mes de abril de 2023, durante la época seca, por lo que la fenología del bosque en ese momento obedecía al comportamiento esperado para las condiciones dadas, árboles con poca cobertura foliar debido a la abundancia de especies deciduas.

### Plantaciones Forestales

La toma de datos de las plantaciones forestales se realizó en los cantones de Pococí y San Carlos, en los distritos de Guápiles y Pocosol respectivamente (Fig. 2), en total se caracterizaron 5 plantaciones forestales de melina (*Gmelina arborea* Roxb) en diferentes etapas de desarrollo. De las plantaciones ubicadas en Pocosol, se tomaron dos muestras, PL1 que corresponde a una plantación con sólo un año de establecida y MIX la cual es una plantación igualmente joven, pero con árboles de teca (*Tectona grandis* L. F) intercalados entre cada árbol de melina. Ambos sitios tienen las características de plantaciones recién establecidas, árboles bajos (6,6 m en promedio) y un dosel abierto. En el sector de Guápiles, se obtuvieron tres diferentes muestras, PL2 corresponde a una plantación de poco menos de dos años de edad pero con

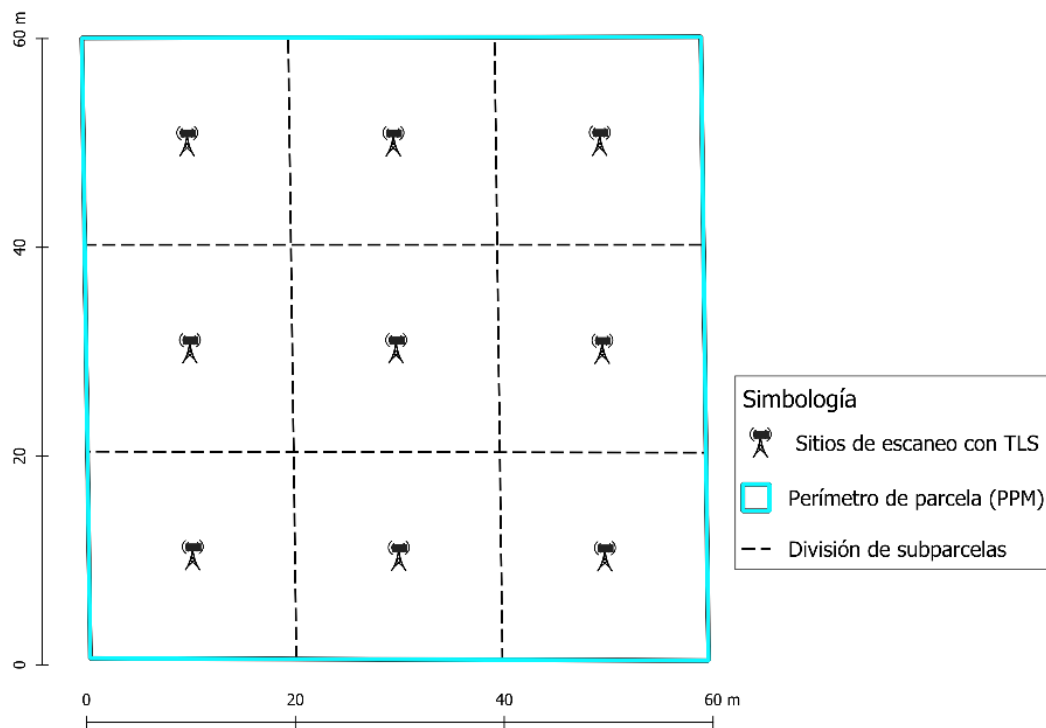
árboles de 14 m de altura en promedio y una cobertura casi total del dosel, PL3 es una plantación de mayor edad que PL2, con una altura total promedio de 16,6 m, esta plantación también presenta un dosel cerrado por la cobertura del follaje, la tercera muestra es ENF la cual fue establecida al mismo tiempo que PL3 pero presenta una alta mortalidad debido a la infección de patógenos causantes de la muerte de la melina, tiene una altura similar a PL3 pero el crecimiento de los árboles es muy irregular y no hay un cierre total de las copas debido a la alta mortalidad.



**Figura 2.** Ubicación de los puntos de escaneo realizados en bosque seco tropical y plantaciones forestales.

### Diseño muestral y captura de información

La evaluación se llevó a cabo mediante el uso del escáner laser terrestre (TLS) Faro Focus 3D S120 (Faro Technologies Inc., Lake Mary, FL, USA), utilizando la metodología de escaneo simple. De esta manera, para la caracterización del BsT, se realizó un escaneo en el centro de cada subparcela de 400 m<sup>2</sup>, resultando en 9 unidades muestrales (UM) para cada PPM de 3600 m<sup>2</sup>, para un total de 90 UM.



**Figura 3.** Distribución de los puntos de escaneo dentro de la PPM.

Para la ubicación de cada punto de escaneo dentro de las parcelas de BsT, se utilizó un sistema de posicionamiento GNSS de la marca CHCNAV, conformado por una antena base i50 y un receptor móvil i73, permitiendo alcanzar una precisión centimétrica aún debajo del dosel del bosque. Para la localización de los centros de

las subparcelas se realizó el levantamiento de las cuatro esquinas de la PPM, tomando un punto de referencia en cada una de las balizas colocadas desde el establecimiento de las parcelas, posteriormente se realizó un trazado de polilíneas utilizando el visor CAD en el colector de datos del receptor móvil CHCHNAV i73 para el levantamiento digital de los centros de cada subparcela, permitiendo una muy eficiente localización de los puntos de escaneo en campo.

En cada uno de los puntos de escaneo se obtuvieron las coordenadas de posicionamiento en proyección CRTM05 y se marcó en campo con una baliza de bambú pintada de color rojo y debidamente rotulada con cinta topográfica, para facilitar la reproducibilidad de este estudio y para habilitar un posible estudio multitemporal en el futuro.

Para la caracterización estructural de las plantaciones forestales la metodología fue similar, sin embargo, al no existir parcelas previamente establecidas no se debió ajustar a un área determinada, por lo que se establecieron parcelas temporales del mismo tamaño que las PPM de BsT en cada uno de los sitios, respetando el espaciamiento ente puntos de escaneo, el área total de 3600 m<sup>2</sup> y 9 escaneos por parcela (Fig. 3).

### **Procesamiento y análisis de los datos**

Los datos obtenidos del TLS se sometieron a un preprocesamiento y filtrado para eliminar puntos con reflectancia y posicionamiento erróneo. Este proceso se realizó utilizando el software propio de la marca del sensor FaroScene (Vers. 5, Faro Technologies Inc., Lake Mary, FL, USA). Como segundo paso se exportó la información como archivos de nubes de puntos con posicionamiento x, y, z, reduciendo la resolución a un dieciseisavo de la resolución original para reducir el tiempo de procesamiento. Las nubes de puntos luego fueron importadas al software Mathematica (Wolfram Research, Champaign, USA), para extraer las variables de interés (ENL,

Altura de dosel, SSCI y % de Apertura de dosel) a partir de la metodología presentada por [42].

ENL es la variable que describe la ocupación de los componentes arbóreos en capas de un metro de alto en relación con el espacio total ocupado por el dosel [24], esta medición primeramente cuantifica el número de capas verticales y luego le asigna un peso a cada una según la cantidad de biomasa de cada capa basándose en el índice inverso de Simpson [41]. Mayores valores para el ENL se obtienen con el incremento en la altura del dosel y una distribución más homogénea de los componentes arbóreos en la misma, permitiendo cuantificar de manera simple y objetiva la estructura vertical del bosque [24]. Para la computación del ENL el algoritmo primero extrae la altura máxima de cada nube de puntos, esta se exporta como una variable adicional que se llamó Altura de dosel.

El SSCI evalúa el grado de heterogeneidad de la biomasa distribuida en un espacio tridimensional, tomando en cuenta el patrón espacial y la distribución de los componentes de un bosque en el espacio disponible [39], [41], donde un mayor valor en el índice representa una mayor diversidad en tamaños de los árboles y morfología de sus copas [40]–[42]. La computación del SSCI se basa en la complejidad de forma de polígonos trazados sobre secciones transversales de la nube de puntos, la cual se cuantifica usando un estimado de la dimensión fractal la cual relaciona el perímetro con el área de cada uno de estos polígonos, estos polígonos de secciones transversales se obtienen al dividir la nube de puntos de cada UM en sectores azimutales de aproximadamente  $0,14^\circ$  y conectando cada punto contenido en el sector azimutal con líneas rectas a lo largo de todo el hemisferio, desde los  $0^\circ$  hasta el zénit a  $90^\circ$  y continuando desde este punto hasta los  $180^\circ$ , al dividir cada vista periférica en sectores de aproximadamente  $0,14^\circ$  se obtienen 1280 pares de sectores azimutales, para los cuales se obtiene la dimensión fractal de cada polígono formado y se promedia para obtener una medida de complejidad estructural para cada escaneo (para mayor detalle revisar [39], [42]), sin embargo, la dimensión fractal es una medida de complejidad estructural que por sí sola carece de escala espacial, por lo que es

necesario escalar estos resultados con el logaritmo natural del ENL de cada escaneo, para más detalles acerca del ENL revisar [24]. Tras haber concluido la computación del algoritmo, se obtiene un archivo de formato CSV en el cual se generan las variables ENL, SSCI y apertura del dosel para cada escaneo analizado, permitiendo el análisis posterior de todos los valores obtenidos en el estudio.

Para la caracterización horizontal del bosque, una de las variables con las que se puede asociar el estado de crecimiento y desarrollo es el porcentaje de apertura del dosel, esta representa el material vegetal presente dentro de un cono invertido de 60° de apertura directamente sobre el punto dónde se realizó el escaneo láser. De esta manera, se puede obtener una variable que relaciona la presión que ejercen los árboles vecinos sobre un árbol estudiado en específico o una posible regeneración en la apertura del dosel donde se realizó la medición [43].

## **Análisis estadístico**

### Bosque seco tropical

Se realizaron las pruebas de análisis de normalidad de datos de Shapiro-Wilk y análisis de varianza de Bartlett, para los datos de las variables en estudio, donde se obtuvo que tanto Altura de dosel, ENL y SSCI presentan datos con distribución normal y varianzas homogéneas, sin embargo, la variable apertura del dosel no cumple estos supuestos.

Para el estudio estadístico se realizó un análisis de varianza de un factor, ANOVA, para las variables paramétricas (Altura de dosel, ENL y SSCI), las cuales fueron contrastadas entre sí mediante un test de comparaciones múltiples de Tukey, mientras que, para la evaluación de significancia de la variable no paramétrica (Apertura de dosel), se realizó la prueba de Kruskal-Wallis. Todos las pruebas estadísticas y gráficos de cajas de las diferentes muestras fueron generados utilizando el software Rstudio versión 2023.03.1+446.

## Plantaciones forestales

Las pruebas de normalidad y homocedasticidad realizadas para las variables obtenidas de plantaciones forestales sugieren que los datos son no paramétricos. Se realizó la prueba de Kruskal-Wallis para probar la significancia de las diferencias estadísticas entre las variables y la prueba de Dunn para realizar las comparaciones entre todos los pares de sitios. Todos las pruebas estadísticas y gráficos de cajas de las diferentes muestras fueron generados utilizando el software Rstudio versión 2023.03.1+446.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

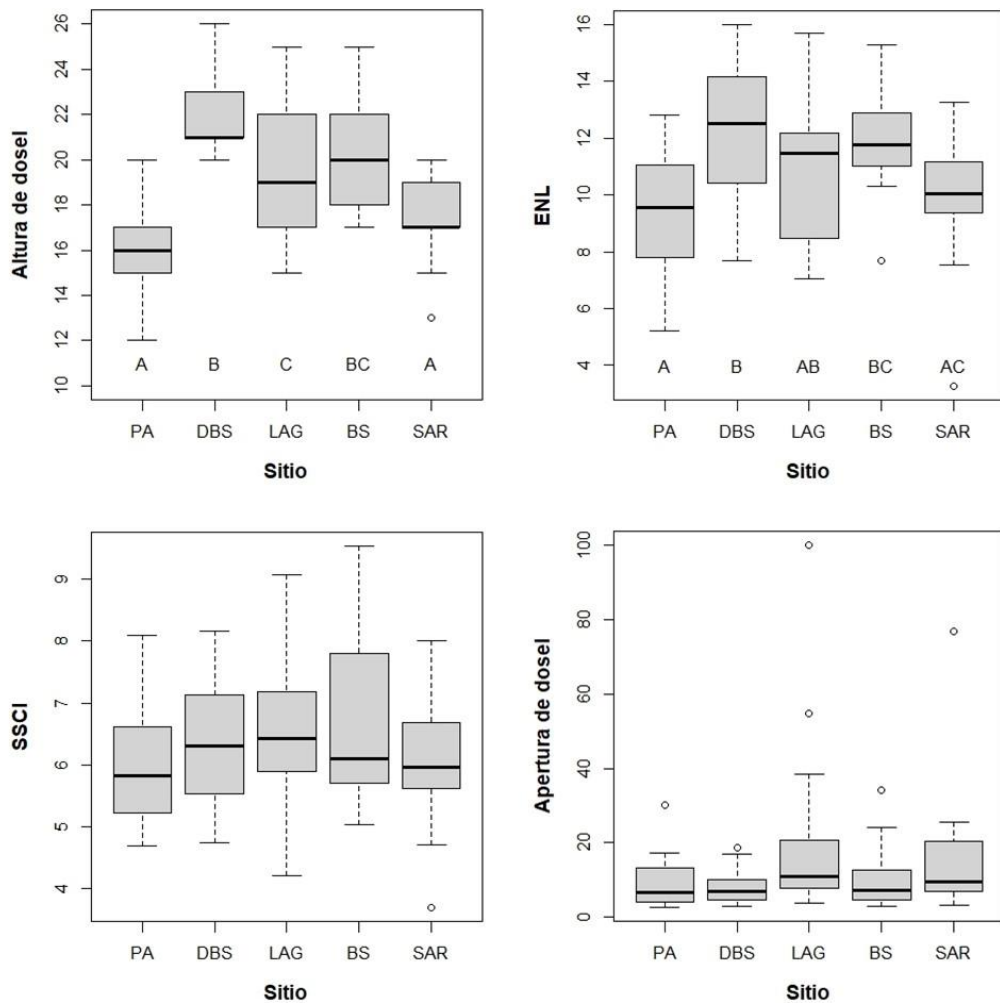
### Caracterización de bosque seco tropical

El análisis de varianza arrojó que el principal efecto del sitio es estadísticamente significativo para las variables Altura de dosel ( $F_{(4, 85)} = 20,63$ ;  $p < 0,001$ ) y ENL ( $F_{(4, 85)} = 4,97$ ;  $p = 0,001$ ). El resultado de la prueba de comparaciones múltiples de Tukey entre los sitios se puede observar en la parte inferior de los gráficos, donde las letras diferentes representan la diferencia significativa entre los sitios (Fig. 4).

Para la variable SSCI, no hay un efecto estadísticamente significativo entre el sitio y los valores de esta variable ( $F_{(4,85)} = 1,19$ ;  $p = 0,319$ ). En cuanto a la variable Apertura de dosel, se realizó la prueba estadística no paramétrica de Kruskal-Wallis, dando como resultado que no existen diferencias significativas entre el sitio y los valores obtenidos para la apertura del dosel ( $X^2 = 7,08$ ;  $p = 0,132$ ).

Al analizar los resultados estadísticos y la distribución de los datos para todas las variables, es difícil observar alguna tendencia normal en el comportamiento de los datos con respecto al sitio de estudio. Lejos de observar tendencias lineales o logarítmicas al graficar cada una de las variables con la edad de sucesión de los sitios, se observa un comportamiento fluctuante en las variables Altura de dosel y ENL, las cuales fueron las que presentaron diferencias estadísticamente significativas entre los

sitios. Siendo PA el sitio con menor tiempo en regeneración, es esperable que las diferencias en estas variables sean positivas entre PA-DBS y PA-BS, pero es contraintuitivo que la diferencia entre DBS-SAR sea negativa, ya que SAR es el sitio con mayor tiempo en regeneración, por este motivo no hay una relación entre esas diferencias que se pueda asociar al tiempo en que estos sitios han estado en el proceso de regeneración pasiva.



**Figura 4.** Gráficos de cajas para los resultados obtenidos de las variables Altura de dosel, ENL, SSCI y apertura de dosel, para cada sitio evaluado (sitios ordenados de menor a mayor tiempo en regeneración, izquierda a derecha en el eje x).

El comportamiento esperado al evaluar una cronosecuencia de bosque natural, al menos para las variables Apertura del dosel, ENL y SSCI, corresponde a una tendencia de aumento proporcional al incremento en edad, ya que se ha demostrado que los BsT incrementan sus valores de altura, densidad y complejidad conforme avanzan en la sucesión [10], [11], caso contrario para la variable Apertura de dosel, cuyo comportamiento esperado corresponde a una disminución en el porcentaje de apertura conforme aumenta la edad de regeneración del sitio [32], sin embargo, este no es el caso para la cronosecuencia de BsT evaluada.

Estos resultados sugieren que no ha habido un crecimiento en la estructura vertical ni la complejidad estructural de los sitios proporcional al tiempo de regeneración o etapa de sucesión, sin embargo, hubo un suceso clave que pudo haber sido el responsable de la interrupción del proceso de sucesión de todos los sitios de estudio, este fue el huracán Otto, el cual impactó la zona del pacífico norte de Costa Rica en la tarde del 24 de noviembre de 2016 [49] generando grandes cambios en la estructura horizontal y vertical de bosques primarios y secundarios en el país [50], [51].

Es bien sabido que el impacto de los huracanes en bosque tropicales genera cambios importantes en su estructura y composición florística, además, generan alteraciones en los procesos ecosistémicos naturales de los bosques [52], principalmente en la estructura vertical debido a la caída y descopa de individuos, así como la importante defoliación que generan los fuertes vientos [53], esto genera cambios en la estructura boscosa no sólo de manera inmediata, sino que con repercusiones a futuro. Una de las consecuencias del disturbio que causan los huracanes sobre los bosques es la infestación de las lianas o bejucos [1], [54], para las cuales se ha evidenciado que en bosques secundarios tropicales tienen una mayor abundancia en los estadios sucesionales jóvenes [55].

La abundancia de las lianas aumenta con las perturbaciones que enfrentan los bosques, principalmente en los bosques secundarios [1], [56], e incrementa en sitios con poca precipitación y una marcada estacionalidad, haciendo de los bosques secos

tropicales en sucesión un ecosistema ideal para las lianas [57]. Así mismo, a pesar de que las lianas ocupan alrededor de un 10% de la biomasa sobre el suelo, representan hasta un 40% de la producción de hojas [8], esto genera que un bosque con una infestación de lianas cambie la naturaleza de su estructura al aleatorizar el espacio que ocupan para crecer, aumentando la aleatoriedad de la ocupación del espacio al aumentar la abundancia de lianas [32]. Esta conducta pudo ser un factor que influyó el comportamiento de los datos con respecto a variables observables en la Fig. 4, ya que durante la toma de datos en campo se evidenció una importante presencia de lianas en todos los sitios de estudio.

Por otra parte, los resultados obtenidos para la caracterización del BsT sí coinciden con otros estudios realizados bajo condiciones similares. En los trabajos [8], [56] se determinó que los sitios con infestación de lianas presentan un dosel más heterogéneo que los sitios sin infestación de lianas, con alturas de dosel entre los 10 y 25 metros.

En cuanto al SSCI, en el estudio [39] se presentan patrones globales para esta variable en distintos tipos de cobertura, donde los resultados obtenidos se ajustan a los patrones esperados para bosques secos neotropicales. Para la variable Apertura de dosel, el trabajo [32] presenta resultados para sitios con leve y alta infestación de lianas, donde se obtuvieron resultados dentro del mismo rango que en este estudio.

### **Caracterización de plantaciones forestales**

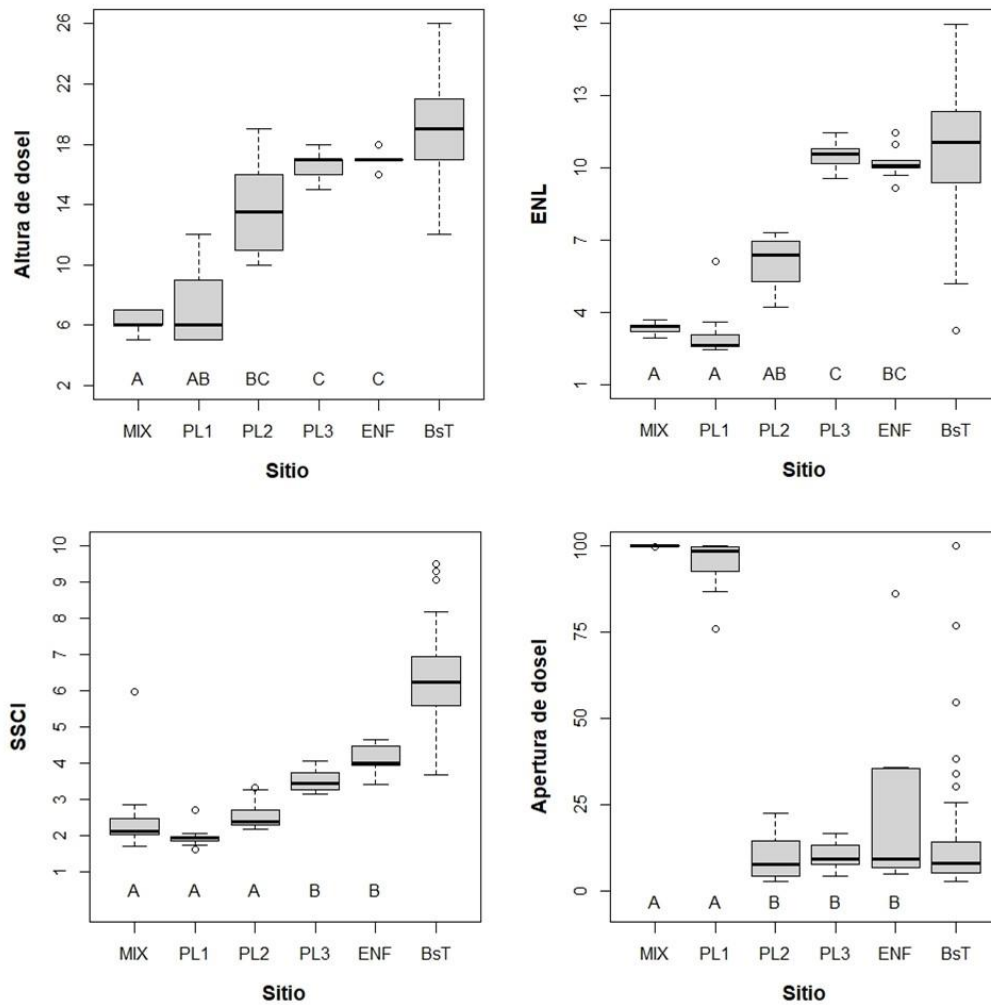
Los resultados de las pruebas de Kruskal-Wallis indicaron que para todas las variables existen diferencias significativas al menos entre un par de grupos, con los siguientes resultados estadísticos para Altura de dosel ( $X^2 = 42,21$ ;  $p = 1,51 \times 10^{-8}$ ), ENL ( $X^2 = 53,87$ ;  $p = 5,60 \times 10^{-11}$ ), SSCI ( $X^2 = 45,56$ ;  $p = 3,04 \times 10^{-9}$ ) y Apertura de dosel ( $X^2 = 39,26$ ;  $p = 6,14 \times 10^{-8}$ ).

Las pruebas de Dunn para relaciones pareadas entre grupos arrojaron los pares de sitios para los cuales existen o no diferencias significativas, estos resultados se pueden observar en la Figura 5 sobre el borde inferior de cada uno de los gráficos, indicado

con letras mayúsculas, donde los sitios que comparten las mismas letras no presentan diferencias significativas entre los resultados de las variables, mientras que para los sitios con letras distintas, los resultados de las variables presentan diferencias significativas entre sitios. Para las pruebas estadísticas entre las plantaciones forestales, no se incluyeron los datos de BsT por pertenecer a un ecosistema diferente y para evitar una mala interpretación de los resultados, sin embargo, se incluyó en todos los gráficos como un sitio aparte para que sirva como punto de comparación con los resultados obtenidos en plantaciones, por este motivo el sitio BsT no tiene una letra indicada para las diferencias entre pares.

Al observar la Figura 5, es evidente la tendencia en el crecimiento para las variables Altura de dosel, ENL y SSCI, proporcional al aumento en edad de las plantaciones (principalmente para los sitios PL1, PL2, PL3 que son los que responden a la gradiente edad y no diferencias en manejo). Caso contrario para la variable Apertura de dosel, donde se puede observar una diferencia drástica entre las dos plantaciones más jóvenes (MIX y PL1) que aún no tienen un tamaño de copa suficientemente grande para cerrar el dosel, con respecto al resto de plantaciones con un dosel cerrado. Cabe resaltar el resultado de la plantación ENF, la cual para la variable Apertura de dosel presenta una gran variabilidad en la muestra con resultados mucho más altos que la plantación PL3 que tiene la misma edad, esto se debe a la enfermedad presente en la plantación que causa la defoliación de los árboles y una alta mortalidad que genera aperturas en el dosel.

Otro patrón interesante se puede observar al comparar la estructura vertical y complejidad de las plantaciones más jóvenes. Se puede observar que PL1 presenta lecturas mayores para Altura de dosel que MIX, sin embargo, este comportamiento se invierte para las variables ENL y SSCI, esto se debe a que la plantación mixta presenta una mejor distribución de la biomasa en el eje vertical ya que cada especie ocupa un estrato altitudinal diferente, aumentando los valores de complejidad y ENL.



**Figura 5.** Gráficos de cajas para los resultados obtenidos de las variables Altura de dosel, ENL, SSCI y apertura del dosel, para las diferentes plantaciones forestales evaluadas y el BsT.

Es importante resaltar que en las variables Altura de dosel, ENL y SSCI los valores obtenidos para el BsT tienen una desviación mucho más alta que todas las plantaciones, este es el patrón esperado considerando que el BsT estudiado posee una gran variabilidad no sólo entre las distintas etapas de sucesión sino también dentro de una misma parcela, mientras que las plantaciones forestales son paisajes artificiales cuyo objetivo es el aprovechamiento de madera, por lo que su homogeneidad y sencillas estructural forman parte de su esencia. Teniendo esto en

cuenta se puede considerar el uso del TLS para evaluar el manejo de plantaciones forestales.

## **CONCLUSIONES**

La caracterización estructural del BsT estudiado sugiere que no existe un patrón en el comportamiento de las variables evaluadas atribuible al tiempo de sucesión de los diferentes sitios de estudio, la heterogeneidad de la cobertura y la infestación de lianas influyó en los resultados obtenidos.

La caracterización estructural de las plantaciones forestales presenta resultados contrastantes entre distintas etapas de desarrollo en las plantaciones y contra el BsT, permitiendo observar diferencias significativas entre las etapas de crecimiento y entre los tipos de cobertura para todas las variables.

## **RECOMENDACIONES**

Repetir la metodología aplicada en este estudio para poder medir el cambio en las variables para cada sitio con el avance en la sucesión del bosque.

Realizar estudios similares en época lluviosa o en bosques húmedos tropicales para poder comparar los valores de las variables evaluadas en bosques con características contrastantes al evaluado en este estudio.

Hacer uso del Anexo 1 de este documento llamado “Protocolo para el uso del Escáner Láser Terrestre (TLS) Faro Focus 3d 120s y el manejo de nubes de puntos de sistemas boscosos tropicales” para ampliar el uso del TLS para la evaluación de plantaciones forestales y sistemas agroforestales.

Promover la creación de nuevos índices enfocados en la caracterización de bosques neotropicales.

Adquirir nuevos equipos que utilicen la tecnología LiDAR en la EIFO para poder realizar estudios de manera independiente.

## REFERENCIAS

- [1] K. Stan and A. Sanchez-Azofeifa, "Tropical dry forest diversity, climatic response, and resilience in a changing climate," *Forests*, vol. 10, no. 5, May 2019, doi: 10.3390/f10050443.
- [2] P. G. Murphy and A. E. Lugo, "Ecology of Tropical Dry Forest," *Annu Rev Ecol Syst*, vol. 17, pp. 67–88, 1986, [Online]. Available: <https://www.jstor.org/stable/2096989?seq=1&cid=pdf->
- [3] L. Miles *et al.*, "A global overview of the conservation status of tropical dry forests," *J Biogeogr*, vol. 33, no. 3, pp. 491–505, Mar. 2006, doi: 10.1111/j.1365-2699.2005.01424.x.
- [4] J. Aguirre-Gutiérrez *et al.*, "Long-term droughts may drive drier tropical forests towards increased functional, taxonomic and phylogenetic homogeneity," *Nat Commun*, vol. 11, no. 1, Dec. 2020, doi: 10.1038/s41467-020-16973-4.
- [5] G. A. Sánchez-Azofeifa *et al.*, "Research priorities for neotropical dry forests," *Biotropica*, vol. 37, no. 4, pp. 477–485, Dec. 2005, doi: 10.1111/j.1744-7429.2005.00066.x.
- [6] K. Stan and A. Sanchez-Azofeifa, "Deforestation and secondary growth in Costa Rica along the path of development," *Reg Environ Change*, vol. 19, no. 2, pp. 587–597, Feb. 2019, doi: 10.1007/s10113-018-1432-5.
- [7] M. Quesada *et al.*, "Succession and management of tropical dry forests in the Americas: Review and new perspectives," *For Ecol Manage*, vol. 258, no. 6, pp. 1014–1024, Sep. 2009, doi: 10.1016/j.foreco.2009.06.023.
- [8] M. Duan, C. Bax, K. Laakso, N. Mashhadi, N. Mattie, and A. Sanchez-Azofeifa, "Characterizing Transitions between Successional Stages in a Tropical Dry Forest Using LiDAR Techniques," *Remote Sens (Basel)*, vol. 15, no. 2, Jan. 2023, doi: 10.3390/rs15020479.
- [9] J. E. Díaz-Triana, S. Torres-Rodríguez, L. Muñoz-P., and A. Avella-M., "Monitoring of ecological restoration in an interandean dry tropical forest (Huila, Colombia): Program and preliminary results," *Caldasia*, vol. 41, no. 1, Universidad Nacional de Colombia, pp. 60–77, Jan. 01, 2019. doi: 10.15446/caldasia.v41n1.71318.
- [10] M. Kalacska, G. A. Sanchez-Azofeifa, B. Rivard, T. Caelli, H. P. White, and J. C. Calvo-Alvarado, "Ecological fingerprinting of ecosystem succession: Estimating secondary tropical dry forest structure and diversity using imaging spectroscopy,"

- Remote Sens Environ*, vol. 108, no. 1, pp. 82–96, May 2007, doi: 10.1016/j.rse.2006.11.007.
- [11] M. Kalacska, G. A. Sanchez-Azofeifa, J. C. Calvo-Alvarado, M. Quesada, B. Rivard, and D. H. Janzen, “Species composition, similarity and diversity in three successional stages of a seasonally dry tropical forest,” *For Ecol Manage*, vol. 200, pp. 227–247, Oct. 2004, doi: 10.1016/j.foreco.2004.07.001.
- [12] D. Carvajal-Vanegas and J. Calvo-Alvarado, “Tasas de crecimiento, mortalidad y reclutamiento de vegetación en tres estadios sucesionales del bosque seco tropical, Parque Nacional Santa Rosa, Costa Rica.,” *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, vol. 10, no. 25, pp. 1–12, 2013.
- [13] M. Uriarte, C. D. Canham, J. Thompson, and J. K. Zimmerman, “A Neighborhood Analysis of Tree Growth and Survival in a Hurricane-Driven Tropical Forest,” *Ecol Monogr*, vol. 74, no. 4, pp. 591–614, 2004.
- [14] D. Delgado *et al.*, “Análisis de la vulnerabilidad al cambio climático de bosques de montaña en Latinoamérica: un punto de partida para su gestión adaptativa,” 2016. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/11554/8496>
- [15] V. L. López, M. P. Flores, S. Sharry, and J. M. Cellini, “Estructura vertical y horizontal en dos bosques de *Polylepis tarapacana* con diferentes situaciones ambientales,” *Historia Natural*, vol. 10, no. 2, pp. 165–173, 2020.
- [16] A. N. Shiklomanov *et al.*, “Enhancing global change experiments through integration of remote-sensing techniques,” *Front Ecol Environ*, vol. 17, no. 4, pp. 215–224, May 2019, doi: 10.1002/fee.2031.
- [17] N. Camarretta *et al.*, “Monitoring forest structure to guide adaptive management of forest restoration: a review of remote sensing approaches,” *New For (Dordr)*, vol. 51, no. 4, pp. 573–596, Jul. 2020, doi: 10.1007/s11056-019-09754-5.
- [18] S. Sofia, F. G. Maetzke, M. Crescimanno, A. Coticchio, D. S. La Mela Veca, and A. Galati, “The efficiency of LiDAR HMLS scanning in monitoring forest structure parameters: implications for sustainable forest management,” *EuroMed Journal of Business*, vol. 17, no. 3, pp. 350–373, Aug. 2022, doi: 10.1108/EMJB-01-2022-0017.
- [19] N. Mehendale and S. Neoge, “Review on LiDAR technology,” *SSRN Electronic Journal*, 2020, [Online]. Available: <https://ssrn.com/abstract=3604309>
- [20] M. N. Bazezew, Y. A. Hussin, E. H. Kloosterman, I. M. Hasmadi, T. Soromessa, and M. S. Adan, “Factual approach for tropical forest parameters measurement and monitoring: future option with a focus on synergetic use of airborne and

- terrestrial LiDAR technologies,” *Int J Remote Sens*, vol. 42, no. 9, pp. 3219–3230, 2021, doi: 10.1080/2150704X.2020.1862436.
- [21] M. Beland *et al.*, “On promoting the use of lidar systems in forest ecosystem research,” *For Ecol Manage*, vol. 450, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.foreco.2019.117484.
- [22] K. Lim, P. Treitz, M. Wulder, B. St-Onge, and M. Flood, “LiDAR remote sensing of forest structure,” *Prog Phys Geogr*, vol. 27, no. 1, pp. 88–106, 2003, doi: 10.1191/0309133303pp360ra.
- [23] E. Naesset, “Determination of mean tree height of forest stands using airborne laser scanner data,” *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, vol. 52, pp. 49–56, 1997.
- [24] M. Ehbrecht, P. Schall, J. Juchheim, C. Ammer, and D. Seidel, “Effective number of layers: A new measure for quantifying three-dimensional stand structure based on sampling with terrestrial LiDAR,” *For Ecol Manage*, vol. 380, pp. 212–223, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.foreco.2016.09.003.
- [25] E. Naesset and T. Økland, “Estimating tree height and tree crown properties using airborne scanning laser in a boreal nature reserve,” *Remote Sens Environ*, vol. 79, pp. 105–115, 2002, [Online]. Available: [www.elsevier.com/locate/rse](http://www.elsevier.com/locate/rse)
- [26] U. Okyay, J. Telling, C. L. Glennie, and W. E. Dietrich, “Airborne lidar change detection: An overview of Earth sciences applications,” *Earth Sci Rev*, vol. 198, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.earscirev.2019.102929.
- [27] M. Dalponte, T. Jucker, S. Liu, L. Frizzera, and D. Gianelle, “Characterizing forest carbon dynamics using multi-temporal lidar data,” *Remote Sens Environ*, vol. 224, pp. 412–420, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.rse.2019.02.018.
- [28] D. R. Alves de Almeida *et al.*, “Detecting successional changes in tropical forest structure using GatorEye drone-borne lidar,” *Biotropica*, vol. 52, no. 6, Nov. 2020, doi: 10.1111/btp.12814.
- [29] X. Liu, M. Chen, C. Tan, X. Zhang, and W. Yang, “Automatic stem mapping using single-scan terrestrial laser scanning data and Mean Shift clustering,” *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, vol. 865, no. 1, Oct. 2021, doi: 10.1088/1755-1315/865/1/012015.
- [30] R. Astrup, M. J. Ducey, A. Granhus, T. Ritter, and N. von Lüpke, “Approaches for estimating stand-level volume using terrestrial laser scanning in a single-scan mode,” *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 44, no. 6, pp. 666–676, 2014, doi: 10.1139/cjfr-2013-0535.

- [31] C. Alonso-Rego *et al.*, “Estimating Stand and Fire-Related Surface and Canopy Fuel Variables in Pine Stands Using Low-Density Airborne and Single-Scan Terrestrial Laser Scanning Data,” *Remote Sens (Basel)*, vol. 13, no. 24, Dec. 2021, doi: 10.3390/rs13245170.
- [32] G. A. Sánchez-Azofeifa *et al.*, “Can terrestrial laser scanners (TLSs) and hemispherical photographs predict tropical dry forest succession with liana abundance?,” *Biogeosciences*, vol. 14, no. 4, pp. 977–988, Mar. 2017, doi: 10.5194/bg-14-977-2017.
- [33] M. Åkerblom and P. Kaitaniemi, “Terrestrial laser scanning: A new standard of forest measuring and modelling?,” *Ann Bot*, vol. 128, no. 6, pp. 653–662, Nov. 2021, doi: 10.1093/aob/mcab111.
- [34] X. Liang, P. Litkey, J. Hyyppä, H. Kaartinen, M. Vastaranta, and M. Holopainen, “Automatic stem mapping using single-scan terrestrial laser scanning,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 50, no. 2, pp. 661–670, Feb. 2012, doi: 10.1109/TGRS.2011.2161613.
- [35] A. E. L. Stovall, K. J. Anderson-Teixeira, and H. H. Shugart, “Assessing terrestrial laser scanning for developing non-destructive biomass allometry,” *For Ecol Manage*, vol. 427, pp. 217–229, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.foreco.2018.06.004.
- [36] T. P. Pitkänen, P. Raunonen, and A. Kangas, “Measuring stem diameters with TLS in boreal forests by complementary fitting procedure,” *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 147, pp. 294–306, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.isprsjprs.2018.11.027.
- [37] D. Seidel, M. Ehbrecht, and K. Puettmann, “Assessing different components of three-dimensional forest structure with single-scan terrestrial laser scanning: A case study,” *For Ecol Manage*, vol. 381, pp. 196–208, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.foreco.2016.09.036.
- [38] J. A. Molina-Valero *et al.*, “Operationalizing the use of TLS in forest inventories: The R package FORTLS,” *Environmental Modelling and Software*, vol. 150, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.envsoft.2022.105337.
- [39] M. Ehbrecht *et al.*, “Global patterns and climatic controls of forest structural complexity,” *Nat Commun*, vol. 12, no. 1, Dec. 2021, doi: 10.1038/s41467-020-20767-z.
- [40] D. Seidel, M. Stiers, M. Ehbrecht, M. Werning, and P. Annighöfer, “On the structural complexity of central European agroforestry systems: a quantitative assessment using terrestrial laser scanning in single-scan mode,” *Agroforestry Systems*, vol. 95, no. 4, pp. 669–685, Apr. 2021, doi: 10.1007/s10457-021-00620-y.

- [41] D. Seidel, P. Annighöfer, M. Ehbrecht, P. Magdon, S. Wöllauer, and C. Ammer, “Deriving stand structural complexity from airborne laser scanning data-what does it tell us about a forest?,” *Remote Sens (Basel)*, vol. 12, Jun. 2020, doi: 10.3390/rs12111854.
- [42] M. Ehbrecht, P. Schall, C. Ammer, and D. Seidel, “Quantifying stand structural complexity and its relationship with forest management, tree species diversity and microclimate,” *Agric For Meteorol*, vol. 242, pp. 1–9, Aug. 2017, doi: 10.1016/j.agrformet.2017.04.012.
- [43] D. Seidel, N. Hoffmann, M. Ehbrecht, J. Juchheim, and C. Ammer, “How neighborhood affects tree diameter increment - New insights from terrestrial laser scanning and some methodical considerations,” *For Ecol Manage*, vol. 336, pp. 119–128, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.foreco.2014.10.020.
- [44] L. R. Holdridge, *Life zone ecology*, no. (rev. ed.). Tropical Science Center, 1967.
- [45] J. Pacheco-Quesada, “Estructura horizontal, dinámica y composición de una cronosecuencia de bosque seco tropical secundario de distintas fases sucesionales en la Estación Experimental Forestal Horizontes, Guanacaste, Costa Rica,” Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2021.
- [46] P. Rigg-Aguilar, “Propuesta de línea base del plan de ordenamiento forestal para la Estación Experimental Forestal Horizontes, Área de Conservación Guanacaste, Costa Rica,” Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2013.
- [47] P. Spittler, *Potencial de manejo de los bosques secundarios en la zona seca del noroeste de Costa Rica*. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit, 2001.
- [48] D. Reyes-Cordero, “Análisis de los procesos de restauración pasiva para un bosque seco tropical en la Estación Experimental Forestal Horizontes, Guanacaste, Costa Rica,” Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2012.
- [49] A. Brenes Maykall, “Gestión del riesgo en Costa Rica e impactos del huracán Otto.” 2017.
- [50] J. A. Araya Orozco, “Efectos del Huracán Otto sobre la Estructura y Composición Florística de un Bosque Primario en Boca Tapada de San Carlos, Costa Rica,” Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, 2017.
- [51] E. Fallas-Montero and B. Vílchez-Alvarado, “Regeneración de un bosque secundario afectado por el Huracán Otto en Costa Rica,” *Rev Biol Trop*, vol. 69, no. 2, pp. 717–732, Apr. 2021, doi: 10.15517/rbt.v69i1.42080.

- [52] E. V. J. Tanner, V. Kapos, and J. R. Healey, "Hurricane Effects on Forest Ecosystems in the Caribbean," *Biotropica*, pp. 513–521, 1991, [Online]. Available: <http://www.jstor.org>URL:<http://www.jstor.org/stable/2388274>
- [53] O. Sánchez Sánchez and G. A. Islebe, "Hurricane Gilbert and structural changes in a tropical forest in south-eastern Mexico," *Global Ecology and Biogeography*, vol. 8, pp. 29–38, 1999, [Online]. Available: <http://www.blackwell-science.com/geb>
- [54] S. A. Schnitzer and F. Bongers, "Increasing liana abundance and biomass in tropical forests: Emerging patterns and putative mechanisms," *Ecol Lett*, vol. 14, no. 4, Apr. 2011, doi: 10.1111/j.1461-0248.2011.01590.x.
- [55] S. J. Dewalt, S. A. Schnitzer, and J. S. Denslow, "Density and Diversity of Lianas along a Chronosequence in a Central Panamanian Lowland," *J Trop Ecol*, vol. 16, no. 1, pp. 1–19, 2000, [Online]. Available: <http://www.jstor.org/stable/3068829>
- [56] B. Tymen *et al.*, "Evidence for arrested succession in a liana-infested Amazonian forest," *Journal of Ecology*, vol. 104, no. 1, pp. 149–159, Jan. 2016, doi: 10.1111/1365-2745.12504.
- [57] S. A. Schnitzer, "A mechanistic explanation for global patterns of liana abundance and distribution," *Am Nat*, vol. 166, no. 2, pp. 262–276, Aug. 2005, doi: 10.1086/431250.



# Protocolo para el uso del Escáner Láser Terrestre (TLS) Faro Focus 3d 120s y el manejo de nubes de puntos de sistemas boscosos tropicales

Orlando Jiménez-Méndez

Mayo 2023



## Índice general

Índice de figuras .....	ii
1. Generalidades.....	1
1.1. Definiciones .....	1
1.2. Tecnología LiDAR y TLS.....	1
2. Escáner Láser Terrestre Faro Focus 3d 120s.....	3
2.1. Componentes del equipo .....	4
2.2. Cuidados del equipo .....	6
2.2.1. Baterías .....	6
2.2.2. Unidad de sensor .....	7
2.2.3. Consideraciones ambientales .....	7
3. Metodologías de escaneado utilizando el TLS .....	8
3.1. Montaje y configuración del equipo.....	9
3.2. Proceso de escaneado .....	12
3.3. Exportación de los archivos obtenidos.....	16
4. Visualización y manejo de las nubes de puntos utilizando CloudCompare.....	16
4.1. Visualización de las nubes de puntos .....	17
4.2. Seccionar la nube de puntos .....	20
4.3. Medir distancia entre puntos .....	22
4.4. Medición de variables dasométricas .....	23
4.4.1. Altura .....	23
4.4.2. Diámetro de fuste.....	25
4.4.3. Número de árboles.....	27
5. Análisis avanzado de las nubes de puntos.....	28
6. Referencias bibliográficas .....	30

## Índice de figuras

Figura 1. Visualización de una nube de puntos de un bosque seco tropical obtenida con TLS. _____	3
Figura 2. Rango de dispersión de disparos láser del TLS (Faro Technologies, 2019). _	4
Figura 3. Caja protectora de transporte y contenido, con la unidad de escáner, baterías, cargador y llave Allen. _____	5
Figura 4. Cargador y batería de Escáner Láser Terrestre. _____	6
Figura 5. Sensor montado en trípode y acercamiento a la base con tornillo y llave de ajuste. _____	10
Figura 6. Vista de la pantalla en el menú principal del Escáner Láser Terrestre. _____	11
Figura 7. Vista previa de la nube de puntos de un escaneo. _____	12
Figura 8. Mensaje de advertencia de inclinación fuerte. _____	14
Figura 9. Pantalla de progreso del escaneo en ejecución. _____	15
Figura 10. Definir las columnas con información espacial (coordenadas x, y, z) en el programa CloudCompare. _____	18
Figura 11. Vista principal del programa CloudCompare. _____	19
Figura 12. Visualización de la herramienta de Sección transversal. _____	21
Figura 13. Proceso de extracción de secciones transversales. _____	22
Figura 14. Herramienta seleccionar puntos en CloudCompare. _____	23
Figura 15. Medición de la altura comercial de un árbol utilizando la herramienta Selecciona puntos en CloudCompare. _____	25
Figura 16. Extracción de segmento del fuste para medición del diámetro. _____	26
Figura 17. Medición del diámetro de la sección del fuste a la altura deseada. _____	27
Figura 18. Proceso de extracción de secciones de fustes para conteo de árboles. ____	28

# 1. Generalidades

## 1.1. Definiciones

**LiDAR:** (Light Detection and Ranging por sus siglas en inglés) es la tecnología que permite medir distancias desde un emisor láser hasta los objetos a su alrededor dentro del rango de visión, utiliza pulsos láser disparados hacia una dirección conocida y mide el tiempo de retorno del reflejo de esos pulsos para calcular la distancia entre el sensor y la superficie sólida detectada.

**Pulso láser:** Es un disparo individual de luz láser reflejada en un espejo para realizar una medición de distancia con un sensor TLS.

**TLS:** Un Escáner Láser Terrestre (TLS por sus siglas en inglés) es un dispositivo que utiliza tecnología LiDAR para medir la distancia entre los objetos sólidos a su alrededor.

**Nube de puntos:** Es un arreglo de puntos o vértices georreferenciados en un sistema de coordenadas tridimensional, representa la superficie de los objetos sólidos alcanzados y reflejados por cada pulso láser emitido por el TLS.

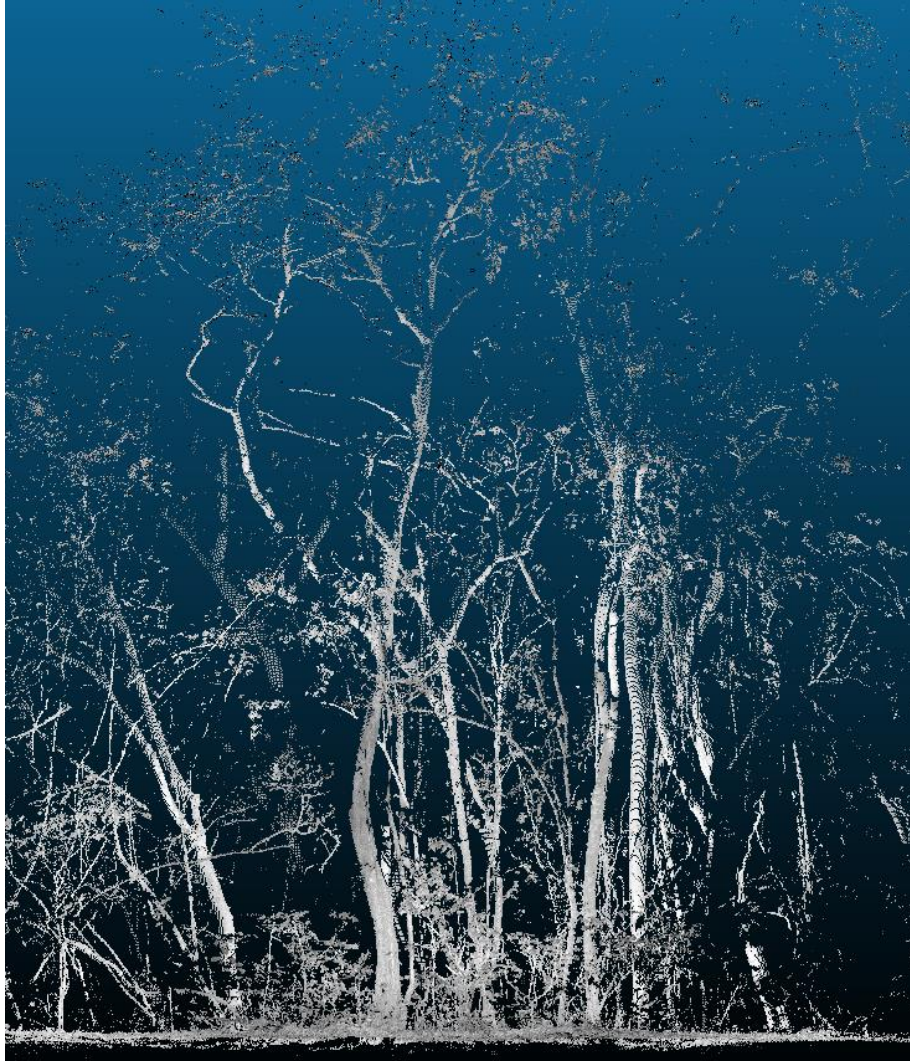
**Oclusión:** Se refiere al bloqueo de objetos lejanos o al efecto de sombra que causan los objetos cercanos al rango de vista del escáner, sobre los objetos que se encuentran detrás de este, impidiendo observarlos en la nube de puntos por no ser alcanzados por ningún pulso láser.

## 1.2. Tecnología LiDAR y TLS

El LiDAR es una tecnología de detección remota con gran potencial para ser utilizada en el monitoreo de bosques tropicales. Utiliza pulsos de luz láser para medir la distancia entre el sensor y la superficie del terreno o la vegetación, lo que permite crear un modelo

tridimensional de la estructura del bosque (Mehendale & Neoge, 2020; Sofia et al., 2022). Esta tecnología se puede aplicar desde vehículos aéreos para obtener una perspectiva por encima del dosel, o bien, desde el nivel del suelo con sensores fijos o móviles (Bazezew et al., 2021; Beland et al., 2019), proporcionando datos altamente precisos de los cuales se puede extraer información sobre la densidad y distribución de la vegetación, la estructura vertical de los bosques y la detección de cambios en la estructura del bosque a lo largo del tiempo (Dalponte et al., 2019; de Almeida et al., 2020; Okyay et al., 2019).

Una de las tecnologías LiDAR que ha demostrado éxito en la caracterización de bosques es el escáner láser terrestre (TLS). Este dispositivo genera una nube de puntos densa y detallada desde una posición por debajo del dosel (Beland et al., 2019; Liu et al., 2021). El TLS ha demostrado ser muy efectivo para la caracterización de la estructura de los árboles, permitiendo obtener información detallada sobre la forma, el diámetro y la altura de los árboles, así como sobre la densidad de la copa y el volumen de madera o combustible presente (Alonso-Rego et al., 2021; Astrup et al., 2014), lo que representa una oportunidad de estudiar nuevos estándares para el monitoreo forestal (Åkerblom & Kaitaniemi, 2021), permitiendo que la obtención de información objetiva, automatizada y de manera no invasiva, sea posible (Liang et al., 2012; Stovall et al., 2018).

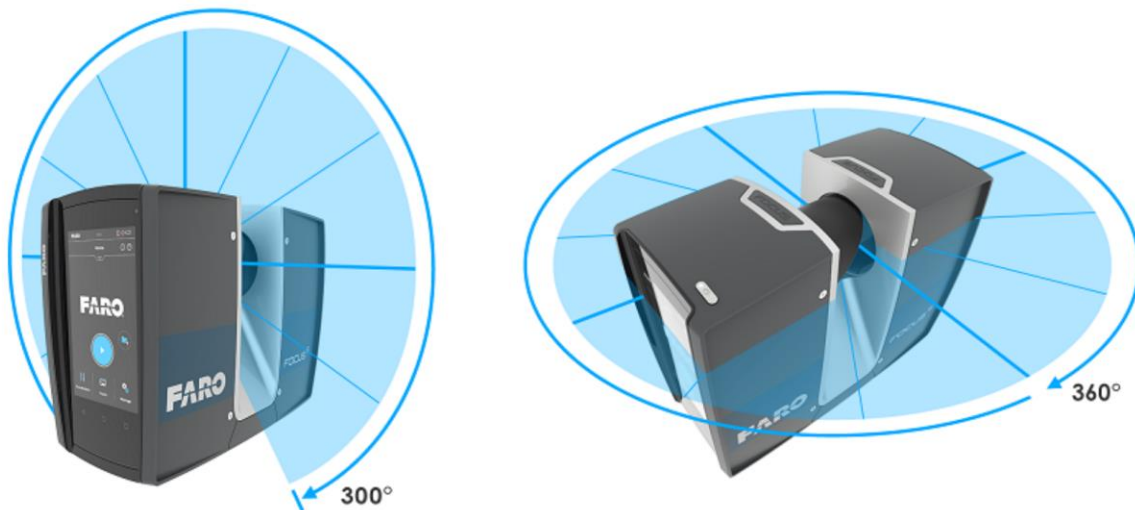


*Figura 6. Visualización de una nube de puntos de un bosque seco tropical obtenida con TLS.*

## **2. Escáner Láser Terrestre Faro Focus 3d 120s**

Este escáner utiliza tecnología LiDAR (Light Detection and Ranging) para crear escenas tridimensionales a base de nubes de puntos con errores milimétricos dentro del área de visión próxima. Esta nube de puntos se crea a partir del registro de la posición relativa de puntos de reflexión del láser emitido por el sensor. El haz láser emitido se refleja en un espejo giratorio, el cual lo dispersa en un rango vertical de 300 grados y un rango horizontal de 360 grados.

Después, el rayo láser regresa al escáner mediante la reflexión en los objetos que se encuentran en su trayectoria y se determina la distancia hacia los objetos que delimitan el área, así como los ángulos verticales y horizontales correspondientes. Los disparos láser tienen un alcance de hasta 120 metros y pueden tener una densidad desde 122 000 hasta 976 000 puntos por segundo, resultando en nubes de puntos súper densas formadas por millones de puntos, con información espacial y espectral obtenidas en lapsos de 2 a 3 minutos (Faro Technologies, 2012).



*Figura 7. Rango de dispersión de disparos láser del TLS (Faro Technologies, 2019).*

## **2.1. Componentes del equipo**

El sistema completo del escáner consta de la unidad del sensor, dos baterías de ion litio, un cargador para las baterías, una llave Allen de 5mm y un trípode.



*Figura 8. Caja protectora de transporte y contenido, con la unidad de escáner, baterías, cargador y llave Allen.*

Las baterías tienen una capacidad de 6.75 Ah y un voltaje de 14.4 V, las cuales tienen una autonomía de hasta 5 horas cada una. Estas se recargan utilizando el cargador incorporado que consta de 3 partes, la base donde se conecta la batería, la fuente de poder y el cable que se conecta al enchufe.

El proceso de carga de las baterías es bastante intuitivo, conectar la batería descargada a la base y esta a la fuente de poder y a la electricidad. Una vez se conecte el cargador a la fuente de electricidad, se encenderá una luz adicional debajo de un símbolo de enchufe y se podrá observar el nivel de carga de la batería conectada mediante el parpadeo de 1 a 4 luces LED en la parte superior de la base, hasta que se mantengas las 4 luces encendidas, lo cual significará que la batería está completamente cargada. Es de utilidad saber que se puede conocer el nivel de carga de las baterías si se conectan a la base del cargador sin necesidad de estar conectado a la fuente de poder, este

mostrará el nivel de carga actual de la batería conectada mediante el parpadeo las mismas luces LED mencionadas anteriormente (Fig. 4).



*Figura 9. Cargador y batería de Escáner Láser Terrestre.*

## **2.2. Cuidados del equipo**

### **2.2.1. Baterías**

1. No almacenar el dispositivo con la batería instalada. Después de cada uso se debe almacenar el equipo en su estuche protector y con las baterías desconectadas fuera del escáner.
2. A la hora de guardar las baterías, asegurarse de no almacenarlas completamente descargadas, se recomienda que tengas al menos un 60% de carga para mantener su vida útil.

3. Usar las baterías de manera alternada, para mantener un número de ciclos de descarga similar en las baterías se recomienda evitar usar solo una y dejar la otra sin uso durante mucho tiempo.
4. A la hora de cargar las baterías, evitar dejar el cargador conectado por mucho tiempo. Para optimizar la vida útil del equipo se recomienda estar pendiente del estado de carga de las baterías y desconectarlas cuando se hayan cargado por completo.

### **2.2.2.Unidad de sensor**

1. Limpiar la unidad de espejo periódicamente o después de que se ensucie tras su uso. Se debe utilizar un textil adecuado y líquido para limpiar lentes de cámara.
2. No permitir que objetos obstruyan el movimiento de la unidad de espejo durante el escaneo ni tocarlo mientras se encuentre girando, esto podría causar que se descalibre o que se dañe el equipo.
3. Asegurarse que el trípode esté firmemente colocado antes de iniciar el escaneo para evitar que el sensor se mueva o se caiga mientras se mantiene girando sobre su eje.

### **2.2.3.Consideraciones ambientales**

1. No exponer el sensor a la humedad, proteger el equipo de la lluvia y de ambientes con alta humedad o vapor en el aire.
2. Evitar realizar escaneos bajo incidencia directa de la luz solar, se recomienda que la unidad de espejo se encuentre bajo algún grado de sombra y que los escaneos en áreas abiertas se realicen en días nublados.
3. Para la detección de biomasa se recomienda evitar realizar escaneos en momentos donde se detecte mucho viento, el viento causa el movimiento y caída de la biomasa, lo que resultará en ruido y detección errónea de su volumen.

### 3. Metodologías de escaneado utilizando el TLS

Para la obtención de información a partir del uso del TLS, se pueden seguir dos diferentes metodologías: escaneo múltiple o escaneo simple. Para generar una nube de puntos mediante la técnica de escaneo múltiple se deben tomar varios escaneos desde distintas posiciones, dentro y fuera del área de muestreo, donde se deben colocar previamente una serie de puntos de control que permitan el corregistro posterior de todos los escaneos realizados, generando una sola nube de puntos con una vista completa del objeto o área de interés. En el caso del escaneo simple, se realiza posicionando el escáner en el centro del área de muestreo, por la naturaleza estática del escáner se van a tener vacíos de información ya que todo lo que se encuentre detrás de los objetos capturados por el láser, desde el punto de vista del TLS, van a ser bloqueados, sin embargo, el volumen de datos generados a partir de este método será considerablemente menor, por lo que se van a obtener resultados más rápido y con una menor demanda computacional que el método de escaneo múltiple (Liang et al., 2012).

El uso del escaneo simple ha demostrado ser no sólo eficiente y preciso, sino que también con una cantidad y calidad de información que no presenta diferencia significativa en comparación con la metodología de escaneo múltiple (Ehbrecht et al., 2016). De esta manera se han generado importantes trabajos como el de (Astrup et al., 2014), donde por medio del uso del escaneo simple utilizando un ELT, obtuvieron valores para el volumen a nivel de fustes validados con la información obtenida de inventarios forestales tradicionales, o el de (Alonso-Rego et al., 2021) donde utilizando el mismo método se obtuvieron valores muy precisos del volumen de combustible en los bosque para el manejo en la prevención de incendios forestales, en el que para algunos objetivos la información obtenida por medio del TLS fue inclusive más importante y detallada que la extraída por medio del uso de escáner láser aéreo.

De la mano del escaneo simple, varios autores mencionan el “escaneo simple multiple” (Astrup et al., 2014; Liang et al., 2012; Seidel et al., 2016), donde se realizan varios escaneos de manera sistemática o aleatoria en una misma área de interés, pero se procesan por aparte y no se corregistran en una misma nube de puntos, de esta manera

el procesamiento de la información es más sencillo, pero se obtiene una base de datos más robusta para inferir sobre la muestra.

### **3.1. Montaje y configuración del equipo**

El primer paso del armado es extender el trípode base a la altura a la cual se desea escanear, cada uno de los pies del trípode tiene tres niveles de extensión y también el cuello de este se puede nivelar. Este trípode permite colocar el escáner a cualquier altura entre 35 y 167 cm.

Una vez el trípode se encuentre firme y a la altura deseada, se puede colocar la unidad del sensor sobre este, sujetándolo firmemente con el tornillo que se encuentra en la base del sensor utilizando la llave incluida en el sistema (Fig. 5). Es importante asegurarse de que, durante el proceso de escaneado, el escáner pueda girar sobre su eje libremente y que ningún objeto pueda tocar la unidad de espejo del sensor, ya que esta gira rápidamente y cualquier obstrucción física podría arruinar la nube puntos final o dañar la integridad del dispositivo, para esto se debe asegurar que este no se coloque demasiado cerca de objetos movibles o que sufra peligro de caída de objetos sobre el sensor durante el escaneo.



*Figura 10. Sensor montado en trípode y acercamiento a la base con tornillo y llave de ajuste.*

Para encender el dispositivo se debe presionar el botón situado en la parte superior izquierda, al lado arriba de la pantalla principal, después de aproximadamente un minuto se cargará la interfaz y con ella el menú principal del equipo. En esta pantalla se puede observar un botón de ayuda en la parte superior derecha, el botón de "Start Scan" en el centro de la pantalla y tres botones en la parte inferior de la pantalla, cada uno de estos tres botones abrirá un menú distinto.



*Figura 11. Vista de la pantalla en el menú principal del Escáner Láser Terrestre.*

El primero es para la configuración de los parámetros de escaneo, en este se puede seleccionar el perfil, ajustar la resolución y calidad, ajustar el ángulo de escaneo, seleccionar los sensores a utilizar (inclinómetro, brújula y altímetro), si se desea escanear con color o no y la configuración de exposición en caso de que se active el escaneo a color.

El segundo menú permite navegar y visualizar en vista previa todos los escaneos que se encuentren guardados en la tarjeta SD. Se proyecta una lista de todos los escaneos con su nombre, tamaño del archivo, así como la fecha y hora de creación de cada uno, para observar la vista previa se debe seleccionar uno de los archivos y una vez se abra la pantalla de visualización se podrá hacer zoom y observar el área escaneada, en esta misma pantalla se pueden observar los metadatos al presionar el botón "Info" en la parte inferior de la pantalla y si se quisiera se puede borrar el archivo al presionar el botón flotante con la equis roja.



*Figura 12. Vista previa de la nube de puntos de un escaneo.*

En el tercer menú se pueden crear, editar y seleccionar los Proyectos, perfiles y operadores del proyecto de escaneo láser, también se tiene acceso a los sensores que tiene el escáner, a la configuración general del equipo, menú de servicio y apagado del equipo.

En el menú principal de la pantalla de inicio también se encuentra una pestaña con flecha, la cual se puede presionar para mostrar o esconder la caja de información, esta caja muestra la información del operador actual, el proyecto, el perfil seleccionado e información de distancia de seguridad para los ojos recomendada, resolución y tiempo del escaneado.

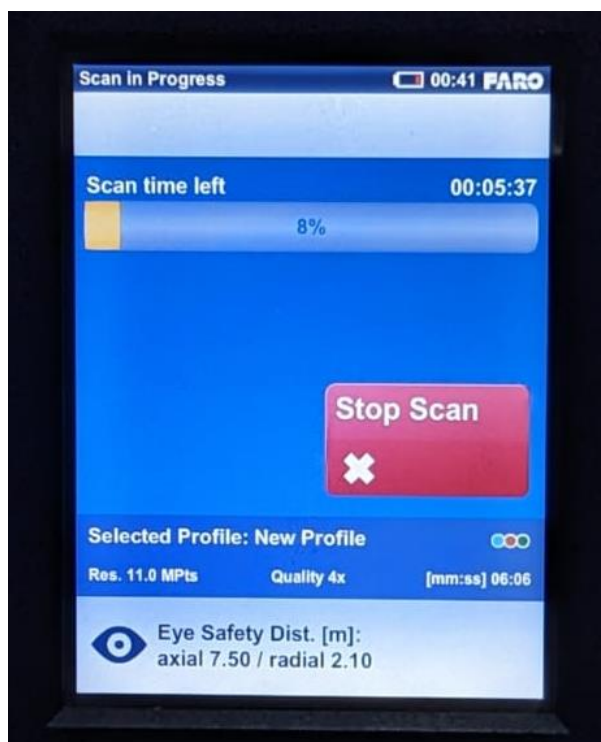
### **3.2. Proceso de escaneado**

Para iniciar el proceso de escaneo se debe presionar ya sea el botón “Start/Stop” en la parte inferior de la pantalla del escáner o el botón de color verde “Start Scan” visible en el centro de la pantalla principal del escáner (Fig. 6). Una vez iniciado el proceso de escaneo, el láser interno se encenderá y la unidad de espejo empezará a girar rápidamente, durante el escaneo el sensor girará 180° en dirección de las manecillas del reloj y las luces LED parpadearán de color rojo, durante este proceso de escaneado la persona operadora deberá situarse en la dirección opuesta al rango de visión del escáner y girar en el mismo sentido horario junto con el sensor, esto para evitar causar ruido en la nube de puntos producto del escaneo de personas en el rango de visión.

Cabe resaltar que el dispositivo debe estar correctamente nivelado a la hora de iniciar el proceso de escaneo, en caso de que este se encuentre con un desnivel mayor o menor que cinco grados, se mostrará un mensaje de advertencia de inclinación fuerte (Fig. 8), en este caso es recomendable detener el escaneo, nivelar correctamente el dispositivo e iniciar un escaneo nuevo. Durante el escaneado se puede detener el proceso al presionar el botón “Stop Scan” o el botón “Start/Stop” en la parte inferior de la pantalla, en este punto el sensor permitirá retomar el escaneo actual o borrar el escaneo incompleto (Fig. 9).



Figura 13. Mensaje de advertencia de inclinación fuerte.



*Figura 14. Pantalla de progreso del escaneo en ejecución.*

Al concluir el proceso de escaneo las luces LED cambiarán a color azul y el escáner girará otros 180° a su posición inicial, en la pantalla se proyectará el estado de avance del escaneo mediante una barra de progreso, la cual al finalizar el escaneo sonará una notificación y tras el postproceso de los puntos escaneados mostrará una previsualización plana de la nube de puntos obtenida, la cual permite detectar errores comunes como detección de personas o animales en movimiento, así como inexactitudes en el registro de la biomasa producto del movimiento por el viento o encandilamiento del sensor por incidencia del sol directo.

Es importante tener en cuenta que, al finalizar el escaneo y dependiendo de las condiciones del sitio, el sensor puede girar completamente una vez más para capturar información de inclinación, durante este proceso no se debe mover el dispositivo para evitar errores en la captura de la información de inclinación. Para evitar que esto suceda se recomienda mover el sensor hasta después de haber revisado la nube de puntos en la previsualización mostrada después de finalizado el proceso de escaneo.

### **3.3. Exportación de los archivos obtenidos**

Los datos obtenidos del sensor primero se deben extraer de la memoria SD del escáner, para luego procesarlos en el software propio de la marca del sensor FaroScene (Vers. 5, Faro Technologies Inc., Lake Mary, FL, USA). Dentro de este software se puede realizar filtrados de información y eliminación de puntos con posicionamiento erróneo, además, sirve para exportar los archivos crudos de tipo FLS a nubes de puntos trabajables en programas externos.

## **4. Visualización y manejo de las nubes de puntos utilizando el software CloudCompare**

Las nubes de puntos pueden tener diferentes formatos (.xyz, .las, .csv, etc.), pero generalmente los datos del TLS se exportan en formato XYZ. Para la visualización y edición de las nubes de puntos en formato XYZ, uno de los programas más utilizados actualmente es CloudCompare, este es un software de código abierto muy fácil de manejar y con una amplia y activa comunidad de usuarios a nivel mundial.

Dentro de este software es posible navegar dentro de las nubes de puntos 3D, lo que permite observar a detalle todo aquello que fue escaneado por el sensor con un gran detalle. Además, es posible cambiar la perspectiva del espacio para observar la nube de puntos desde diferentes planos, seccionarla en diferentes partes, recortarla y realizar extracciones de manera muy ágil e intuitiva. Utilizando herramientas básicas de este software es posible realizar mediciones de diámetros, alturas y conteos de árboles de manera muy sencilla.

## 4.1. Visualización de las nubes de puntos

Para abrir un archivo de nube de puntos en CloudCompare, se debe ir a la barra de herramientas superior y seleccionar la pestaña Archivo -> Abrir, o bien con el comando Ctrl+O, y seleccionar el archivo en formato .xyz en su computador. Al seleccionar el archivo y presionar el botón “Abrir”, se proyectará una ventana en la cual deberá indicar las columnas que contienen las coordenadas de los puntos en los 3 ejes espaciales (X, Y, Z) (Fig. 10, rectángulo rojo), esto se realiza al presionar la pestaña debajo del número de cada columna y seleccionando la coordenada correcta para cada una de las 3 columnas con esta información.

No todas las nubes de puntos tienen el mismo orden de atributos ni la misma información, pero generalmente las columnas de coordenadas espaciales son fáciles de identificar en caso de que no se conozca el orden de los atributos, generalmente las nubes de puntos tienen información de reflectancia (valores enteros que representan la saturación en las bandas RGB), información de identificación de los puntos individuales (número o código ascendente único para cada punto) y la información espacial (números decimales en 3 columnas sucesivas) siempre en el orden X, Y, Z.

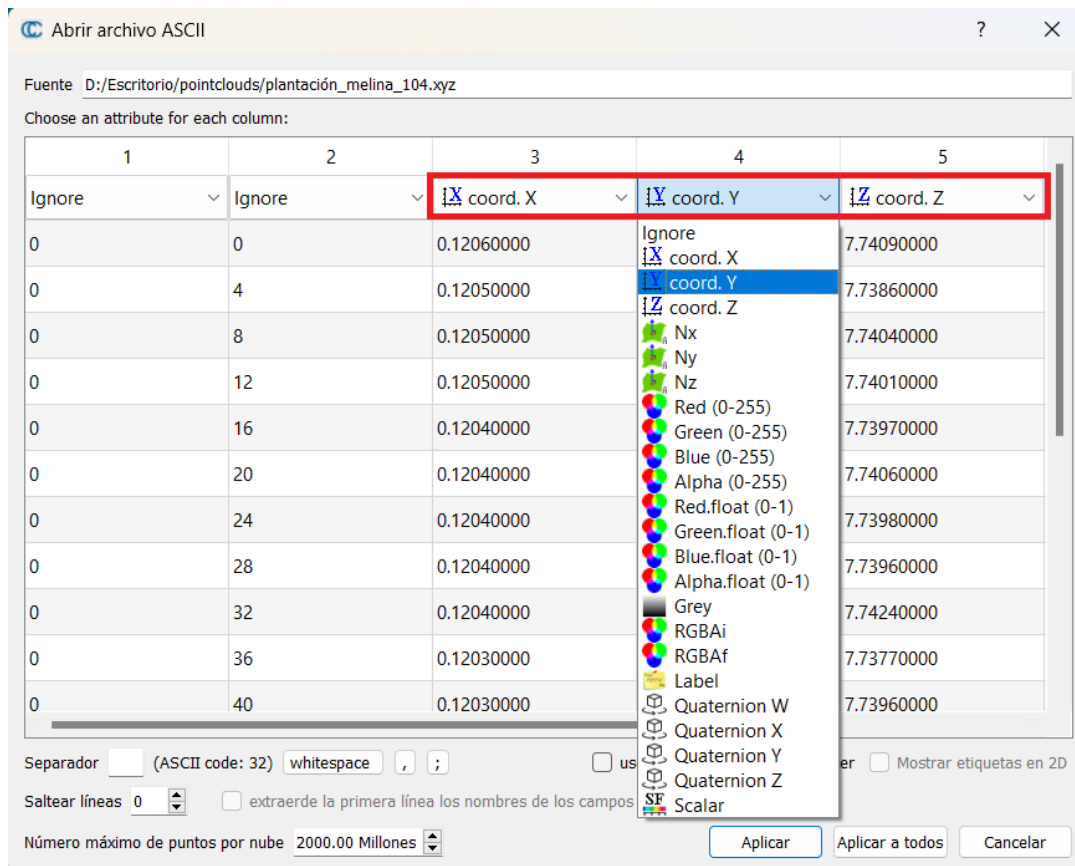


Figura 15. Definir las columnas con información espacial (coordenadas x, y, z) en el programa CloudCompare.

Tras definir las columnas con las coordenadas para cada eje y presionar el botón “Aplicar”, se mostrará la nube de puntos en la interfaz principal del programa (Fig. 11). Para cambiar la perspectiva de la nube de puntos de manera rápida, sólo se debe seleccionar una de las perspectivas principales ubicadas en el panel de “Herramientas de vista”, el cual se muestra por defecto en el borde izquierdo de la pantalla del programa (Fig. 11, rectángulo rojo).

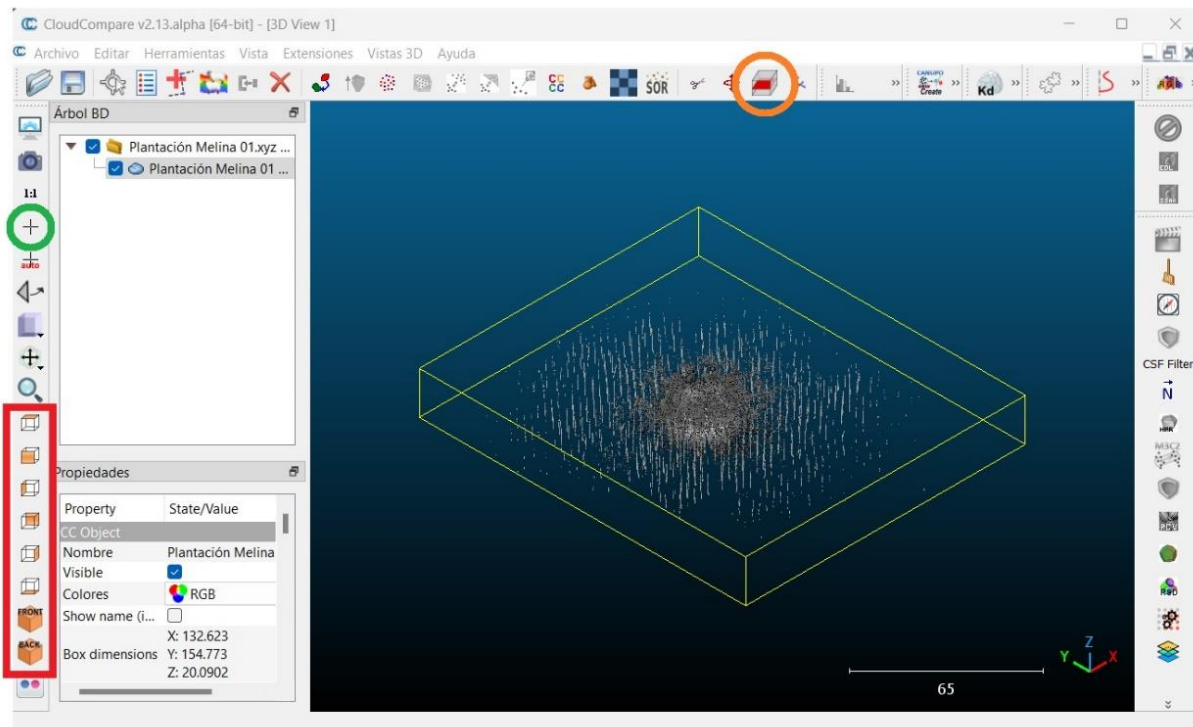


Figura 16. Vista principal del programa CloudCompare.

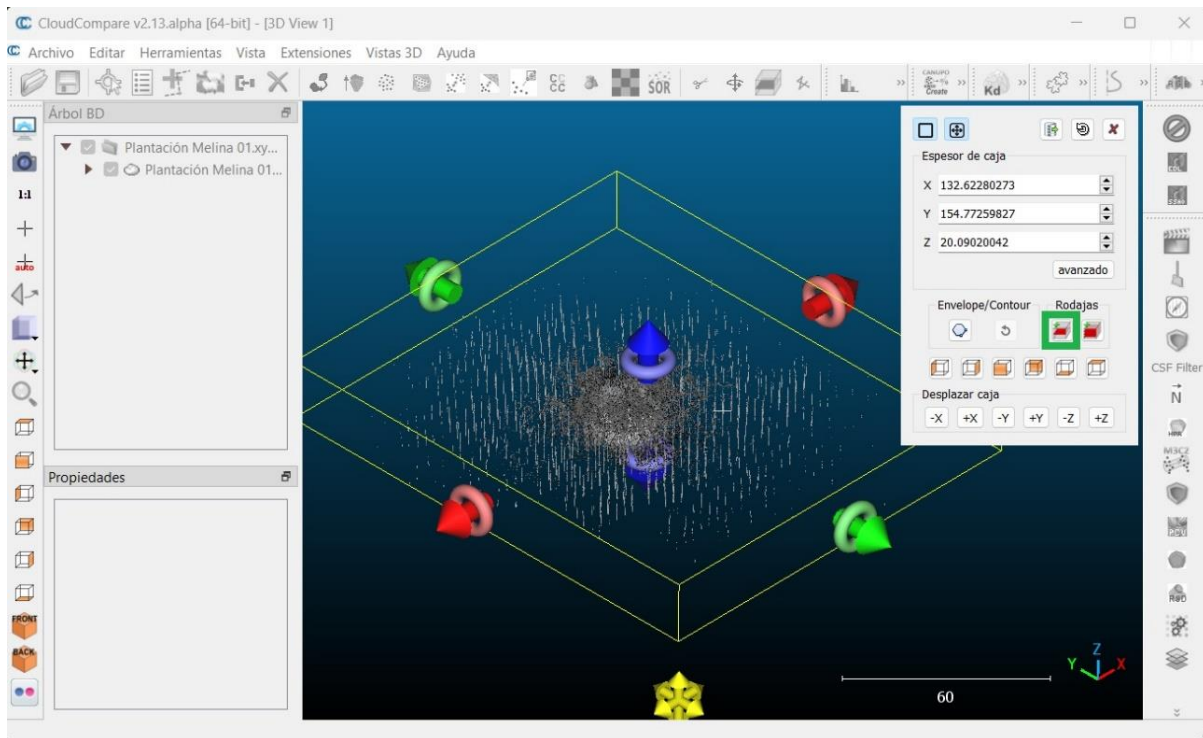
Para navegar en la vista 3D de la nube de puntos de manera manual se recomienda utilizar un ratón para computadora, la navegación manual es muy importante para lograr observar zonas específicas de la nube de puntos. Para rotar la vista sobre el eje se debe presionar el click izquierdo y mover el ratón en el sentido del giro deseado, para desplazar la nube de puntos en un solo plano se debe presionar el click derecho y para acercar o alejar la vista se usa la rueda central del ratón.

Para facilitar la navegación dentro de la nube de puntos se recomienda seleccionar un centro de rotación de manera manual, esto se hace seleccionando la herramienta “Elegir centro de rotación” en el panel de Herramientas de vista (Fig 11, círculo verde). Se debe escoger uno de los puntos de la nube de puntos, el cual fungirá como nuevo centro de rotación (generalmente se utiliza un punto cercano a la posición del sensor), para esto se recomienda realizar un acercamiento a ese punto antes de presionar la herramienta mencionada, de esta forma se evitará seleccionar otro punto de manera errónea.

## 4.2. Seccionar la nube de puntos

Para descartar partes de la nube de puntos, o bien, para extraer zonas de interés, se puede utilizar la herramienta “Sección transversal” (Fig 11, círculo naranja). Si esta herramienta no aparece disponible en la vista principal del programa es porque no se tiene una nube de puntos seleccionada, en este caso se debe seleccionar el archivo que se desea seccionar en el panel “Árbol DB”, en caso de tener varias nubes de puntos proyectadas, el seccionamiento se realizará sólo al archivo seleccionado, por este motivo se recomienda sólo tener proyectada la nube de puntos que se desea seccionar. Para proyectar u ocultar los archivos que se tengan abiertos en el proyecto actual, se debe tocar las casillas que aparecen antes de los archivos del Árbol DB, las nubes de puntos que tengan un check azul son las que están proyectadas actualmente.

Tras activar la herramienta “Sección transversal”, aparecerán seis flechas en los extremos de la nube de puntos, dos para cada una de las tres dimensiones, cada una de estas flechas tiene una punta que al presionar y arrastrar reducirá o aumentará el tamaño de la sección en esa dimensión, pero también tiene una zona de rotación, la cual tiene forma de dona alrededor de cada flecha, al presionar y mover estas zonas se girará la caja de recorte sobre el eje de esa flecha (Fig. 12).



*Figura 17. Visualización de la herramienta de Sección transversal.*

Cuando se activa esta herramienta, también aparecerá una caja de opciones en la esquina superior derecha de la interfaz. En esta caja se pueden cambiar las perspectivas, seleccionar una sección de manera manual utilizando las coordenadas, desplazar la caja contenedora de la nube de puntos, entre otras opciones. Una de las herramientas más útiles es la de “Rodajas” (Fig. 12, cuadro verde), con esta se puede extraer la sección que se encuentre contenida dentro de los límites de la caja delimitada por las flechas y de esta manera extraer una sección reducida que contenga un área de interés más específica de la nube de puntos completa.

Es importante resaltar que, estas secciones transversales extraídas de la nube de puntos original se exportan como nuevas entidades, por lo que van a aparecer como un archivo aparte en el Árbol DB. Esto puede causar confusión porque no se verán cambios en la interfaz al exportar la nueva sección, para ello se debe desactivar el check frente al archivo de la nube de puntos original y de esta manera sólo se proyectará la sección extraída.

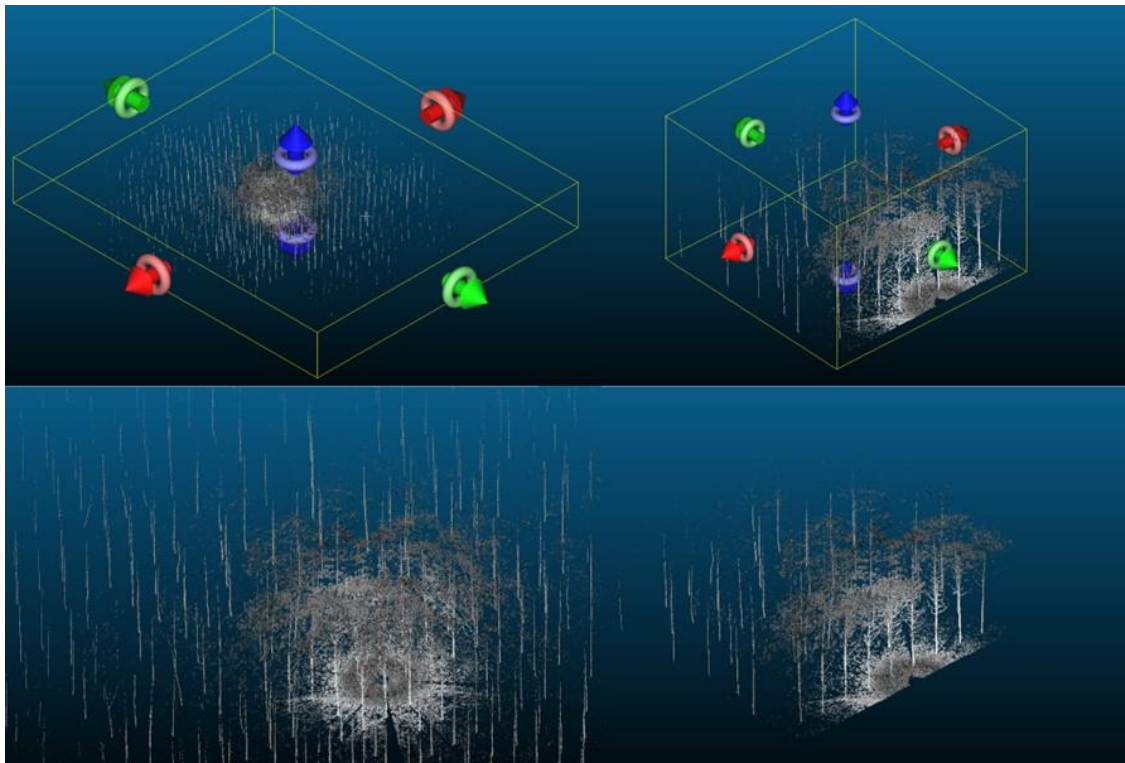


Figura 18. Proceso de extracción de secciones transversales.

### 4.3. Medir distancia entre puntos

Al tener la nube de puntos asociada a un sistema de coordenadas geográficas es posible realizar mediciones puntuales entre dos o más puntos, una de las aplicaciones de esta posibilidad es medir la altura de los árboles, siempre y cuando se tenga registro de la base y copa dentro de la nube de puntos.

La herramienta para realizar estas mediciones se llama “Selecciona puntos” y se encuentra en la barra de herramientas superior, junto al ícono de guardar proyecto (Fig.14, círculo rojo). Al seleccionar esta herramienta se abrirá una caja en la esquina superior derecha de la interfaz (Fig.14, cuadro verde), en esta caja se puede seleccionar el tipo de información que se desea observar. La primera opción mostrará información de coordenadas y reflectancia para un solo punto, la segunda opción mostrará

información lineal entre dos puntos (esta es la opción que se utiliza para medir la altura total o comercial de los árboles y el diámetro a cualquier altura) muestra la diferencia de distancia entre ambos puntos seleccionados tanto en un solo eje como en la relación de cada pareja de ejes, la tercera opción muestra información del área entre tres puntos así como la distancia y ángulos entre esos tres puntos. Adicionalmente se pueden generar y guardar etiquetas con esta herramienta, en caso de que se quiera dejar la información deseada de manera permanente en la nube de puntos.

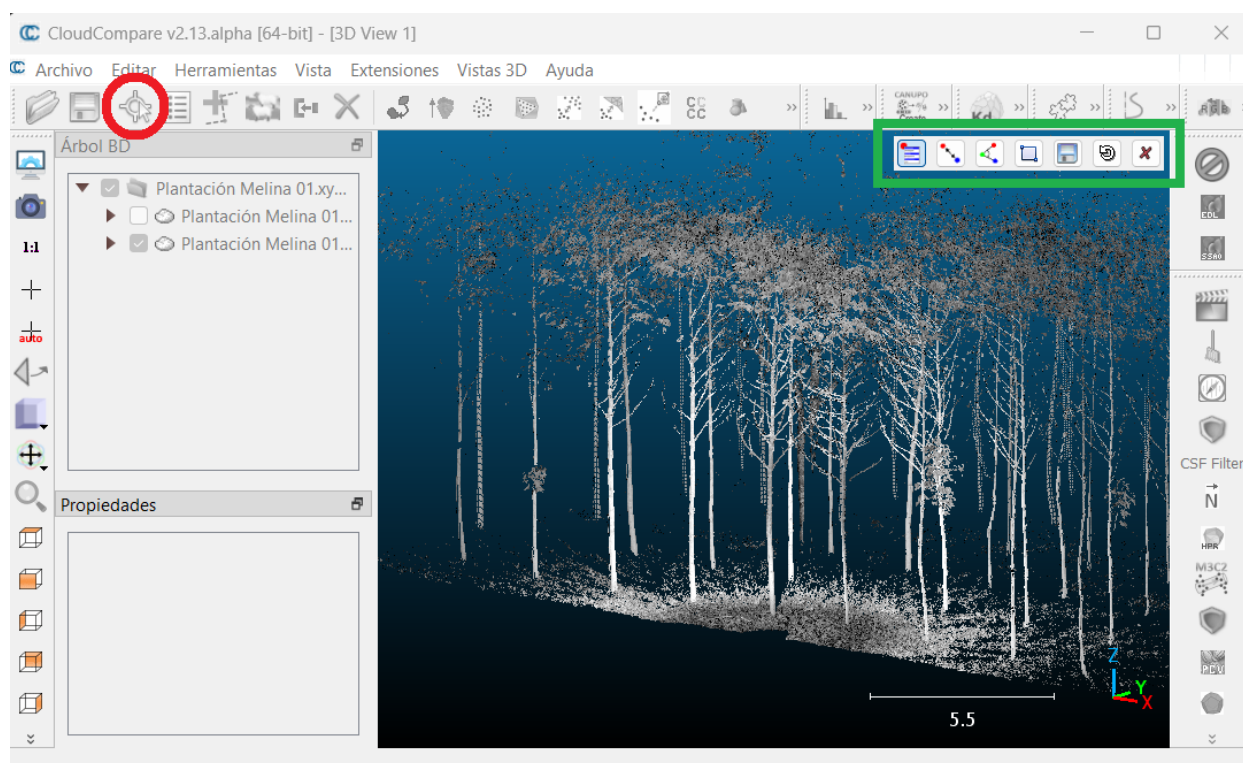


Figura 19. Herramienta seleccionar puntos en CloudCompare.

## 4.4. Medición de variables dasométricas

### 4.4.1. Altura

Como primer paso se debe seleccionar el árbol que se desea medir, determinar el tipo de altura que se desea medir (altura total, altura comercial, etc.) y tener claro cuáles puntos se quieren usar como límites. Teniendo esto claro, se utiliza la herramienta

“Seleccionar puntos” y escogiendo la opción de seleccionar dos puntos, se colocan los dos vértices con el click izquierdo en la interfaz de visualización de la nube de puntos.

Para facilitar la medición de las alturas, se recomienda que previo a la medición se recorte la nube de puntos en un área en la que se pueda observar correctamente los límites de la medición deseada. Esto se realiza utilizando la herramienta “Sección transversal”.

Para la medición de la altura es muy importante verificar que el vector entre ambos puntos de medición tenga la pendiente adecuada, que en la mayoría de árboles que crecen de manera vertical debe ser de aproximadamente  $90^\circ$ . Esto se hace rotando la nube de puntos o usando las perspectivas en la barra de herramientas de vista (Fig. 11, cuadro rojo), para poder verificar de manera visual observando el vector desde otra perspectiva

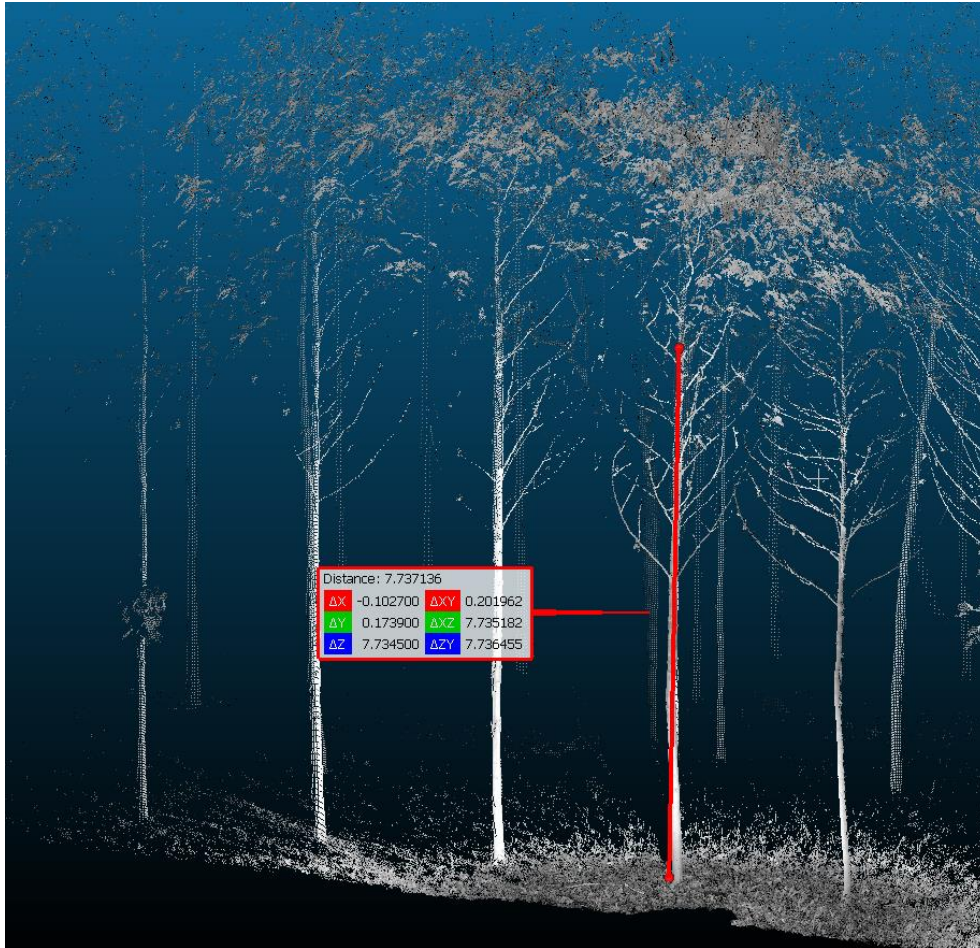


Figura 20. Medición de la altura comercial de un árbol utilizando la herramienta Selecciona puntos en CloudCompare.

#### 4.4.2. Diámetro de fuste

Esta medición también se realiza utilizando la herramienta para seleccionar dos puntos, pero para hacerlo posible primero se debe cambiar la perspectiva de vista de la nube de puntos. El primer paso es determinar la o las alturas a la que se desea medir el diámetro del fuste, luego se crea un vector con la metodología descrita para medir alturas. Es importante guardar este vector utilizando el ícono de guardado que aparece en la caja de herramientas flotante de la herramienta “Selecciona puntos”, al hacer esto el vector aparecerá en el panel Árbol DB como otra entidad.

Una vez teniendo el vector de altura de medición deseada visible en la interfaz de visualización, se va a extraer una sección delgada del fuste del árbol a esa altura,

excluyendo los puntos que correspondan al suelo y las copas de los árboles. De esta manera, desde la vista superior de la nube de puntos se puede observar la circunferencia del árbol que se desea medir.

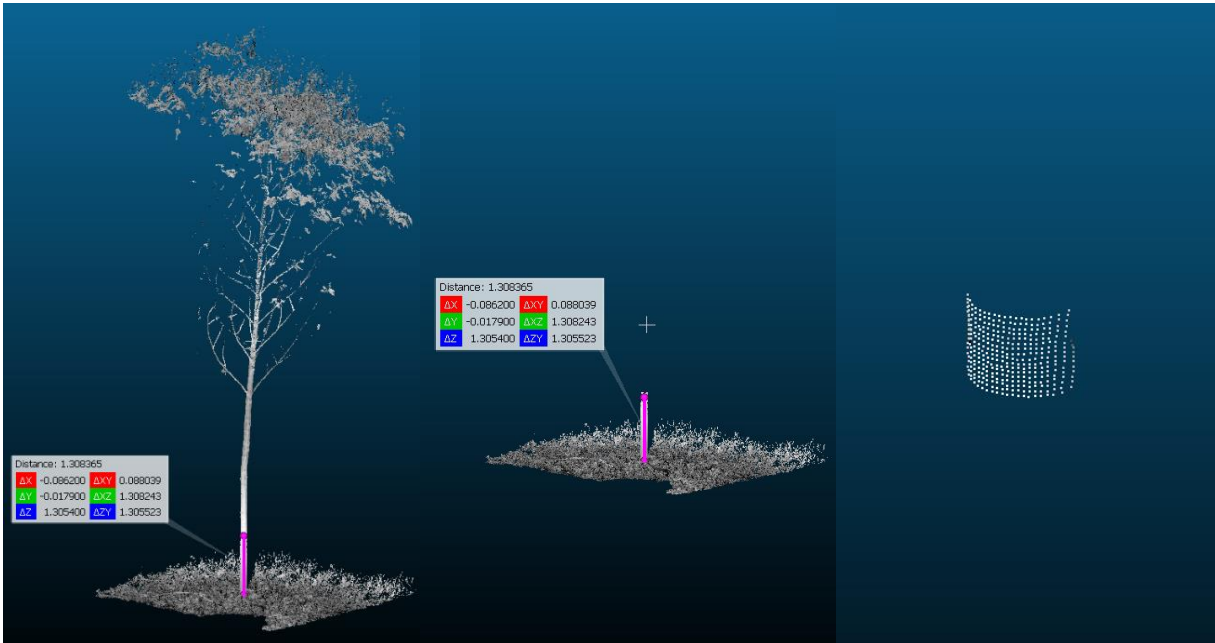


Figura 21. Extracción de segmento del fuste para medición del diámetro.

Cuando se utiliza la metodología de escaneo simple, debido al efecto de oclusión a causa de tener un único punto de vista, no se va a lograr observar una circunferencia completa, sin embargo, la superficie de un árbol dentro del rango de visión del escáner se va a observar como una media luna desde una vista superior, lo que es suficiente para poder medir un diámetro.

Para finalizar la medición del diámetro, se debe relizar el mismo proceso de selección de dos puntos pero desde la vista superior de la sección extraída, para este paso la visualización de la nube de puntos puede ser escasa por tener una menor densidad de puntos. Para esto se puede aumentar el tamaño de los puntos moviendo el puntero por la esquina superior izquierda de la interfaz de visualización y presionando el simbolo de “+” en la opción “default point size”

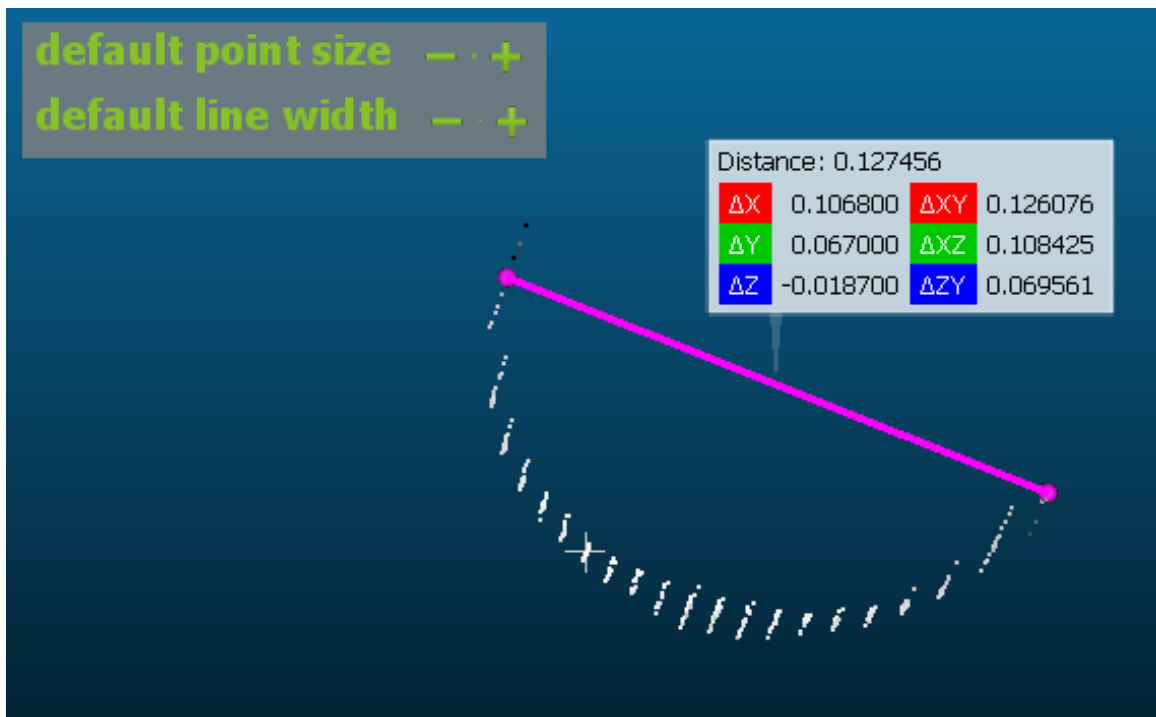
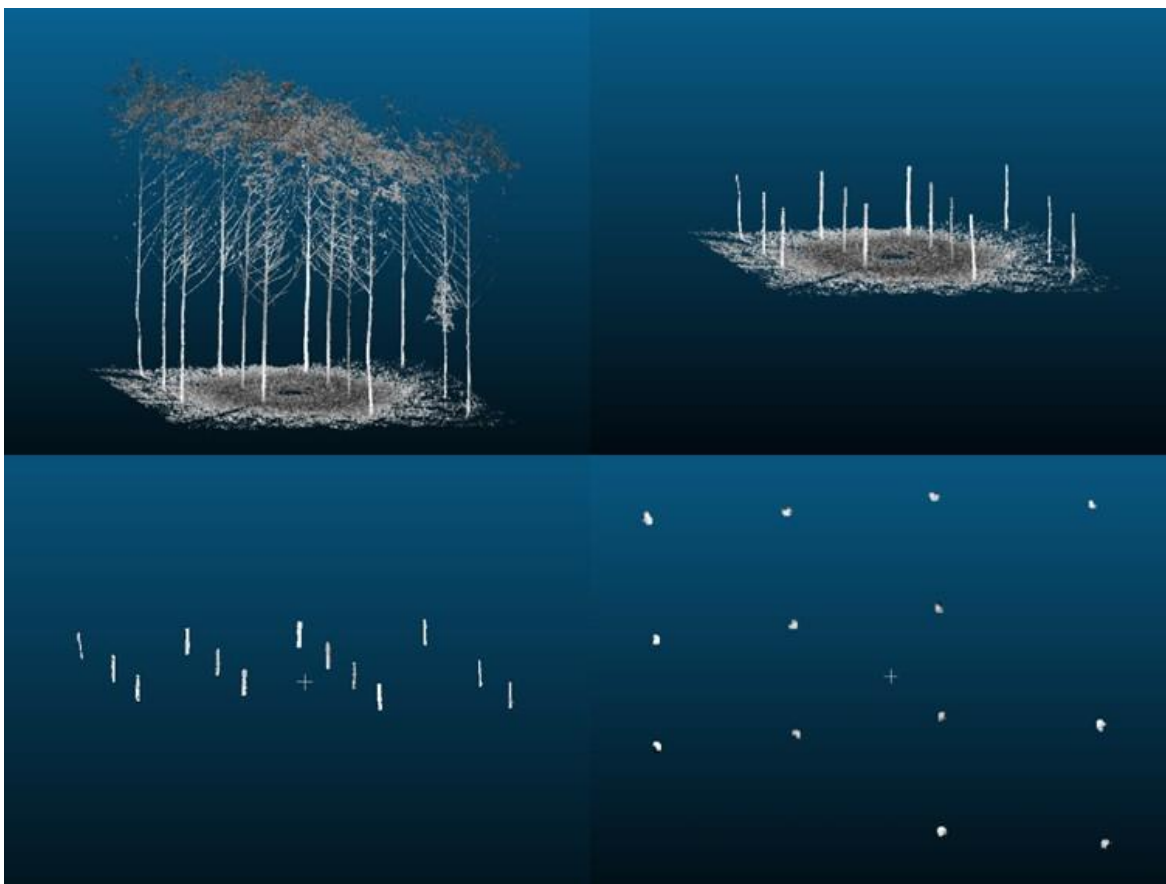


Figura 22. Medición del diámetro de la sección del fuste a la altura deseada.

#### 4.4.3. Número de árboles

Para contar la cantidad de árboles dentro de un área específica, de manera eficiente, se debe observar desde una perspectiva superior, similar a la que se utiliza para medir el diámetro de fuste. La metodología de extracción de una sección del fuste es la misma sólo que realizandolo para todos los árboles dentro del área de interés, posteriormente desde la vista superior se cuentan la cantidad de fustes observados en la nube de puntos.



*Figura 23. Proceso de extracción de secciones de fustes para conteo de árboles.*

Es importante tener en cuenta que los fustes que no aparezcan en la nube de puntos no necesariamente corresponden a árboles faltantes, esto puede ser producto de la oclusión, un factor inevitable a la hora de usar la metodología de escaneo simple.

## **5. Análisis avanzado de las nubes de puntos**

El análisis de las nubes de puntos va a depender del objetivo de estudio, actualmente existe mucho material compartido en GitHub para el análisis de nubes de puntos

utilizando códigos programado en R, tanto para la metodología de escaneo múltiple como escaneo simple. El enfoque de cada estudio que se realice utilizando la herramienta TLS va a conllevar un procesamiento y análisis distinto de la información. Algunos estudios que han realizado y compartido códigos de análisis de nubes de puntos se citan a continuación:

- (Ehbrecht et al., 2021) presenta una metodología para calcular la complejidad estructural de los bosques. En este estudio se escanearon bosques de diferentes regiones del mundo y se creó un patrón global del índice de complejidad estructural de los bosques en un gradiente latitudinal, demostrando que la complejidad está relacionada a la diversidad de los sitios.

El código para procesar estas variables se encuentra en:

[https://github.com/ehbrechtetal/Stand-structural-complexity-index---SSCI/blob/main/Ehbrecht%20et%20al\\_Stand%20Structural%20Complexity%20Index\\_Code\\_v1.3.R](https://github.com/ehbrechtetal/Stand-structural-complexity-index---SSCI/blob/main/Ehbrecht%20et%20al_Stand%20Structural%20Complexity%20Index_Code_v1.3.R)

- (Molina-Valero et al., 2022) comparte una herramienta de automatización en la generación de variables forestales a nivel del suelo, utilizando nubes de puntos de TLS de escaneos múltiple y sencillo, presentando una alternativa para realizar inventarios forestales.

Información y códigos se encuentran en:

<https://github.com/Molina-Valero/FORTLS/tree/devel>

## 6. Referencias bibliográficas

- Åkerblom, M., & Kaitaniemi, P. (2021). Terrestrial laser scanning: A new standard of forest measuring and modelling? *Annals of Botany*, *128*(6), 653–662. <https://doi.org/10.1093/aob/mcab111>
- Alonso-Rego, C., Arellano-Pérez, S., Guerra-Hernández, J., Molina-Valero, J. A., Martínez-Calvo, A., Pérez-Cruzado, C., Castedo-Dorado, F., González-Ferreiro, E., Álvarez-González, J. G., & Ruiz-González, A. D. (2021). Estimating Stand and Fire-Related Surface and Canopy Fuel Variables in Pine Stands Using Low-Density Airborne and Single-Scan Terrestrial Laser Scanning Data. *Remote Sensing*, *13*(24). <https://doi.org/10.3390/rs13245170>
- Astrup, R., Ducey, M. J., Granhus, A., Ritter, T., & von Lüpke, N. (2014). Approaches for estimating stand-level volume using terrestrial laser scanning in a single-scan mode. *Canadian Journal of Forest Research*, *44*(6), 666–676. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2013-0535>
- Bazewez, M. N., Hussin, Y. A., Kloosterman, E. H., Hasmadi, I. M., Soromessa, T., & Adan, M. S. (2021). *Factual approach for tropical forest parameters measurement and monitoring: future option with a focus on synergetic use of airborne and terrestrial LiDAR technologies*. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2020.1862436>
- Beland, M., Parker, G., Sparrow, B., Harding, D., Chasmer, L., Phinn, S., Antonarakis, A., & Strahler, A. (2019). On promoting the use of lidar systems in forest ecosystem research. In *Forest Ecology and Management* (Vol. 450). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117484>
- Dalponte, M., Jucker, T., Liu, S., Frizzera, L., & Gianelle, D. (2019). Characterizing forest carbon dynamics using multi-temporal lidar data. *Remote Sensing of Environment*, *224*, 412–420. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.02.018>
- de Almeida, D. R. A., Almeyda Zambrano, A. M., Broadbent, E. N., Wendt, A. L., Foster, P., Wilkinson, B. E., Salk, C., Papa, D. de A., Stark, S. C., Valbuena, R., Gorgens, E. B., Silva, C. A., Brancalion, P. H. S., Fagan, M., Meli, P., & Chazdon, R. (2020). Detecting

- successional changes in tropical forest structure using GatorEye drone-borne lidar. *Biotropica*, 52(6), 1155–1167. <https://doi.org/10.1111/btp.12814>
- Ehbrecht, M., Schall, P., Juchheim, J., Ammer, C., & Seidel, D. (2016). Effective number of layers: A new measure for quantifying three-dimensional stand structure based on sampling with terrestrial LiDAR. *Forest Ecology and Management*, 380, 212–223. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.09.003>
- Ehbrecht, M., Seidel, D., Annighöfer, P., Kreft, H., Köhler, M., Zemp, D. C., Puettmann, K., Nilus, R., Babweteera, F., Willim, K., Stiers, M., Soto, D., Boehmer, H. J., Fisichelli, N., Burnett, M., Juday, G., Stephens, S. L., & Ammer, C. (2021). Global patterns and climatic controls of forest structural complexity. *Nature Communications*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-20767-z>
- Faro Technologies. (2012). *FARO Laser Scanner Focus 3D Características, beneficios y especificaciones técnicas*. <https://downloads.faro.com/index.php/s/RswRg2QgSg2Tx2r>
- Faro Technologies. (2019). *FARO® Laser Scanner Manual*. <https://knowledge.faro.com/Essentials/General/3rd->
- Liang, X., Litkey, P., Hyypä, J., Kaartinen, H., Vastaranta, M., & Holopainen, M. (2012). Automatic stem mapping using single-scan terrestrial laser scanning. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(2), 661–670. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2161613>
- Liu, X., Chen, M., Tan, C., Zhang, X., & Yang, W. (2021). Automatic stem mapping using single-scan terrestrial laser scanning data and Mean Shift clustering. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 865(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/865/1/012015>
- Mehendale, N., & Neoge, S. (2020). Review on Lidar Technology. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/SSRN.3604309>
- Molina-Valero, J. A., Martínez-Calvo, A., Ginzo Villamayor, M. J., Novo Pérez, M. A., Álvarez-González, J. G., Montes, F., & Pérez-Cruzado, C. (2022). Operationalizing the use of TLS

in forest inventories: The R package FORTLS. *Environmental Modelling and Software*, 150. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105337>

Okyay, U., Telling, J., Glennie, C. L., & Dietrich, W. E. (2019). Airborne lidar change detection: An overview of Earth sciences applications. In *Earth-Science Reviews* (Vol. 198). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102929>

Seidel, D., Ehbrecht, M., & Puettmann, K. (2016). Assessing different components of three-dimensional forest structure with single-scan terrestrial laser scanning: A case study. *Forest Ecology and Management*, 381, 196–208. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.09.036>

Sofia, S., Maetzke, F. G., Crescimanno, M., Coticchio, A., La Mela Veca, D. S., & Galati, A. (2022). The efficiency of LiDAR HMLS scanning in monitoring forest structure parameters: implications for sustainable forest management. *EuroMed Journal of Business*, 17(3), 350–373. <https://doi.org/10.1108/EMJB-01-2022-0017>

Stovall, A. E. L., Shugart, H. H., Stovall, A. E. L., Anderson-Teixeira, K. J., & Anderson-Teixeira, K. J. (2018). Assessing terrestrial laser scanning for developing non-destructive biomass allometry. *Forest Ecology and Management*, 427, 217–229. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.06.004>