




Uso de un escáner láser terrestre (TLS) para la caracterización estructural de bosque seco tropical y plantaciones forestales en Costa Rica

Use of a terrestrial laser scanner (TLS) for the structural characterization of tropical dry forest and forest plantations in Costa Rica

Orlando Jiménez-Méndez¹ • Mario Guevara-Bonilla¹  • Casia Soto-Montoya¹  • Ruperto Quesada-Monge¹ 

Recibido: 23/08/2023

Aceptado: 12/01/2024

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 costly and time-consuming. 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 the percentage of Canopy openness, out of point clouds obtained from TLS. The results suggest that there is no pattern related with the specific 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.

Keywords: LiDAR, SSCI, ENL, Chronosequence, Lianas.

1. Escuela de ingeniería forestal, Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica, orlandojm98@gmail.com; maguevara@itcr.ac.cr; csoto@itcr.ac.cr; rquesada@itcr.ac.cr

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 porcentaje 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: LiDAR, SSCI, ENL, Cronosecuencia, Lianas.

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].

Dentro de este marco cabe mencionar el papel de las plantaciones forestales, que si bien es cierto son paisajes artificiales o diseñados por el ser humano, al igual que los bosques secundarios representan una importante fuente de fijación de carbono [15], [16]. Las plantaciones forestales, cumplen funciones ecosistémicas de mucho valor dentro de los paisajes forestales, a tal punto que se suelen llamar bosques domesticados, lo que refleja su similitud con los bosques y no tanto con los cultivos agrícolas [17].

Así como los bosques tropicales, las plantaciones forestales presentan el mismo patrón de incremento en biomasa y carbono fijado con el aumento en edad [15]. Conocer el comportamiento de estas variables es de suma importancia para el manejo forestal, sin embargo, el monitoreo de paisajes forestales 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 [18]. 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 [19], [20].

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 [21], [22]. 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 [23], [24] y pueden proporcionar datos altamente precisos sobre la densidad y la distribución de la vegetación [25], la estructura vertical de los bosques [26]–[28] y la detección de cambios en la estructura del bosque a lo largo del tiempo [29]–[31].

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 [24], [32]. 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 [33], [34], así mismo, ha demostrado ser de utilidad para el estudio de BsT en Costa Rica [35], lo que representa una oportunidad de estudiar nuevos estándares para el monitoreo forestal [36], permitiendo que la obtención de información objetiva, automatizada y de manera no invasiva, sea posible [37], [38].

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 corregistro de nubes de puntos y por ende la toma de datos en campo y el procesamiento de las nubes de puntos es más rápido [37], [39]. 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 [27]. De la mano del escaneo simple, varios autores mencionan el “escaneo simple múltiple” [27], [33], [37], [40], 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, la cual puede ser procesada por algoritmos programados para obtener variables de interés específicas de manera automatizada [41], [42].

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 [42]–[45], el porcentaje de Apertura del dosel para la caracterización horizontal del bosque [46], el “*Effective Number of Layers*” (ENL) para cuantificar de manera simple y objetiva la estructura vertical del bosque [27], [44], 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 melina de diferentes edades, ubicadas en la zona norte y caribe del país, para comparar la diferencia en la distribución espacial de sus atributos, utilizando escaneos simples no clasificados obtenidos a partir del uso del TLS.

Materiales 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),

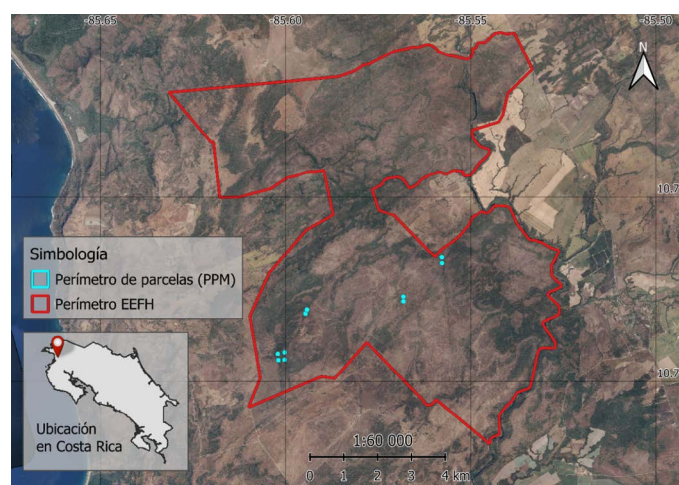


Figura 1. Ubicación de la Estación Experimental Forestal Horizontes (EEFH) y las 10 parcelas permanentes de muestreo (PPM) evaluadas.

Figure 1. Location of Estación Experimental Forestal Horizontes (EEFH) and the 10 permanent sampling plots (PSP) evaluated.

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 [47], con elevaciones no mayores a los 500 msnm [48], con una precipitación media anual entre 1100 y 1500 mm y temperaturas de entre 24° y 27,8° C [49].

La selección de los sitios de muestreo se basó en el trabajo realizado originalmente por Splitter [50], del cual Reyes [51] 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 [49] en 2012 y [48] en 2019. En cada uno de los sitios de estudio se establecieron dos PPM de 3600 m², de forma cuadrada con lados de 60 metros, compuestas por nueve subparcelas cuadradas de 400 m² 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

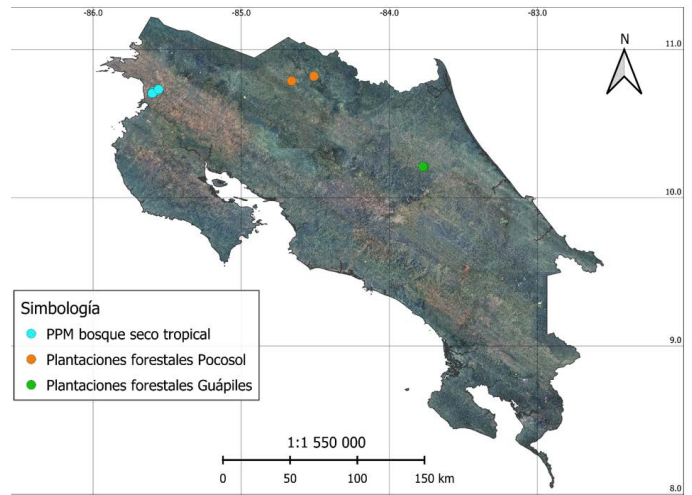


Figura 2. Ubicación de los puntos de escaneo realizados en el bosque seco tropical y en las plantaciones forestales.

Figure 2. Location of scanning points carried out in the tropical dry forest and in the forest plantations.

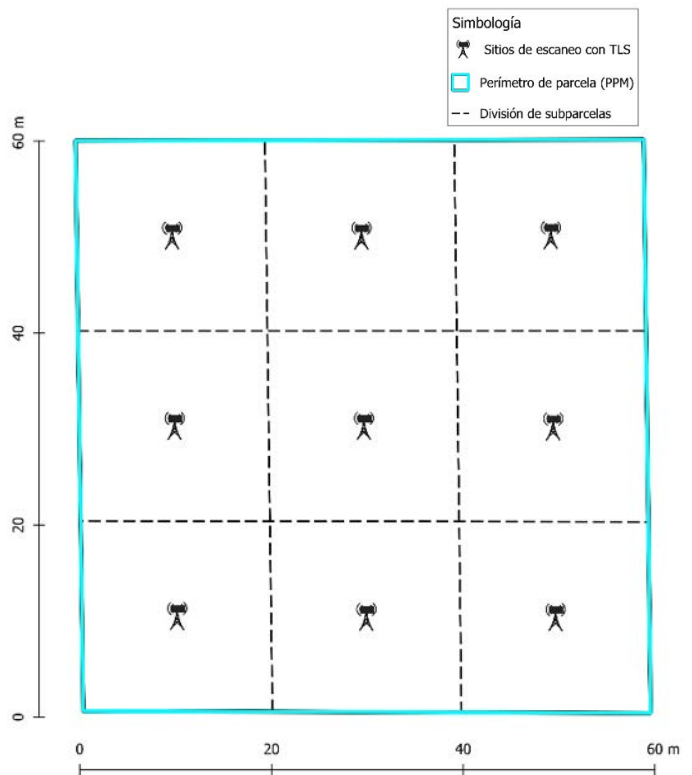


Figura 3. Distribución de los puntos de escaneo dentro de la PPM.

Figure 3. Distribution of scan points within the PPM.

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.

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 m², resultando en 9 unidades muestrales (UM) para cada PPM de 3600 m², para un total de 90 UM.

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 CHCNAV 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 espaciado entre puntos de escaneo, el área total de 3600 m² 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 [45].

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 [27], 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 [44]. 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 [27]. 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 [42], [44], donde un mayor valor en el índice representa una mayor diversidad en tamaños de los árboles y morfología de sus copas [43]–[45]. 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° y conectando cada punto contenido en el sector azimutal con líneas rectas a lo largo de todo el hemisferio, desde los 0° hasta el zénit a 90° y continuando desde este punto hasta los 180°, al dividir cada vista periférica en sectores de aproximadamente 0,14° 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 [42], [45]), 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 [27]. 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 [46].

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.

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 [35], 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 [52] generando grandes cambios en la estructura horizontal y vertical de bosques primarios y secundarios en el país [53], [54].

Es bien sabido que el impacto de los huracanes en bosque tropicales genera cambios importantes en su

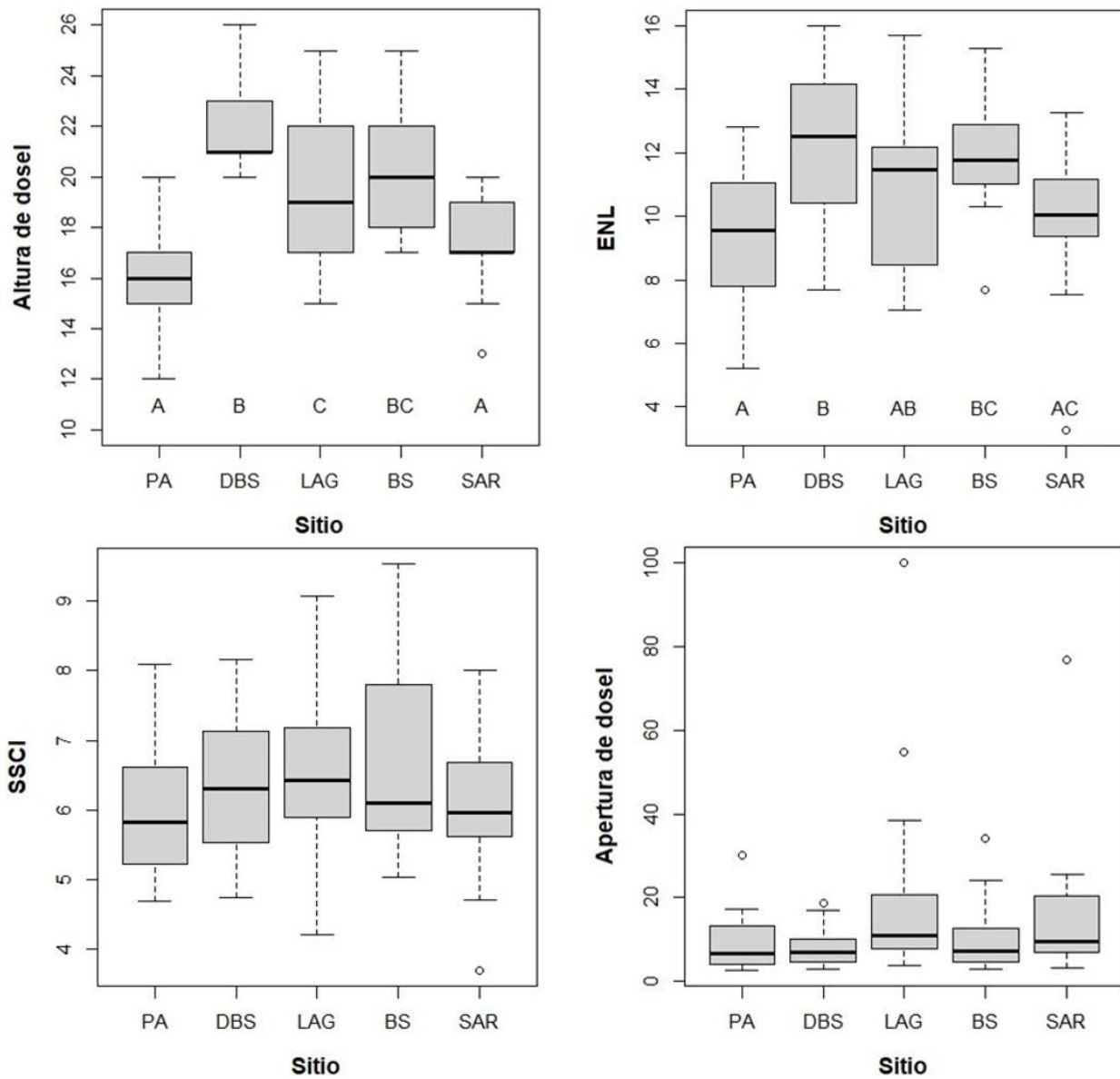


Figura 4. Gráficos de cajas para los resultados obtenidos de las variables Altura de dosel, ENL, SSCI y apertura de dosel, para cada sitio evaluado (sitios ordenados de menor a mayor tiempo en regeneración, izquierda a derecha en el eje x).

Figure 4. Box plots for the results obtained from the Canopy height, ENL, SSCI and canopy opening variables, for each evaluated site (sites ordered from shortest to longest regeneration time, left to right on the x-axis).

estructura y composición florística, además, generan alteraciones en los procesos ecosistémicos naturales de los bosques [55], principalmente en la estructura vertical debido a la caída y descopa de individuos, así como la importante defoliación que generan los fuertes vientos [56], 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], [57], para las

cuales se ha evidenciado que en bosques secundarios tropicales tienen una mayor abundancia en los estadios sucesionales jóvenes [58].

La abundancia de las lianas aumenta con las perturbaciones que enfrentan los bosques, principalmente en los bosques secundarios [1], [59], 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 [60]. Así mismo, a

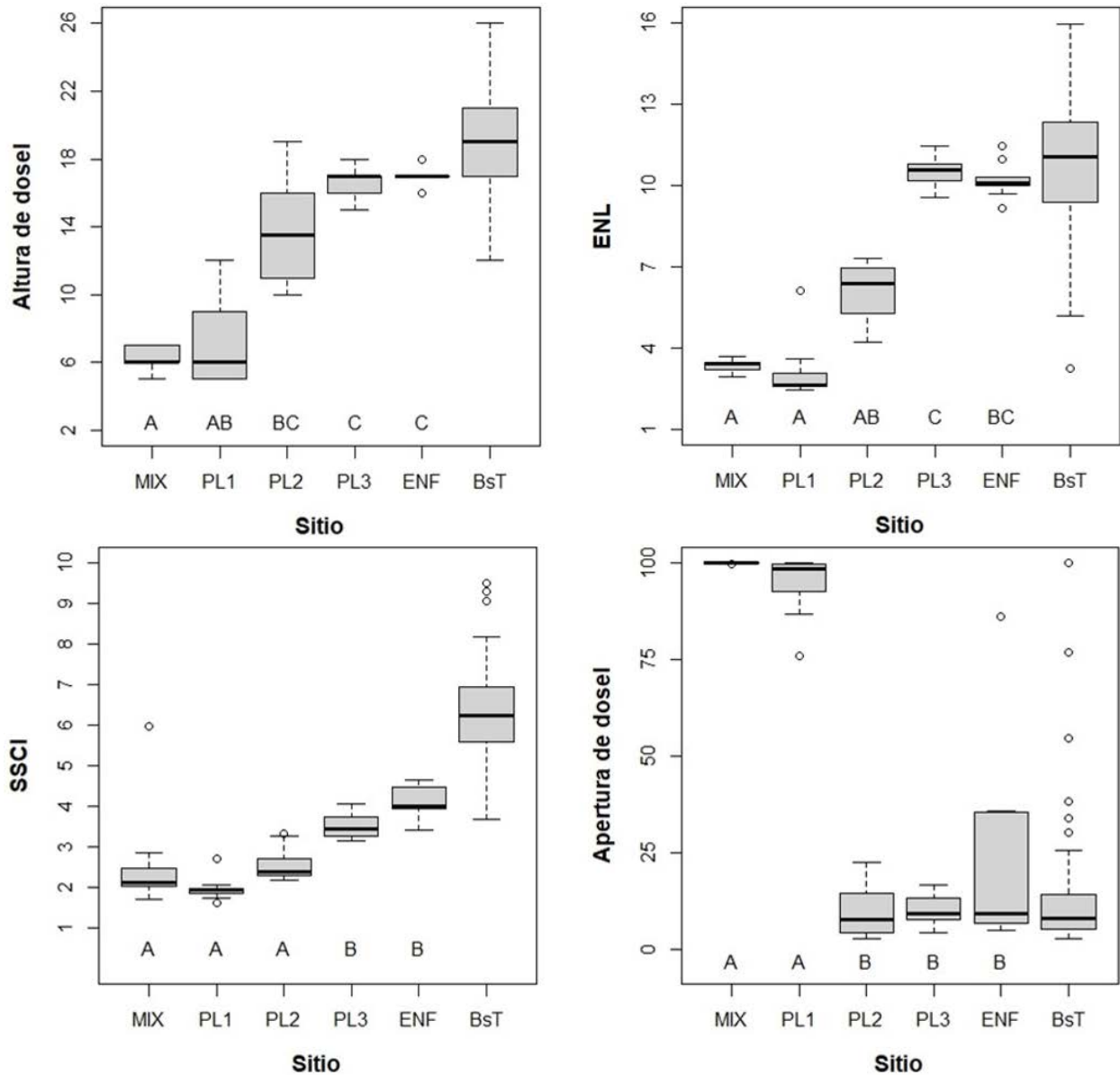


Figura 5. Gráficos de cajas para los resultados obtenidos de las variables Altura de dosel, ENL, SSCI y apertura del dosel, para las diferentes plantaciones forestales evaluadas y el BsT.

Figure 5. Box plots for the results obtained from the Canopy height, ENL, SSCI and canopy opening variables, for the different forest plantations evaluated and the TdF.

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 [35]. 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], [59] 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 [42] 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 [35] 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. El resultado de la plantación ENF, 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, debido 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.

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.

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

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
- [2] P. G. Murphy and A. E. Lugo, "Ecology of Tropical Dry Forest," *Annu Rev Ecol Syst*, vol. 17, pp. 67–88, 1986
- [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
- [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
- [5] G. A. Sánchez-Azofeifa et al., "Research priorities for neotropical dry forests," *Biotropica*, vol. 37, no. 4, pp. 477–485, Dec. 2005
- [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
- [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
- [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
- [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.
- [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, 2007
- [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
- [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. Accedido: 16 Feb. 2023.
- [15] W. Fonseca G, F. G. Alice, J. Montero, H. Toruño, and H. Leblanc, "Acumulacion_de_biomasa_y_carbono," *Agroforestería en las Américas*, vol. 46, 2008.
- [16] W. G. Fonseca, F. G. Alice, J. B. María Rey, and A. de correspondencia, "Modelos para estimar la biomasa de especies nativas en plantaciones y bosques secundarios en la zona Caribe de Costa Rica Models for biomass estimation in native forest tree plantations and secondary forests in the Costa Rican Caribbean Region," *BOSQUE*, vol. 30, no. 1, pp. 36–47, 2009.
- [17] D. D. Richter and J. C. Calvo, "¿Es una plantación forestal un bosque?," *Revista Forestal Centroamericana*, vol. 11, 1995.
- [18] 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.
- [19] 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
- [20] 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.
- [21] 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
- [22] N. Mehendale and S. Neoge, "Review on LiDAR technology," *SSRN Electronic Journal*, 2020, Accedido: 9 Jun. 2023. [23] 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
- [24] M. Beland et al., "On promoting the use of lidar systems in forest ecosystem research," *For Ecol Manage*, vol. 450, Oct. 2019
- [25] 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
- [26] 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.
- [27] 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
- [28] 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
- [29] 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
- [30] 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
- [31] 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
- [32] 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
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 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
- [37] 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
- [38] 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
- [39] 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
- [40] 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
- [41] J. A. Molina-Valero et al., “Operationalizing the use of TLS in forest inventories: The R package FORTLS,” *Environmental Modelling and Software*, vol. 150
- [42] M. Ehbrecht et al., “Global patterns and climatic controls of forest structural complexity,” *Nat Commun*, vol. 12, no. 1, Dec. 2021
- [43] 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
- [44] 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
- [45] 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
- [46] 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
- [47] L. R. Holdridge, *Life zone ecology*, no. (rev. ed.). Tropical Science Center, 1967.
- [48] 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,” Tesis de Licenciatura. Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2021.
- [49] P. Rigg-Aguilar, “Propuesta de línea base del plan de ordenamiento forestal para la Estación Experimental Forestal Horizontes, Área de Conservación Guanacaste, Costa Rica,” Tesis de Licenciatura. Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2013.
- [50] P. Spittler, *Potencial de manejo de los bosques secundarios en la zona seca del noroeste de Costa Rica*. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit, 2001.
- [51] D. Reyes-Cordero, “Análisis de los procesos de restauración pasiva para un bosque seco tropical en la Estación Experimental Forestal Horizontes, Guanacaste,

- Costa Rica,” Tesis de Licenciatura. Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2012.
- [52] A. Brenes Maykall, “Gestión del riesgo en Costa Rica e impactos del huracán Otto.” 2017.
- [53] 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,” Tesis de Licenciatura. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, 2017.
- [54] 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
- [55] E. V. J. Tanner, V. Kapos, and J. R. Healey, “Hurricane Effects on Forest Ecosystems in the Caribbean,” *Biotropica*, pp. 513–521, 1991
- [56] 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
- [57] 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,
- [58] 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
- [59] 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
- [60] 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