

Análisis florístico y estructural del bosque tropical en el Parque Nacional Palo Verde, Costa Rica

Floristic and structural analysis of tropical forest in Palo Verde National Park, Costa Rica


Elia Anahí Rodríguez-González¹, Casia Soto-Montoya²,
Ruperto Quesada-Monge³, Lupita Vargas-Fonseca⁴

Rodríguez-González, E.A; Soto-Montoya, C; Quesada-Monge, R; Vargas-Fonseca, L. Análisis florístico y estructural del bosque tropical en el Parque Nacional Palo Verde, Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 39 N° especial Tecnología en Marcha. Marzo, 2026. Vol. 39, N° especial VII Encuentro Bienal Centroamericano y del Caribe de Investigación y Posgrado. Marzo, 2026. Pág. 19-33.


 <https://doi.org/10.18845/tm.v39i6.8570>

1 Maestría en Ciencias Forestales, Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.

 erodriguez@estudiantec.cr


 <https://orcid.org/0009-0008-4824-0069>


2 Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.

 csoto@itcr.ac.cr


 <https://orcid.org/0000-0002-2275-7317>

3 Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.

 rquesada@itcr.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0003-4981-426X>

4 Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.

 lvargas@itcr.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0001-6254-9507>



Palabras clave

Biomasa; bosque; ecuación; teledetección; PN Palo Verde.

Resumen

Costa Rica ha aumentado la cobertura de copas arbóreas pero la deforestación y degradación del bosque persisten. El bosque tropical es un ecosistema escaso a nivel mundial, vulnerable a los incendios forestales y otros factores de degradación. El uso de tecnologías avanzadas como la teledetección con datos de inventario de campo es crucial para optimizar las mediciones y obtener información confiable para definir acciones para su restauración y conservación. Este estudio presenta resultados sobre la composición florística y la estructura del bosque en el Parque Nacional Palo Verde. Se analizaron estos datos a partir de clases de biomasa estimada mediante ecuaciones alométricas, como parte de una investigación más amplia que incluye otros dos sitios en la Ecorregión del Pacífico Norte. La información obtenida servirá de base para el desarrollo de un nuevo modelo estadístico para la estimación de biomasa aérea aplicable en bosques tropicales. Para el estudio, se evaluaron 30 parcelas de 500 m² establecidas con un receptor GNSS de alta precisión (RTK). Se midieron todos los árboles con un diámetro ≥ 5 cm y la altura total. El error de muestreo relativo fue de 11,48 %, con una densidad promedio de 1168 individuos ha⁻¹ y un área basal promedio de 17,84 m² ha⁻¹. La biomasa aérea estimada con ecuaciones alométricas osciló entre 46,43 Mg ha⁻¹ y 141,77 Mg ha⁻¹. Las especies más relevantes para la estructura del bosque, de acuerdo con el Índice de Valor de Importancia (IVI), fueron *Luehea candida*, *Guazuma ulmifolia* y *Calycophyllum candidissimum*.

Keywords

Biomass; forest; equation; remote sensing; NP Palo Verde.

Abstract

Costa Rica has increased its tree canopy cover; however, deforestation and forest degradation still persist. Tropical forests are globally scarce ecosystems and are particularly vulnerable to wildfires and other degradation factors. The use of advanced technologies such as remote sensing, combined with field inventory data, is essential to optimize measurements and generate reliable information to guide restoration and conservation actions. This study presents findings on the floristic composition and forest structure of Palo Verde National Park. The data were analyzed based on biomass classes estimated through allometric equations, as part of a broader research project that also includes two additional sites within the North Pacific Ecoregion. The information obtained will serve as a foundation for developing a new statistical model for estimating aboveground biomass in tropical forests. For this study, 30 plots of 500 m² were established using a high-precision GNSS receiver (RTK). All trees with a diameter ≥ 5 cm were measured, along with total height. The relative sampling error was 11.48%, with an average density of 1,168 individuals ha⁻¹ and a mean basal area of 17.84 m² ha⁻¹. Aboveground biomass estimated using allometric equations ranged from 46.43 Mg ha⁻¹ to 141.77 Mg ha⁻¹. The most structurally important species, according to the Importance Value Index (IVI), were *Luehea candida*, *Guazuma ulmifolia*, and *Calycophyllum candidissimum*.

Introducción

Se requiere un conocimiento más preciso de la estructura del bosque tropical para comprender mejor la dinámica, las amenazas a la biodiversidad y el estado de conservación de este bioma vulnerable. Según la definición bioclimática de la *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO) combinada con datos *CHELSEA*, en 2020 la superficie de bosque seco tropical con dosel cerrado ($\geq 40\%$) se estimó en 4,9 millones de km^2 , con una pérdida bruta de 561 719 km^2 (11%) entre 2001 y 2020 [1].

Costa Rica, desde el año 2000, ha registrado una tasa promedio de deforestación de 1 647 hectáreas por año [2]. Sin embargo, estudios de monitoreo basados en imágenes Landsat evidenciaron que, entre 2000 y 2005, el país experimentó una recuperación neta de 169 900 ha, equivalente a una tasa anual de recuperación del 0,66 %, mientras que la tasa anual de pérdida fue de apenas 0,09 %, lo que indica que la regeneración superó ampliamente la deforestación en ese período [3]. Esta tendencia de recuperación se ha consolidado en años recientes, alcanzando una cobertura forestal del 57,1 % del territorio nacional para 2021 [4]. Asimismo, el 27,6 % del territorio se encuentra bajo alguna categoría de área silvestre protegida [5], lo que evidencia avances significativos en conservación y gestión sostenible de los recursos forestales.

No obstante, aunque se han implementado grandes esfuerzos para la recuperación de cobertura, las zonas boscosas continúan siendo afectadas por los incendios forestales, en el 2023 la mayoría de las áreas afectadas se concentraron en el Área de Conservación Arenal Tempisque con 4 159,26 ha, representando el 69,2 % del total, seguido de Área de Conservación Guanacaste con 630,43 ha (10,5 %); por causas recurrentes como el vandalismo, las actividades de caza, quema de pastizales para ganado [6]. Aun así, se ha demostrado que los bosques secos tropicales en recuperación, incluso después de impactos humanos severos, mantienen un alto valor para la fauna [7].

A escala local, en el Parque Nacional Palo Verde (PNPV), la estructura horizontal evidencia un comportamiento típico de bosques en estado dinámico, con mayor número de individuos en las primeras categorías diamétricas [8]. El parque presenta aspectos geológicos muy diversos entre los cuales, se conoce que el material del suelo está formado por fracciones de calizas [9]. En este contexto, Muñoz et al. [10] ha comprobado que la geología (sustratos) y topografía determinan la estructura, diversidad y composición de los bosques, en particular la roca caliza puede constituir un entorno más favorable para el desarrollo de los bosques secos tropicales.

A la fecha, el avance tecnológico ha permitido importantes adelantos en las ciencias forestales, particularmente en las mediciones utilizando sensores remotos [11]. Complementariamente, a los estudios basados en teledetección, es fundamental ampliar continuamente los datos de inventario de campo, recopilando datos en áreas no representadas, utilizados para investigar nuevos sensores y parámetros que se están diseñando para estimar la biomasa forestal [12].

Este documento presenta resultados preliminares de la composición florística y estructural del bosque de PNPV, la cual, es analizada a partir de clases de biomasa estimada mediante ecuaciones alométricas con datos de campo, como parte de un estudio más amplio que incluye éste y otros dos sitios ubicados en la Ecorregión del Pacífico Norte de Costa Rica, información que sustentará a la generación del nuevo modelo matemático para la estimación de biomasa aérea aplicable en bosques tropicales.

Materiales y métodos

Zona de estudio. El estudio se desarrolló en el Parque Nacional Palo Verde (PNPV), perteneciente a la provincia de Guanacaste [9]. El cual se ubica en el centro de la Ecorregión Cuenca Baja del Tempisque. Abarca altitudes máximas de hasta 262 msnm, entre el periodo

2020-2024 se registró una precipitación anual hasta de 1 947 mm y una temperatura promedio anual de 28 a 39 °C [13]. El PNPV tiene una extensión total de 19 800 ha, de las cuales 10 926 ha corresponden a áreas boscosas [14].

Diseño de muestreo. Para garantizar la representatividad de las diferentes condiciones de biomasa, se generó una capa ráster mediante un modelo matemático (1) aplicado al bosque tropical [15]. Esta capa se construyó a partir del índice de vegetación de diferencia normalizado (NDVI) calculado sobre imágenes Sentinel-2A (1 de junio - 30 de noviembre de 2023), corregidas por nubes y cirros en Google Earth Engine (GEE) [16] y el sistema de referencia de coordenadas empleado fue CR-SIRGAS/CRTM05 (EPSG:8908). El procesamiento se complementó con herramientas de QGIS v3,34.

$$\ln(B) = -2,6 + 11,03 * (NDVI) \quad (1)$$

Donde:

LN(B) = logaritmo natural de la biomasa.

NDVI = índice de vegetación de diferencia normalizado.

Con base en esta capa, se establecieron tres categorías de biomasa aérea (clase 1 = baja, clase 2 = intermedia y clase 3 = alta), delimitadas mediante los percentiles 33 y 66 % con un código de *Python* en el programa *Geany*. Se seleccionaron 10 parcelas por cada categoría, a una distancia de caminos entre 100 a 300 m y no menor de 100 m a ríos y quebradas. Se registró información de variables dasométricas de individuos de diámetro ≥ 5 cm a 1,30 m de altura sobre el suelo, para evitar subestimación de la biomasa [17]. También, se estimó la altura total con hipsómetro láser (Nikon, Forestry Pro II) (se midió cada 10 árboles), se identificaron los individuos a nivel de género y especie y se documentaron con fotografías (Figura 1).

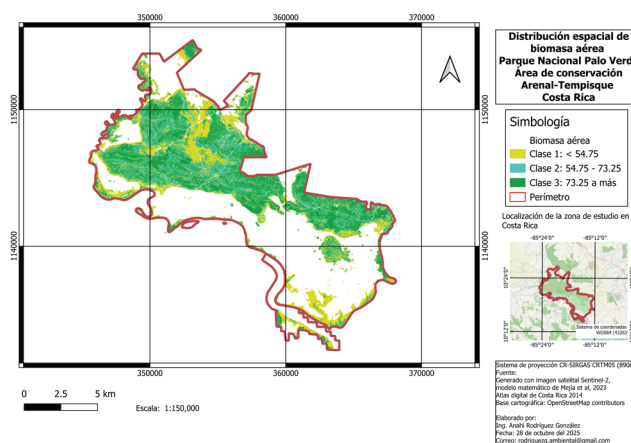


Figura 1. Distribución de la biomasa aérea en bosques del PNPV, 2025.

Nota: OpenStreetMap contributors. (2024). Standard Tile Layer [Mapa de teselas].

Recuperado de <http://tile.openstreetmap.org/{z}/{x}/{y}.png>.

A partir de la aproximación preliminar de biomasa aérea estimada mediante la ecuación (1), se obtuvo una referencia general sobre la acumulación de biomasa en el área de estudio. Con base en esta información exploratoria, se procedió a realizar el inventario forestal mediante un muestreo aleatorio, estableciendo un total de 30 parcelas circulares de 500 m² (radio de 12,62 m), por su facilidad para la colecta de datos [18] y su aplicación en estudios de biomasa aérea con Sentinel-2 [19], dentro de un área con cobertura boscosa de 10 926 ha.

Las parcelas se establecieron con apoyo de un receptor *GNSS* estándar (Garmin) y *GNSS* de precisión milimétrica *RTK* (*Real-Time Kinematic Global Navigation Satellite System*), por su eficiencia en condiciones con inclinación superior a 10 % [20], complementado con cinta métrica y brújula (Figura 2).

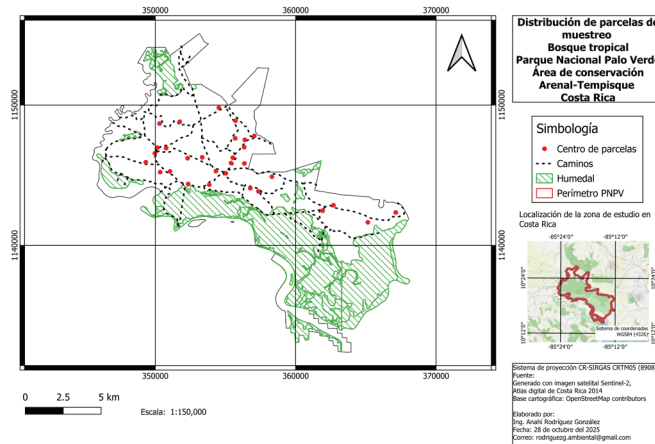


Figura 2. Distribución espacial de parcelas de muestreo en el PNPV, 2025.

Nota: OpenStreetMap contributors. (2024). Standard Tile Layer [Mapa de teselas].

Recuperado de <http://tile.openstreetmap.org/{z}/{x}/{y}.png>.

Estimación de biomasa aérea de los árboles. Se estimó la biomasa aérea en kg árbol^{-1} mediante las ecuaciones alométricas (2, 3, 4) de Fonseca et al. [21], utilizando como variable principal el diámetro, posteriormente se realizó una extrapolación a Mg ha^{-1} . A partir de esta estimación directa en parcelas, se establecieron nuevas clases de biomasa (clase 1, clase 2 y clase 3) mediante el método de percentiles 33 y 66 %.

$$\text{Biomasa fuste} = \exp(-2,27978 + 2,22575 * \ln(Dap)) \quad (2)$$

$$\text{Biomasa ramas} = \exp(-3,23177 + 2,38074 * \ln(Dap)) \quad (3)$$

$$\text{Biomasa hojas} = \exp(1,81502 + 0,0021515 * Dap^2) \quad (4)$$

Donde:

Dap es el diámetro del fuste a la altura del pecho (cm).

Ln es el logaritmo natural.

Composición florística. Se generó el porcentaje de especies con distribución horizontal continua, basado en el número de especies y su peso ecológico [22],[23]. Se estimó el peso ecológico (Índice de Valor de Importancia) de cada especie con los valores de área basal y número de individuos por hectárea para determinar la dominancia, abundancia y frecuencia relativa [22],[23], con el programa Excel (*Office Profesional Plus 2024*).

Se estimó la diversidad florística mediante el Coeficiente de Mezcla (CM) [22],[24], con la ecuación (5):

$$CM = \frac{\text{Número de especies}}{\text{Número total de individuos}} \quad (5)$$

Se evaluó la diversidad de especies (índice de Shannon) por clase de biomasa aérea, considerando riqueza y equitatividad, para conocer qué tan balanceada era la abundancia entre las mismas (especies), como indican otros estudios [25]-[26], con la fórmula de cálculo (6):

$$H = - \sum pi \ln(pi) \quad (6)$$

Donde: p_i es la abundancia proporcional (relativa) de la especie “i” respecto al total.

Según se ha reportado en diferentes estudios [22], [27], se determinaron las clases de frecuencia absoluta a partir de la agrupación de especies por las categorías: I (0-20 %) correspondiente a especies raras, II (21-40 %), ocasional, III (41-60 %), frecuente, IV (61-80 %), abundante y V (81-100 %), muy abundante.

Estructura horizontal y vertical. El análisis de la estructura horizontal se realizó mediante gráficos de distribución con datos de abundancia y área basal por hectárea. Para la estratificación vertical (alturas), se clasificó la altura en tres estratos con respecto a la altura superior del vuelo (piso superior > 2/3, piso medio entre < 2/3 y > 1/3, piso inferior < 1/3) [22]-[28].

Análisis estadístico y de consistencia. Se realizó los cálculos de estadísticas de precisión (con un alfa de 0,05) y los supuestos estadísticos con el programa *InfoStat* (v. 2020). Con este se evaluó la normalidad y la homogeneidad de varianzas, así como el error de muestreo relativo, la desviación estándar y el coeficiente de variación de las variables diámetro (cm), altura (m) y biomasa aérea (Mg ha⁻¹). Se excluyeron los valores atípicos identificados en el análisis de consistencia, con la finalidad estandarizar y disminuir la variabilidad y error en la construcción del nuevo modelo para estimación de biomasa aérea [29].

Resultados

Estadísticas obtenidas. El error de muestreo (E %) con un alfa de 0,05 en la estimación de la biomasa aérea fue de 11,48 %, en la medición del diámetro fue de 7,52 % y en la medición de la altura fue de 5,95 % (Cuadro 1).

Los valores bajos del error muestral evidenciaron consistencia en la toma de datos durante la etapa de campo, con un nivel mínimo de error, en concordancia con lo reportado por Yanai et al. [30] en inventarios forestales.

En el Cuadro 1 se resumen las estadísticas descriptivas y estructurales por clases de biomasa aérea en el PNPV.

Cuadro 1. Estadísticas descriptivas y estructurales por clases de biomasa aérea, PNPV, 2025.

| Clase | Biomasa Mg ha ⁻¹ | | | N/ha | G m ² /ha | CM | H |
|-------|-----------------------------|-------|----------|-------|----------------------|-------|-------|
| | Min | Max | Promedio | | | | |
| C1 | 46,43 | 69,43 | 56,6a | 1290a | 13,0a | 6,62a | 1,96a |
| C2 | 69,65 | 87,82 | 78,9b | 1120a | 17,34b | 3,96a | 2,19a |
| C3 | 90,34 | 141,8 | 110,7c | 1094a | 23,21c | 4,31a | 2,17a |

Los supuestos estadísticos mostraron que las variables, en general, siguen una distribución normal ($p < 0,05$) y cumplen con homocedasticidad. Sin embargo, al comprobar cada variable de forma independiente, se evidenció que no todas presentaban simultáneamente normalidad y homogeneidad de varianzas. Por esta razón, se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis y, adicionalmente, se transformaron las variables de biomasa y área basal por hectárea mediante logaritmo natural (Ln). Tras la transformación, se obtuvo para biomasa un valor de $p = 0,05$ y para área basal $p = 0,225$, confirmando homocedasticidad en ambos casos.

Los resultados del ANOVA indicaron diferencias significativas entre las clases con respecto a la biomasa ($p = 0,0001$) y el área basal ($p = 0,0001$). No obstante, no se detectaron diferencias significativas para el número de árboles por ha, el índice de Shannon (H) ni para el coeficiente de mezcla (CM).

Estimación de biomasa aérea con datos de parcelas. Los valores de biomasa oscilaron entre $46,43 \text{ Mg ha}^{-1}$ y $141,77 \text{ Mg ha}^{-1}$, en términos de distribución por componentes, el promedio de la biomasa aérea se concentró principalmente en el fuste (56,64 %), seguido por las ramas (35,56 %) y en menor proporción, por las hojas (7,8 %). Con base en estos resultados y con el propósito de facilitar el análisis espacial y la interpretación de los datos, se estableció una reclasificación de la biomasa aérea en tres categorías: Clase 1: $46,43\text{-}69,44 \text{ Mg ha}^{-1}$, Clase 2: $69,44\text{-}87,82 \text{ Mg ha}^{-1}$, Clase 3: $>87,82 \text{ Mg ha}^{-1}$.

Adicionalmente, con el propósito de analizar la distribución espacial de la biomasa aérea en el bosque del PNPV, se estimó la superficie correspondiente a cada clase, obteniéndose un total de $10\,755,74 \text{ ha}$, una vez excluidas áreas no boscosas como caminos y cuerpos de agua. De acuerdo con la clasificación generada, la Clase 1 abarcó $3\,549,40 \text{ ha}$, la Clase 2 comprendió $3\,549,72 \text{ ha}$ y la Clase 3 registró $3\,656,62 \text{ ha}$.

Estructura horizontal y vertical. El análisis estructural se realizó exclusivamente sobre el área efectiva de muestreo correspondiente a las 30 parcelas establecidas, que en conjunto abarcaron $1,5 \text{ ha}$, en la cual se determinó una densidad promedio de $1\,168 \text{ individuos ha}^{-1}$ y un área basal promedio de $17,84 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$. La estructura poblacional estuvo dominada por árboles de diámetros pequeños: el 79,8 % de los individuos se concentró en categorías de 5-15 cm de diámetro, el 1,33 % alcanzó diámetros entre 50-59,9 cm, representando individuos relictos, siendo la especie *Calycophyllum candidissimum* la que presentó el mayor diámetro registrado (56,9 cm). La distribución de los árboles ha^{-1} mostró la forma clásica de J invertida (Figura 3).

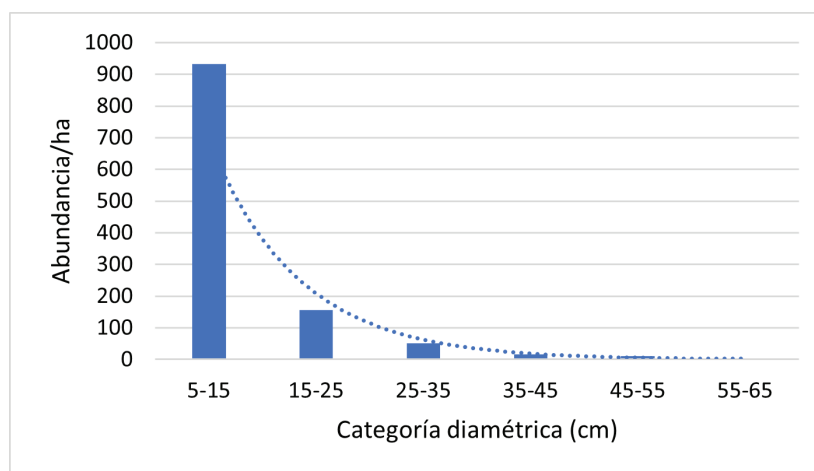


Figura 3. Distribución del número de individuos por hectáreas por categoría diamétrica en el PNPV, 2025.

Composición florística del sitio. El Índice de Valor de Importancia (IVI) permitió identificar las especies con mayor peso ecológico dentro del área de estudio, integrando la frecuencia, dominancia y abundancia relativas. En la Figura 4 se presentan las diez especies con mayor IVI, ordenadas de mayor a menor valor. En conjunto, estas especies concentran el 49,6 % del peso ecológico total del bosque.

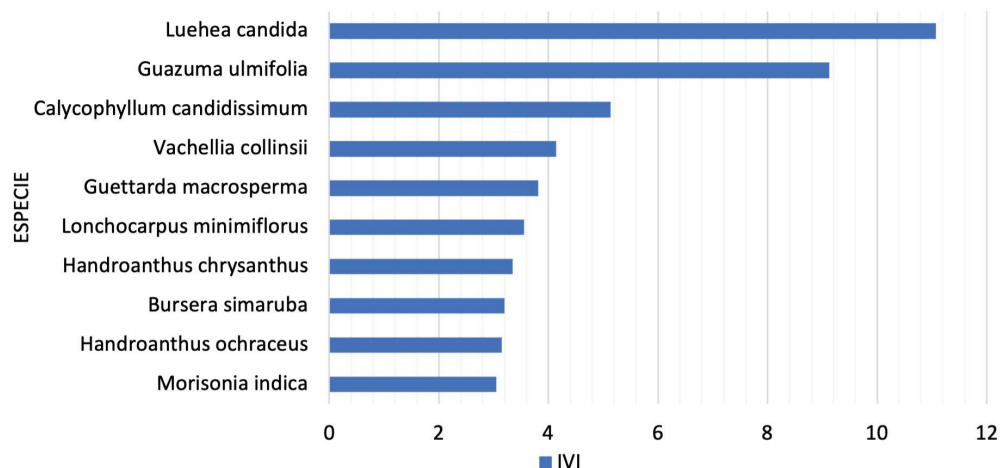


Figura 4. Especies con el mayor Índice de Valor de Importancia (IVI) en el PNPV, 2025.

A nivel de clases de biomasa aérea, la composición de las especies con mayor importancia ecológica mostró variaciones entre categorías. En la clase 1 se encontraron *Guazuma ulmifolia*, *Luehea candida*, *Vachellia collinsii*, en la clase 2 destacaron *Luehea candida*, *Guazuma ulmifolia*, *Handroanthus ochraceus*, mientras que en la clase 3 fueron nuevamente relevantes *Luehea candida*, *Calycophyllum candidissimum* y *Lysiloma divaricatum*.

En total se registraron 88 especies: 49 en la clase 1, 60 en la clase 2 y 58 en la clase 3. Estas cifras no son excluyentes, ya que varias especies estuvieron presentes en más de una clase de biomasa aérea. No obstante, se identificaron también especies exclusivas en cada categoría. En la clase 1 se identificaron nueve especies exclusivas, entre ellas *Cordia alliodora* y *Thouinidium decandrum*; en la clase 2 fueron diez, siendo algunas de ellas *Dalbergia retusa* y *Guaiacum sanctum*; mientras que en la clase 3 se encontraron quince, incluyendo *Swietenia macrophylla* y *Byrsonima verbascifolia* (Figura 5).

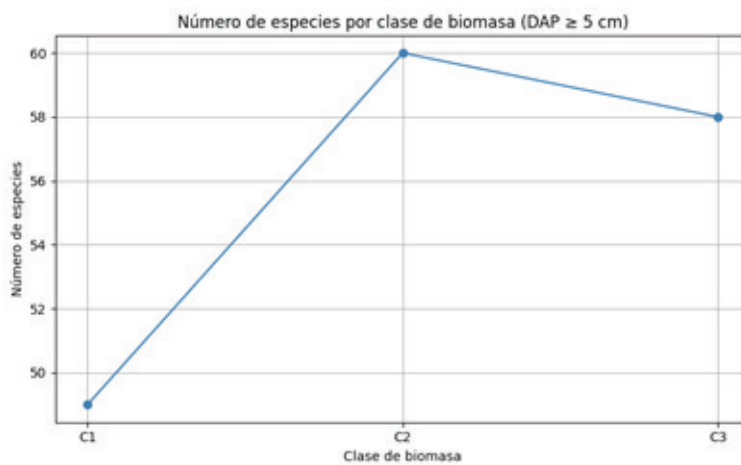


Figura 5. Número de especies registradas por clase de biomasa aérea en el PNPV, 2025.

Clases de frecuencia. La clase de frecuencia I (0–20 %) agrupó el 80 % de las especies registradas, lo que evidenció una alta proporción de especies con baja ocurrencia en las parcelas. Entre las especies con mayor frecuencia dentro de esta categoría destacaron *Allophylus psilospermus*, *Coccoloba guanacastensis*, *Gliricidia sepium*. La frecuencia II representó el 9 % del total, entre las que sobresalieron *Morisonia indica*, *Tabernaemontana donnell-smithii* y *Handroanthus ochraceus*. Por su parte, la frecuencia III concentró el 8 % incluyendo especies como *Vachellia collinsii*, *Lonchocarpus minimiflorus* y *Guettarda macrosperma*. La frecuencia IV agrupó únicamente el 2 %, correspondientes a *Luehea candida* y *Guazuma ulmifolia*, mientras que en la frecuencia V no se registraron especies.

Riqueza y diversidad florística. El cálculo de Coeficiente de Mezcla global para el sitio dio un valor de 1:20, cada 20 individuos se encontró una especie nueva. En la clase 1 el CM fue de 1:13, mientras que en las clases 2 y 3 alcanzó un valor de 1:9. Las especies predominantes fueron *Luehea candida* y *Guazuma ulmifolia* en las clases 1 y 2, mientras que en la clase 3 destacó *Luehea candida* acompañada de *Guettarda macrosperma*.

Índice de Shannon. El promedio obtenido para el Índice de Shannon de toda la muestra fue de 2,10. Los valores del Índice de Shannon por clase de biomasa fueron: C1 = 1,96, C2 = 2,19 y C3 = 2,17.

Discusión

Con base en el análisis estadístico, se confirmó que los resultados respaldaron la representatividad de las parcelas, lo que refuerza la validez del diseño de muestreo aplicado. En cuanto a la biomasa aérea, la variabilidad se explicó por la heterogeneidad estructural entre parcelas, en particular en la clase 1, donde se encontró individuos de diámetros pequeños junto con árboles relictos de gran tamaño.

De acuerdo con los resultados estadísticos, no se detectaron diferencias significativas en el índice de Shannon ni el coeficiente de mezcla entre clases de biomasa, lo que permitió inferir que la variación en la biomasa estuvo más asociada a diferencias estructurales del bosque (área basal) y no cambios en la diversidad florística o mezcla de especies.

Quesada et al. [31], con base en tres fases sucesionales propuestas por Spittler [32], describieron cambios estructurales asociados al avance sucesional, caracterizados por una disminución en el número de árboles (N/ha) y un incremento en el área basal por hectárea conforme aumentó la edad del bosque (Cuadro 2). En este estudio se encontró una disminución en el número de árboles en las tres clases de biomasa, acompañado de un aumento en el área basal.

Cuadro 2. Análisis comparativo estructural del bosque.

| Quesada et al. (2025) EEFH [27] | | | Resultados (2025) PNPV | | |
|---------------------------------|-------|---------------------------------|------------------------|------|---------------------------------|
| Edad | N/ha | Área basal (m ² /ha) | Biomasa aérea | N/ha | Área basal (m ² /ha) |
| Menor a 15 | 930 | 10,77 | Clase 1 | 1290 | 13,002 |
| Entre 15 y 35 | 687,5 | 17,17 | Clase 2 | 1120 | 17,29 |
| Mayor a 35 | 861 | 19,94 | Clase 3 | 1094 | 23,20 |
| Promedio | 826 | 15,96 | Promedio | 1168 | 17,84 |

En concordancia con el estudio de Calvo et al. [33], a medida que se incrementó el grado de desarrollo del bosque, aumentaron los valores de biomasa (Cuadro 3), siendo que el estadio temprano mostró valores inferiores con respecto al estadio tardío [33].

Cuadro 3. Valores comparativos de biomasa aérea Mgha⁻¹.

| Calvo et al. (2017) PNSR [29] | | Resultados (2025) PNPV | |
|-------------------------------|--|------------------------|----------------------------------|
| Estadio | Biomasa aérea PNSR Mgha ⁻¹ (2014) | Clasificación | Biomasa aérea Mgha ⁻¹ |
| Joven | 60,9 | Clase 1 | 56,60 |
| Intermedio | 195,3 | Clase 2 | 78,99 |
| Maduro | 205,4 | Clase 3 | 110,79 |

Las diferencias marcadas entre PNSR y PNPV se explicaron por la estructura diamétrica de los individuos registrados, con un máximo de 59,9 cm en el PNPV frente a 135 cm en el PNSR. Además, otros factores explicativos podrían ser los antecedentes de uso del suelo, los métodos de estratificación por estadio sucesional que no necesariamente son equivalentes a las clases por biomasa aérea de este estudio, la ecuación alométrica empleada para estimar biomasa y las diferencias en el tamaño, forma y distribución de las parcelas [21], [33].

Los resultados de este estudio se respaldaron con lo reportado por Fonseca et al. [21], quienes para bosques caducifolios del Pacífico Norte de Costa Rica estimaron una biomasa arbórea promedio de 130,8 Mg ha⁻¹, con valores entre 30,3 y 334,3 Mg ha⁻¹. Las ecuaciones alométricas desarrolladas en dicho trabajo, con R² superiores a 0,93, fueron aplicadas en esta investigación para la estimación de biomasa aérea en el PNPV, lo que reforzó la confianza de los resultados obtenidos.

En este estudio se registró una biomasa aérea máxima de 141,77 Mg ha⁻¹, valor que se ubicó próximo al promedio nacional reportado por Fonseca et al. [21]. Además, es consistente con lo documentado por Becknell y Powers [34], quienes señalaron que la biomasa aérea aumentó conforme avanza la sucesión. Esto permitió inferir que el bosque evaluado representó condiciones de recuperación, coincidiendo con la predominancia de individuos de diámetros bajos y escasa presencia de árboles de gran porte.

El promedio obtenido para el Índice de Shannon de toda la muestra fue de 2,10, valor que corresponde a una diversidad intermedia-alta. Los resultados obtenidos en este estudio se compararon con lo reportado por Solano [35] en los bosques del PNPV (Cuadro 4). Los valores del Índice de Shannon resultaron mayores en este estudio (C1 = 1,96; C2 = 2,19; C3 = 2,17), lo cual refleja la diversidad total acumulada. En el estudio de Solano [30] el índice de Shannon (H) aumentó conforme el bosque avanzó hacia estadios más avanzados. Sin embargo, este estudio encontró un aumento entre la C1 y la C2, pero el valor de H fue ligeramente menor en la C3. Esta relación se reforzó con lo observado en la figura 5, donde el número de especies (riqueza) se incrementó en la clase 2 y tendió a estabilizarse en la clase 3, posiblemente debido a la dominancia de especies de estadios más avanzados.

Cuadro 4. Análisis de diversidad: Índice de Shannon (H).

| Solano (2020) PNPV [30] | | Resultados (2025) PNPV | |
|-------------------------|------|------------------------|------|
| Estadio | H | Clase biomasa | H |
| Joven | 1,81 | C1 | 1,96 |
| Intermedio | 2,03 | C2 | 2,19 |
| Maduro | 2,53 | C3 | 2,17 |

El comportamiento de J invertida ha sido documentado como una tendencia común en bosques tropicales [36]. Conforme a lo mostrado en la figura 3, la mayoría de los individuos se concentraron en categorías diamétricas menores, con una reducción progresiva hacia los diámetros superiores, esto evidenció la capacidad de regeneración natural del bosque y continuidad en el tiempo, en concordancia con la autoecología de las especies [22].

Cabe destacar que, en el PNPV, según los lineamientos de manejo del parque, se otorgaron concesiones para pastoreo como medida preventiva frente a incendios forestales, al reducir el material combustible [9]. En contraste, en el PNSR se desarrollaron programas de restauración y manejo del bosque que incluyeron estrategias integradas de fuego y restauración del ecosistema [37]. Al comparar con otros estudios es importante tomar en cuenta otras variables. Por ejemplo, en la EEFH disturbios como incendios, pastoreo, suelos inundables y pendientes pronunciadas pudieron alterar el curso de las tres fases sucesionales, afectando el crecimiento de la vegetación [37].

Calvo et al. [38], demostraron la relevancia de incluir en el muestreo a los árboles con diámetro $a \geq 5$ cm, debido a que el número de tallos presentó un efecto positivo significativo, tanto en el almacenamiento ($p < 0,05$) como en la ganancia de carbono ($p < 0,001$). Esto sugiere que, la biomasa estimada calculada a partir de árboles ≥ 5 cm, cumplió con la tendencia natural de incrementar progresivamente conforme aumenta la categoría diamétrica. En promedio, los árboles de diámetros menores a 10 cm aportaron entre un 15 a 20 % de la biomasa y el área basal total, lo que sugiere que, aunque no contribuyeron de manera relevante en la captura de carbono actual, son fundamentales como parte de la regeneración y de la dinámica de acumulación de biomasa a largo plazo.

Se observó que la estructura vertical del bosque reflejó un patrón de acumulación de individuos en alturas inferiores, principalmente correspondientes al grupo de heliófitas efímeras y durables [39], entre las especies más abundantes en este estrato fueron *Luehea candida* (209 individuos) *Guazuma ulmifolia* (120 individuos) *Vachellia collinsii* (98 individuos) *Allophylus psilospermus* (75 individuos), lo cual concuerda con lo reportado en estudios recientes en bosques tropicales [35].

Este comportamiento no solo reflejó la composición florística, sino que además coincide con los hallazgos de Sánchez y Bax [40] quienes, por medio de un análisis vertical con LIDAR en el PNSR, concluyeron que la biomasa aérea tiende a concentrarse en los estratos bajos.

El número de especies aumentó y tendió a estabilizarse a medida que ocurrió la transición entre clases o estadio. Según estudios recientes [41], la interpretación del índice de Shannon mejoró cuando la diversidad se analizó mediante estratos.

La escasa presencia de individuos en el piso superior indicó una baja población de árboles emergentes, posiblemente como consecuencia de la historia de uso del bosque. Este patrón se reflejó en la dominancia de individuos jóvenes con alturas menores a 8 m en los sitios con menor acumulación de biomasa (clase 1).

Calycophyllum candidissimum y *Spondias mombin* fueron registradas en todas las categorías diamétricas, lo que evidenció una estructura horizontal continua. La capacidad de persistencia de estas especies es característica de poblaciones con regeneración sostenida y dinámica estructural estable en bosques tropicales [22]. Lo que permitió inferir que han mantenido procesos activos de dispersión y permanencia dentro del bosque.

En este estudio, la alta proporción de especies en la clase de frecuencia I indicó una distribución espacial localizada, es decir, que se encontraron en pocas parcelas, las más frecuentes dentro del grupo de especies raras fueron *Allophylus psilospermus* y *Coccoloba guanacastensis*. Por el contrario, la presencia de las especies *Luehea candida* y *Guazuma ulmifolia* en la categoría IV evidenció que estaban ampliamente distribuidas en el bosque.

El comportamiento observado por clases de frecuencia permitió inferir que la dinámica del bosque presentó una marcada heterogeneidad en la composición florística. Aunque algunas especies mostraron amplia distribución espacial, el ecosistema evaluado mantuvo una estructura composicional diversa, sin evidencias de dominancia absoluta. En este sentido, González y Castro [27] señalaron que la frecuencia constituye un indicador de la distribución espacial de las especies y permite interpretar su comportamiento dentro de la dinámica del bosque.

En condiciones promedio, el Coeficiente de Mezcla (CM) ha sido reportado en 1:7 para bosques tropicales, lo que reflejó una alta heterogeneidad de especies [22]. En este estudio, el valor global obtenido (1:20) indicó que los bosques presentaron una baja mezcla de especies y, por tanto, menor heterogeneidad florística. De manera complementaria, un estudio en bosque seco reportó un CM de 1:25,8; lo que evidenció una condición aún más homogénea [42].

Al analizar el CM por clases de biomasa, se demostró la dominancia marcada por pocas especies, aunque con una tendencia a mayor mezcla conforme aumentó la biomasa. Esta relación complementó al índice de Shannon, ya que, si bien se observó una diversidad media-alta, la distribución no fue uniforme y existió dominancia de unas pocas especies. Se encontró un incremento del número de especies entre las clases de biomasa aérea C1 (49 especies) y C2 (60 especies) que disminuye levemente en la C3 (58 especies), lo que reflejó una tendencia hacia el equilibrio en la riqueza conforme el bosque alcanzó estados de mayor biomasa.

Conclusiones y recomendaciones

En términos de composición florística y estructura, los bosques del PNPV presentaron una comunidad diversa y espacialmente heterogénea, caracterizada por una alta proporción de especies con distribución espacial localizada y ausencia de dominancia absoluta. La diversidad registrada (H' promedio = 2,10) reflejó una condición intermedia-alta con tendencia a estabilizarse en las clases de biomasa superiores, mientras que la estructura diamétrica en forma de J invertida evidenció procesos activos de regeneración natural.

La mayor acumulación de biomasa en las clases superiores estuvo asociada principalmente al incremento en el tamaño de los árboles, más que a cambios en la diversidad florística o en la densidad de individuos. En conjunto, estos resultados indican que el bosque evaluado se encontró en una condición de recuperación estructural, con predominancia de individuos jóvenes y presencia de algunos árboles relictos de mayor tamaño que contribuyen significativamente a la acumulación de biomasa.

Se recomienda incorporar en el análisis de los otros dos sitios de estudio, EEFH y PNSR, una evaluación comparativa de la distribución de la biomasa en los diferentes componentes arbóreos (fuste, ramas y hojas), con el fin de determinar su representatividad como reservorios de carbono. Asimismo, el análisis de la superficie correspondiente a cada clase de biomasa aérea permitiría fortalecer la planificación del manejo forestal a futuro, facilitando la priorización de áreas para conservación, restauración o aplicación de prácticas silviculturales específicas.

La metodología de estratificación por clases de biomasa con imágenes satelitales resultó ser útil para interpretar la composición y estructura, además de localizar zonas con menor o mayor acumulación de biomasa aérea, lo que permitió una distribución equilibrada de 10 parcelas por clase.

Se sugiere priorizar el seguimiento mediante teledetección para la estratificación de la biomasa por clases, con el fin de focalizar áreas de baja y alta acumulación y dirigir esfuerzos hacia su protección como fuentes de regeneración, núcleos de biodiversidad o reservorios de carbono, contribuyendo a la mitigación y adaptación frente a la variabilidad climática y el calentamiento global.

La metodología aplicada en este estudio es más objetiva, al generar clases por biomasa aérea y no por la edad del bosque, porque la clasificación en etapas sucesionales supone que el bosque se ha dejado desarrollar a partir de una fecha específica y no considera las múltiples alteraciones que sufre el bosque, que afectan su desarrollo y rendimiento.

Se recomienda ampliar el análisis de composición florística mediante la clasificación de especies en gremio ecológico, con el fin de identificar en cuáles se concentra la mayor proporción de biomasa aérea. Esto permitiría determinar si el bosque presenta estrategia predominante adquisitiva, es decir, caracterizada por una acumulación rápida de biomasa, pero con menor permanencia en el tiempo o conservativa, asociada a mayor longevidad. Asimismo, se sugiere incorporar un análisis de diversidad estructural y funcional que permita evaluar el bosque como una comunidad integrada, proporcionando criterios técnicos para el diseño de tratamientos silviculturales orientados a promover especies con mayor resiliencia frente al cambio climático.

Agradecimientos

Agradecemos profundamente el valioso apoyo brindado por el Servicio Alemán de Intercambio Académico (DAAD), al Comité del Fondo y Desarrollo de Becas del Instituto Tecnológico de Costa Rica, al programa de investigación de la Organización para estudios tropicales (OET), Asimismo, reconocemos la colaboración del Sistema Nacional de Áreas de Conservación de AC Arenal-Tempisque del Parque Nacional Palo Verde y Área de Conservación Guanacaste-Parque Nacional Santa Rosa y Estación Experimental Forestal Horizontes.

De igual manera, agradecemos al proyecto de Evaluación de la estructura del bosque mediante sensores remotos y validación de campo, en el Pacífico Norte de Costa Rica, bajo la dirección de docentes de la Escuela de Ingeniería Forestal y al equipo de trabajo en campo, conformado por docentes, estudiantes de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Forestal y de la Maestría en Ciencias Forestales.

Referencias

- [1] J, Ocón, T. Ibanez, J. Franklin, S. Pau, G. Keppel, G. Rivas Torres, M.E. Shin y T.W. Gillespie, "Global tropical dry forest extent and cover: A comparative study of bioclimatic definitions using two climatic data sets", PLoS ONE, vol. 16, no. 5, May., pp. 05-20, 2021.
- [2] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), "FAOSTAT: Emisiones derivadas de los bosques. 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.fao.org/faostat/es/#data/GF>. [Consultado: 26 de enero de 2024].
- [3] Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (FONAFIFO), Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC). Estudio de Monitoreo de Cobertura Forestal de Costa Rica 2005. I Parte: Clasificación de la Cobertura Forestal con Imágenes Landsat ETM+ 2005, San José, Costa Rica, 2007.
- [4] Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC), Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), "Plan Estratégico Institucional SINAC 2023–2030". SINAC–MINAE, 2023.

- [5] Ministerio del Ambiente y Energía (MINAE), "Cuarta Comunicación Nacional a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático", MINAE, 2021.
- [6] L. Corrales Chaves, "Tendencias, riesgos e implicaciones de la gestión de la biodiversidad en Costa Rica", CONARE-PEN, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.conare.ac.cr/server/api/core/bitstreams/f8aa0994-1d1f-431d-a757-efd7f9419c97/content>.
- [7] B. Hilje, N. V. Sánchez, E. M. Bayne y A. Sánchez Azofeifa, "Bird Assemblage Recovery in a Chronosequence of Tropical Dry Forests in Costa Rica", *Forests*, vol. 11, no. 6, Jun., Art. no. 629, 2020.
- [8] P. M. Solano-Solano, "Composición florística, estructura de bosque y diversidad de especies en bosques secundarios húmedos tropicales del Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica", Tesis de Licenciatura, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica, 2020.
- [9] Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC). "Plan General de Manejo del Parque Nacional Palo Verde. Volumen I – Diagnóstico". Área de Conservación Arenal Tempisque (ACAT). Guanacaste-Costa Rica. 2013.
- [10] R. Muñoz, M. Enríquez, F. Bongers, R. D. López-Mendoza, C. Miguel Talonia, and J. A. Meave, "Lithological substrates influence tropical dry forest structure, diversity, and composition, but not its dynamics", *Frontiers in Forests and Global Change*, vol. 6, Art. no. 1082207, mar 2023.
- [11] N. L. Vásquez and H. C. Sevilla, "Uso De Los Sensores Remotos En Mediciones Forestales", *European Scientific Journal*, vol. 14, no. 15, May., p. 58, 2018.
- [12] V. K. Dadhwal y S. Nandy, "Forest Biomass Assessment Using Multisource Earth Observation Data: Techniques, Data Sets and Applications", *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, vol. 52, May., pp. 703-709, 2024.
- [13] WorldClim, "WorldClim version 2.1: Free climate data," [En línea]. Disponible: <https://www.worldclim.org/data/worldclim21.html#> [Consultado: Aug. 29, 2025].
- [14] Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC), "Cobertura forestal de Costa Rica 2023". (s.f), [En línea]. Disponible en: https://www.snitcr.go.cr/ico_servicios_ogc_info?k=bm9kbzo6NDA=&nombre=SINAC. [Consultado: feb. 12, 2024].
- [15] Mejía, C., Andrade, H y Segura, M, "Estimación de biomasa y carbono con herramientas de teledetección en bosques secos tropicales del Tolima, Colombia". *Revista de Teledetección*, vol 62, Jul., pp. 57-70. 2023.
- [16] G. Código Domper, "Bajar imágenes Sentinel mediante script en GEE," YouTube, 2020. [En línea]. Disponible en: https://www.youtube.com/watch?v=mq_Qkfqp-tY&t=2s. [Acceso: Apr. 12, 2024].
- [17] T. Nguyen y M. Kappas, "Estimating the aboveground biomass of an evergreen broadleaf forest in Xuan Lien Nature Reserve, Thanh Hoa, Vietnam, using SPOT-6 data and the random forest algorithm", *International Journal of Forestry Research*, pp. 1-13, 2020.
- [18] L. F. Gonzales Tejena, "Determinación del volumen comercial en plantación de Teca (*Tectona grandis* L) utilizando tres formas de parcelas en el sitio Visquije del Cantón Santa Ana", Trabajo de Titulación, Carrera de Ingeniería Forestal, Facultad de Ciencias Naturales y de la Agricultura, Univ. Estatal del Sur de Manabí, Jipijapa, Ecuador, 2018.
- [19] N. Ahmad, S. Ullah, N. Zhao, F. Mumtaz, A. Ali, A. Ali, A. Tariq, M. Kareem, A. B. Imran, I. A. Khan et al., "Comparative analysis of remote sensing and geo-statistical techniques to quantify forest biomass", *Forests*, vol. 14, no. 2, feb., Art. no. 379, 2023.
- [20] H. Cho, J. Park y W. Lee. "Assessment of the GNSS-RTK for Application in Precision Forest Operations ", *Remote Sensing*, vol. 16, no. 1, Ene., p. 148, 2024.
- [21] W. Fonseca, R. Villalobos y M. Rojas, "Potencial de mitigación del cambio climático de los ecosistemas forestales caducifolios en Costa Rica: modelos predictivos de biomasa y carbono", *Revista de Ciencias Ambientales*, vol. 53, no. 2, Jul., 2019.
- [22] H. Lamprecht, *Silvicultura en los trópicos: Los ecosistemas forestales en los bosques tropicales y sus especies arbóreas, posibilidades y métodos para un aprovechamiento sostenido*, Eschborn, Alemania: GTZ, 1990. [E-book] Available: <https://es.scribd.com/document/550052790/Silvicultura-en-Los-Tropicos-Lamprecht>
- [23] C. B. Tipán Torres, "Eficiencia en la producción de carbono y madera en un bosque Siempreverde Piemontano de la Amazonía Ecuatoriana", Tesis de Maestría, Univ. Estatal Amazónica, Puyo, Ecuador, 2021.
- [24] R. Villalobos Chacón, "El manejo forestal del bosque secundario como alternativa de uso de la tierra en la zona norte de Costa Rica", *Revista Tecnología en Marcha*, vol. 35, no. 6, dic., pp. 70–78, 2022.
- [25] K. Kitikidou, E. Milios, A. Stampoulidis, E. Pipinis y K. Radoglou, "Using Biodiversity Indices Effectively: Considerations for Forest Management", *Ecologies*, vol. 5, no. 1, pp. 42-51, 2024.

- [26] C. M. Cusaro, C. Grazioli, F. Zambuto, E. Capelli y M. Brusoni, "An improved method for assessing simple sequence repeat (SSR) variation in *Echinochloa crus galli* (L.) P. Beauv. (barnyardgrass)", *Diversity*, vol. 14, no. 1, Dic., art. 3, 2022.
- [27] B. González y G. Castro, "Factores a considerar en la regeneración natural del bosque tropical seco en Nicaragua", *La Calera*, vol. 11, no. 16, pp. 05-11, 2011.
- [28] G. Estrada Valdés, A. R. Endara Agramont, S. Vázquez Lozada y F. S. Todd, "Forest Harvesting Impacts on the Structure and Composition of Coniferous Forests in Mexico", *Forests*, vol. 12, no. 8, Aug. art. 1068, 2021.
- [29] J. Torrez, "Evaluación de la utilidad de los sensores remotos Landsat-8 y Sentinel-2 para el monitoreo de calidad de agua en la Laguna de Apoyo", Tesis Ing., Universidad Nacional Agraria., Managua, Nicaragua, 2021.
- [30] R. D. Yanai, M. A. Arthur, J. D. Battles, C. R. Blinn, C. S. Campbell, S. Fraver et al., "Measurement uncertainty in a national forest inventory", *Forests*, vol. 14, no. 3, mar., Art. no. 628, 2023.
- [31] R. Quesada, M.V. Villalobos, L. Vargas. "Restauración silvicultural de los bosques secundarios de Guanacaste Costa Rica" [Manuscrito inédito], Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- [32] P. Spittler, "Potencial de manejo de los bosques secundarios en la zona seca del noroeste de Costa Rica", Investigación de Bosques Tropicales TÖB TWF-23s, Eschborn, Alemania: GTZ, 2001.
- [33] A. J. Calvo Obando, "Biomasa, carbono y CO2 equivalente acumulado en una cronosecuencia de bosque seco tropical en el Parque Nacional Santa Rosa, Costa Rica y el Parque Estadual de Mata Seca, Brasil," Tesis de Maestría, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal, Cartago, Costa Rica, 2015.
- [34] J. M. Becknell, L. K. Kucek y J. S. Powers, "Aboveground biomass in mature and secondary seasonally dry tropical forests: A literature review and global synthesis", *Biological Conservation*, vol. 149, no. 1, pp. 1-12, 2012.
- [35] P. Solano, "Composición florística, estructura de bosque y diversidad de especies en bosques secundarios húmedos tropicales del Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica", Tesis de Ingeniería, Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2020.
- [36] W. N. Ramírez Huila y N. E. Ayoví Garcés, "Estructura y composición arbórea del bosque seco tropical en el valle Sancán, Manabí, Ecuador", *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, vol. 10, no. 2, pp. 169-181, 2022.
- [37] Ministerio del Ambiente y Energía (MINAE), Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC), "Sistematización de la experiencia Programa de Restauración y Silvicultura, Área de Conservación Guanacaste", no. 10, San José, Costa Rica: MINAE-SINAC, 2021.
- [38] S. Calvo Rodriguez, G. A. Sánchez Azofeifa, S. M. Durán, M. M. Do Espírito Santo y Y. R. Ferreira Nunes, "Dynamics of carbon accumulation in tropical dry forests under climate change extremes", *Forests*, vol. 12, no. 6, jun., Art. no. 698, 2021.
- [39] Sistema de Información de Recursos Forestales de Costa Rica (SIREFOR), "Listado de especies con gremios ecológicos actualizados", 2018. [En línea]. Disponible en: https://www.sirefor.go.cr/Sirefor/publicaciones_tabla?nombre=Especies
- [40] C. Liu, A. Sanchez-Azofeifa y C. Bax, "Studying Tropical Dry Forests Secondary Succession (2005–2021) Using Two Different LiDAR Systems", *Remote Sensing*, vol. 15, no. 19, oct., Art. no. 4677, 2023.
- [41] S. He, D. Li, X. Yang, D. Qi, N. Shang, C. Liang, R. Liu y C. Du, "Environmental heterogeneity drives diversity across forest strata in *Hopea hainanensis* communities", *Diversity*, vol. 17, no. 8, ago., Art. no. 556, 2025.
- [42] J. Moscol, M. Puestas y E. Herrera, "Estructura y diversidad arbórea y su relación con el suelo forestal en un ecosistema de bosque seco", *Manglar*, vol. 19, no. 4, pp. 323-330, 2022.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Se realizó revisión gramatical y ortográfica de este artículo, empleando la herramienta de IA [*Prompt en Open AI 5, 2025*], con un grado de uso bajo. Con la cual se identificaron errores y permitió mejorar la fluidez del texto. No obstante, para garantizar el cumplimiento con los estándares de calidad de la revista, revisamos exhaustivamente todo el documento.

Para traducir partes de este artículo del español a inglés, utilizamos la herramienta de inteligencia artificial [*Matecat open source platform*] con un grado de uso bajo. La cual agilizó el proceso de traducción, sin embargo, realizamos revisión final para asegurar exactitud en las traducciones.