

 Vigilada Mineducación	GESTIÓN DE SERVICIOS ACADÉMICOS Y BIBLIOTECARIOS		CÓDIGO	FO-GS-15
	ESQUEMA HOJA DE RESUMEN		VERSIÓN	02
FECHA			03/04/2017	
PÁGINA			1 de 1	
ELABORÓ		REVISÓ	APROBÓ	
Jefe División de Biblioteca		Equipo Operativo de Calidad	Líder de Calidad	

RESUMEN TRABAJO DE GRADO

AUTORES:

NOMBRE(S) ALURA GINET APELLIDOS CARREÑO ROMERO

NOMBRE(S) DANIELA ALEJANDRA APELLIDOS MORA ÁLVAREZ

FACULTAD: CIENCIAS AGRARIAS Y DEL AMBIENTE

PLAN DE ESTUDIOS: INGENIERÍA AMBIENTAL

DIRECTOR:

NOMBRE(S) DIEGO ANTONIO APELLIDOS ACEVEDO LÓPEZ

TÍTULO DEL TRABAJO (TESIS): SERVICIOS ECOSISTÉMICOS DE LAS ESPECIES ARBÓREAS DE LA UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER SEDE CÚCUTA

RESUMEN. El proyecto se centra en evaluar la importancia de las especies arbóreas existentes y el servicio ecosistémico que prestan en la Universidad Francisco de Paula Santander sede Cúcuta. Primero, se utilizó información secundaria para determinar el método adecuado para la estimación del secuestro de dióxido de carbono (CO₂) y producción de oxígeno (O₂) a partir de la biomasa aérea. Además, se actualizó el censo florístico y se analizó la relación entre el diámetro a la altura del pecho y la altura total de las especies arbóreas. Por último, se calcularon los índices de valor de importancia y diversidad ecológica, consolidando los hallazgos en una nemotecnia para la sostenibilidad urbana. Como resultados se obtuvo que los árboles secuestran 1.334,34 toneladas de CO₂ por hectárea y generan 970,02 toneladas de O₂ por hectárea, donde el mayor aporte, en promedio, fue de especies nativas. El trabajo ofrece una visión integral para la gestión y manejo de los árboles y palmas tanto en la universidad, como en Cúcuta y otras áreas urbanas.

PALABRAS CLAVES: Biomasa aérea. -Secuestro de Carbono. -Árboles Urbanos. -Ciudades Sostenibles. -Producción de Oxígeno

CARACTERÍSTICAS

PÁGINAS: 196 PLANOS: ILUSTRACIONES: CD ROOM:

SERVICIOS ECOSISTÉMICOS DE LAS ESPECIES ARBÓREAS DE LA UNIVERSIDAD
FRANCISCO DE PAULA SANTANDER SEDE CÚCUTA

ALURA GINET CARREÑO ROMERO
DANIELA ALEJANDRA MORA ÁLVAREZ

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS Y DEL AMBIENTE
PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA AMBIENTAL
SAN JOSÉ DE CÚCUTA
2023

SERVICIOS ECOSISTÉMICOS DE LAS ESPECIES ARBÓREAS DE LA UNIVERSIDAD
FRANCISCO DE PAULA SANTANDER SEDE CÚCUTA

ALURA GINET CARREÑO ROMERO
DANIELA ALEJANDRA MORA ÁLVAREZ

Trabajo de grado presentado como requisito para optar el título de Ingeniera Ambiental

Director

DIEGO ANTONIO ACEVEDO LÓPEZ
Especialista en práctica pedagógica

Codirectora

ALEJANDRA MARIA SERPA JIMÉNEZ
Magister en Educación Ambiental

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS Y DEL AMBIENTE
PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA AMBIENTAL
SAN JOSÉ DE CÚCUTA
2023



ACTA DE SUSTENTACIÓN TRABAJO DE GRADO

FECHA: 25 DE OCTUBRE DE 2023

HORA: 10:00 AM

LUGAR: SALÓN SB 302 – AULAS SUR

PLAN DE ESTUDIOS: INGENIERÍA AMBIENTAL

TITULO:

SERVICIOS ECOSISTÉMICOS DE LAS ESPECIES ARBÓREAS DE LA UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER

MODALIDAD: INVESTIGACIÓN APLICADA

JURADOS:

ANTONIO NAVARRO DURAN
JORGE ALEXANDER RUBIO PARADA
WILHELMHERNANDO CAMARGO JÁUREGUI

DIRECTOR:

DIEGO ANTONIO ACEVEDO LOPEZ

CODIRECTORA: ALEJANDRA MARÍA SERPA JIMÉNEZ

<u>NOMBRE DEL ESTUDIANTE</u>	<u>CODIGO</u>	<u>CALIFICACIÓN</u>	<u>CALIFICACIÓN LETRA</u>
<u>ALURA GINET CARREÑO ROMERO</u>	<u>1651220</u>	<u>4.8</u>	<u>CUATRO PUNTO OCHO</u>
<u>DANIELA ALEJANDRA MORA ALVAREZ</u>	<u>1651205</u>	<u>4.8</u>	<u>CUATRO PUNTO OCHO</u>

OBSERVACIONES: MERITORIA

FIRMA DE LOS JURADOS:

ANTONIO NAVARRO DURAN

JORGE A. RUBIO PARADA

WILHEM H. CAMARGO JÁUREGUI

Vo.Bo. Coordinador Comité Curricular

DORANCE BECERRA MORENO

Tabla de contenido

	pág.
Introducción	15
1. Problema	17
1.1 Título	17
1.2 Planteamiento del problema	17
1.3 Formulación del problema	18
1.4 Objetivos	18
1.4.1 Objetivo general	18
1.4.2 Objetivos específicos	19
1.5 Justificación	19
1.6 Delimitaciones	21
1.6.1 Delimitación espacial	21
1.6.2 Delimitación temporal	21
1.6.3 Delimitación conceptual	21
2. Marco referencial	22
2.1 Antecedentes	22
2.2 Marco Teórico	53
2.2.1 Ecosistemas urbanos	54
2.2.2 Estimación de la biomasa-carbono	59
2.3 Marco Legal	60
3. Metodología	67
3.1 Tipo de investigación	67

3.2 Localización	67
3.2.1 Clima	68
3.3 Población y muestra	68
3.4 Instrumentos para la Recolección de Información	68
3.4.1 Fuentes Primarias	68
3.4.2 Fuentes Secundarias y Terciarias	69
3.5 Análisis de Resultados	69
3.5.1 Fase Exploratoria	69
3.5.2 Fase de Campo	75
3.5.3 Fase de Experimental	79
3.5.4 Fase de Análisis de Datos	81
3.5.5 Fase de Consolidación	85
4. Resultados	89
4.1 Evaluación de los registros de información secundaria	89
4.1.1 Análisis Bibliométrico	89
4.1.2 Revisión Literaria	95
4.2 Estimación del secuestro de carbono de las especies arbóreas y palmas	99
4.2.1 Inventario de flora	99
4.2.2 Correlación DAP - Altura total	108
4.2.3 Densidad de la Madera	112
4.2.4 Estimación de la Biomasa Aérea, Carbono y Productividad	117
4.3 Establecimiento de la nemotecnia para la comprensión de sostenibilidad ambiental	124
4.3.1 Importancia ecológica y diversidad del campus	124
4.3.2 Funciones ecosistémicas	137
4.3.3 Áreas verdes por estudiante	143

5. Discusión	147
5.1 Evaluación de los registros de información secundaria	147
5.2 Estimación del secuestro de carbono de las especies arbóreas y palmas	148
5.3 Establecimiento de la nemotecnia para la comprensión de sostenibilidad ambiental	155
6. Conclusiones	161
7. Recomendaciones	162
Referencias	164
Anexos	195

Lista de tablas

	pág.
Tabla 1. Servicios ecosistémicos de áreas verdes	56
Tabla 2. Disposiciones Legales concernientes al proyecto de investigación	61
Tabla 3. Operadores Booleano	71
Tabla 4. Indicadores y sus características cuantitativas	73
Tabla 5. Criterios de selección de artículos	74
Tabla 6. Interpretación del coeficiente r – Pearson	82
Tabla 7. Fórmulas para el cálculo del IVI	86
Tabla 8. Interpretación del índice de Shannon	87
Tabla 9. Identificación de especies por familia	101
Tabla 10. Especies identificadas en la UFPS, Cúcuta	103
Tabla 11. Origen de las especies de la UFPS, Cúcuta	107
Tabla 12. Análisis de correlación r y prueba t por especies	110
Tabla 13. Densidad de madera de los árboles	114
Tabla 14. Densidades promedio de la madera	116
Tabla 15. Productividad total por especie de árboles	118
Tabla 16. Productividad total por especie de palmas	120
Tabla 17. Productividad promedio por especie de árboles	121

Tabla 18. Productividad promedio de las especies de palmas	122
Tabla 19. Productividad total por familias	123
Tabla 20. Valores del índice de importancia por especies	125
Tabla 21. Valores del índice de importancia por familias botánicas	129
Tabla 22. Cálculo del índice de Shannon	130
Tabla 23. Número de especies por cuadrante	132
Tabla 24. Índices generados por PAST	135
Tabla 25. Funciones ecosistémicas de las especies	13
Tabla 26. Número de funciones por especie	142
Tabla 27. Áreas de coberturas en metros cuadrados	145

Lista de figuras

	pág.
Figura 1. Ubicación geográfica UFPS Cúcuta	67
Figura 2. Medición del DAP para diferentes troncos	76
Figura 3. Flujograma proceso para la toma de muestras de la madera de los árboles en pie.	78
Figura 4. Selección de valores atípicos a partir del error estándar	83
Figura 5. Número de documento por año	90
Figura 6. Número de documentos por áreas de conocimiento	91
Figura 7. Número de escritos por tipo de documento	92
Figura 8. Número de documentos por país	93
Figura 9. Análisis de co-ocurrencia	94
Figura 10. Análisis de co-autoría	95
Figura 11. Técnicas de estimación de biomasa aérea	97
Figura 12. Área de estudio: forestal y urbano	98
Figura 13. Zonas de vida	99
Figura 14. Mediciones dasométricas	100
Figura 15. Distribución de especies por familia	103
Figura 16. Especies identificadas en la UFPS, Cúcuta	106
Figura 17. Relación DAP-Altura total de los árboles de la UFPS	109

Figura 18. Factores que inciden en el crecimiento de los árboles	111
Figura 19. Toma y análisis de muestras de madera	113
Figura 20. Variación de la densidad de madera	116
Figura 21. Especies con mayor importancia ecológica	125
Figura 22. Familias botánicas de mayor importancia ecológica	128
Figura 23. Diversidad de Shannon por cuadrante	132
Figura 24. Taxa S	13
Figura 25. Diversidad de Alpha	136
Figura 26. Rarefacción	137
Figura 27. Mapa de coberturas 2017 - 2023	144

Listo anexos

	pág.
Anexo 1. Análisis bibliométrico	196
Anexo 2. Formato censo florístico	196
Anexo 3. Formato laboratorio densidades	196
Anexo 4. Matriz revisión literaria	196
Anexo 5. Censo florístico	196
Anexo 6. Correlación 2023	196
Anexo 7. Laboratorio densidades de madera	196
Anexo 8. Biomasa aérea	196
Anexo 9. Nemotecnia secuestro de carbono del arbolado UFPS	196
Anexo 10. Índices y funciones ecosistémicas	196
Anexo 11. Mapa de coberturas 2017 y 2023	196
Anexo 12. Mapa individuos arbóreos UFPS	196

Agradecimientos

En primer lugar, agradecemos al Creador por permitirnos alcanzar esta meta, dotarnos de capacidad y salud, y por su infinita bondad y paciencia que nos impulsaron a dar lo mejor de nosotras.

Extendemos nuestro agradecimiento al director de nuestro proyecto de grado, el ingeniero Diego Acevedo, por su orientación, apoyo y motivación para aprovechar nuestro potencial.

A la codirectora de nuestro proyecto, la ingeniera Alejandra Serpa, le agradecemos por su acompañamiento, guía y por ser pionera en nuestros primeros pasos como investigadoras desde el Semillero de Investigación en Aplicación y Evaluación Matemática (SEINAM).

Agradecemos a los evaluadores Antonio Navarro, Wilhelm Camargo y Jorge Rubio por su disposición en atender cualquier inquietud del proyecto y su orientación en el establecimiento de la nemotecnia.

Así mismo, al programa de Ingeniería Ambiental por su compromiso académico de alta calidad y su disposición para aportar los insumos necesarios para el proyecto.

A la profesora Alba Nely le agradecemos por su invaluable ayuda con los Sistemas de Información Geográfica, contribuyendo al desarrollo de nuestra nemotecnia.

Al profesor Evaristo Carvajal, nuestro agradecimiento por su constante disposición para compartir conocimientos botánicos.

Al profesor Arturo Arismendi, agradecemos su orientación en los primeros pasos del proyecto.

Agradecemos a la profesora Sonia Maritza y al profesor Pastor por ser parte fundamental en nuestro proceso de formación investigativa desde el Semillero de Investigación SEINAM.

Introducción

Colombia en sus esfuerzos para dar cumplimiento a los objetivos de desarrollo sostenible contenidos en la agenda 2030, ha formulado planes, políticas, estrategias y líneas de acción nacionales, departamentales y regionales. Razón por la cual, este proyecto se enfocó en evaluar la relevancia de las especies arbóreas y el servicio ecosistémico en la Universidad Francisco de Paula Santander, sede Cúcuta, desde la perspectiva de la purificación del aire y la promoción de ciudades sostenibles. Para ello, se llevó a cabo una revisión sistemática de la literatura relacionada con las técnicas utilizadas para estimar la biomasa aérea en bosques secos tropicales, un ecosistema de importancia en el contexto colombiano, debido a que, según el Instituto Humboldt (2014), actualmente abarca solo el 8% de su área original, y su fragilidad lo coloca entre los más amenazados en el neotrópico, lo que llevó al Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible a considerarlo estratégico para la conservación de la biodiversidad.

Posteriormente, se realizó un inventario detallado del campus, identificando 41 especies introducidas y 24 especies nativas, también, se tomaron muestras para calcular la densidad de la madera de las especies de árboles presentes, lo que permitió estimar el contenido de biomasa aérea con mayor precisión, así como la contribución a la reserva de carbono y la liberación de oxígeno de estas especies de árboles. Además, se analizaron factores clave relacionados con el crecimiento de los árboles, lo cual ayudó a comprender su dinámica en el contexto del estudio. Por último, se desarrolló una estrategia de divulgación que destacó la importancia ecológica de los árboles en el contexto de la sostenibilidad ambiental, utilizando una nemotecnia. A través de un análisis bibliométrico, se determinó que el uso de las ecuaciones alométricas es la técnica adecuada para estimar la biomasa aérea en el contexto del área de estudio, la cual consta de 65

especies distribuidas en 1.229 individuos identificados. También se reconoció que, las especies como Oithi, Chiminango y Samán son los principales contribuyentes a la captura de carbono atmosférico y la liberación de oxígeno, con un total de más de 3,600 toneladas de oxígeno producido.

Por otra parte, el estudio reveló una alta diversidad biológica en el campus, tanto en especies nativas como introducidas, y resaltó la importancia ecológica de los árboles, que cumplen funciones predominantes en términos de valor ornamental y mitigación de la contaminación acústica. De esta forma, los árboles y palmas presentes en el campus juegan un papel fundamental en la captura de carbono y la generación de oxígeno, contribuyendo significativamente a la mitigación del cambio climático y a la mejora de la calidad del aire. Además de su valor ecológico, los datos recopilados en este estudio podrían ser empleados en la planificación urbana de Cúcuta y otras ciudades, fomentando la incorporación de áreas verdes en el diseño de espacios urbanos sostenibles y mejorando la calidad de vida de sus habitantes.

1. Problema

1.1 Título

Servicios ecosistémicos de las especies arbóreas de la Universidad Francisco De Paula Santander sede Cúcuta

1.2 Planteamiento del problema

Cada vez son más evidentes los efectos del cambio climático, por ello, uno de los retos es tomar las medidas necesarias para aumentar la resiliencia además de prevenir y mitigar los impactos negativos causados por dicho cambio climático. Otro reto es reducir las emisiones de dióxido de carbono (CO₂), el cual, representa el 74% de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en Colombia y el 74.35% de las emisiones de GEI en Norte de Santander (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, et al., 2016). Debido a esta problemática, se han realizado convenios internacionales para hacerle frente al cambio climático, en ellos Colombia se ha comprometido a contribuir en la reducción de emisiones de GEI, adoptando las siguientes estrategias: estrategias de 2050 (E 2050), REDD+ (reducción de emisiones derivadas de la deforestación y degradación de los bosques), desarrollo bajo en carbono (ECDBC), protección financiera ante desastres, entre otras.

La expansión urbana y la modificación de la infraestructura interna disminuye la cobertura vegetal de los municipios colocando en duda el cumplimiento de áreas verde por habitante, es así que, Cúcuta debe contar con 9 metros cuadrados de área verde por habitante para el año 2040 (Gobierno de Colombia, 2021) a fin de potenciar los servicios ecosistémicos brindados por la

cobertura vegetal, de ahí el interés de realizar un estudio valorativo de la captura de CO₂ y producción de oxígeno como servicio ecosistémico de regulación brindado por las especies arbóreas en la Universidad Francisco de Paula Santander (UFPS), sede Cúcuta, con el fin de analizar la contribución del arbolado en la absorción del principal GEI considerando su comportamiento bioclimático propio de un bosque seco tropical que a nivel global es un ecosistema capaz de contribuir con el almacenamiento de biomasa terrestre en un 55% (Pan et al., 2011; Jones, et al, 2019), además de proporcionar el escalamiento del índice de área verde por habitante de Cúcuta a área verde por estudiante de la universidad.

1.3 Formulación del problema

¿Cuál es la importancia del arbolado de la Universidad Francisco de Paula Santander sede Cúcuta frente a los servicios ecosistémicos y como mecanismo de sostenibilidad ambiental institucional?

1.4 Objetivos

1.4.1 *Objetivo general*

Evaluar la importancia de las especies arbóreas existentes y el servicio ecosistémico que prestan en la Universidad Francisco de Paula Santander sede Cúcuta.

1.4.2 *Objetivos específicos*

✓ Evaluar los registros de información secundaria asociados a los servicios ecosistémicos de regulación y procesos de estimación de biomasa aérea.

✓ Estimar el secuestro de carbono de las especies arbóreas y palmas a partir de la biomasa aérea calculada por medio de ecuaciones alométricas en la Universidad Francisco de Paula Santander sede Cúcuta.

✓ Establecer una nemotecnia para la comprensión de la sostenibilidad ambiental a partir del servicio ecosistémico del arbolado en la Universidad Francisco de Paula Santander sede Cúcuta

1.5 Justificación

Los bosques secos tropicales (Bs-T) en el mundo constan de una extensión estimada de 1.048.700 Km², donde América del sur representa el 54,2% de dicha suma (Miles et al, 2006), y juegan un papel importante en el secuestro de carbono por su riqueza forestal (Groenendijk et al, 2017) de ahí su implementación como estrategia de mitigación en el calentamiento global (Dai et al., 2015), sin embargo, es un ecosistema poco estudiado por lo que se insta a nuevas investigaciones que revelen los aportes que logran brindan desde el panorama de sus servicios ecosistémicos (Montes y Pérez, 2018).

Unos de los servicios ecosistémicos que prestan los árboles son la regulación tanto del clima como de la calidad del aire debido a que ellos captan el CO₂, el cual es uno de los gases de efecto

invernadero; y producen oxígeno. Por ese motivo, los árboles son importantes al interior de las zonas urbanas, como Cúcuta, la cual se encuentra ubicada en ecosistema de Bs-T. De ahí que, el proyecto permita destacar la importancia de los árboles urbanos como contribuyentes en la reducción de CO₂, en consecuencia, en el aumento de la resiliencia de las ciudades acercándolas a adoptar el concepto de “ciudades sostenibles”; específicamente, se pretende conocer el aporte de los árboles de la UFPS en la captura de CO₂, el almacenamiento de carbono y la producción de oxígeno a partir de la biomasa aérea estimada de forma no destructiva gracias al uso de ecuaciones alométricas propuestas en el protocolo para la estimación nacional y subnacional de biomasa-carbono en Colombia conforme a la clasificación climática Bs-T por tanto se realizó un censo florística donde se registraron los datos taxonómicos de los árboles, además de dos variables dasométricas (altura y DAP) y se calculó la densidad de la madera por especie utilizando el instrumento Barreno de Pressler, lo anterior como variables claves para satisfacer las ecuaciones mencionadas. Además de diferenciar las funciones que cumplen diversas especies arbóreas en el ecosistema urbano teniendo como soporte distintas fuentes secundarias, para finalmente, proporcionar información relevante acerca de la importancia de los árboles urbanos como promotores de la sostenibilidad, servir como apoyo en investigaciones similares y fomentar la realización del inventario arbóreo de Cúcuta para tener un control y seguimiento del cual se apoye la gestión integral del arbolado urbano.

1.6 Delimitaciones

1.6.1 *Delimitación espacial*

Para el desarrollo del proyecto se considerará en totalidad las especies arbóreas presentes, en el campus de la Universidad Francisco de Paula Santander, sede principal Cúcuta ubicado a 7°53'53.59'' de latitud Norte y 72°29'16.16'' de longitud oeste y con una altura media de 301 metros sobre el nivel del mar.

1.6.2 *Delimitación temporal*

Las actividades correspondientes a recolección de datos, fase de campo, ejecución y análisis de datos se llevarán a cabo en el periodo de año y medio.

1.6.3 *Delimitación conceptual*

Los árboles urbanos contribuyen al equilibrio ecológico, la protección del hombre y al mejoramiento de su hábitat, por medio de los diferentes servicios ambientales que poseen y conforma un conjunto armonioso simultaneo para el cumplimiento de las funciones en la captación de dióxido de carbono y producción de oxígeno al medio estableciéndose como un servicio ambiental otorgado por los bosques urbanos, establecidos como la fibra principal para el sostenimiento urbano.

2. Marco referencial

2.1 Antecedentes

El ecosistema representa la zona de vida característica de una región que cumple con ciertos parámetros climáticos donde se desempeñan diversidad de funciones ecológicas simultáneas promoviendo beneficios socio ambientales que son amenazados por actividades antrópicas (Rangel & Martínez, 2017) de ahí el énfasis por promover investigaciones dedicadas al estudio de los Bs-T (Montes & Pérez, 2018) y a la cuantificación del carbono como mitigadores del cambio climático.

La estimación de la biomasa aérea de los árboles ha sido objeto de una amplia y diversa gama de investigaciones, que se han llevado a cabo utilizando principalmente dos enfoques metodológicos: el destructivo y el no destructivo. En el contexto de métodos no destructivos, se destacan las técnicas basadas en ecuaciones alométricas y la aplicación de tecnologías avanzadas, como LiDAR, fotogrametría, satélites, VANT (vehículos aéreos no tripulados) y teledetección. En este proyecto, nos enfocamos en el segundo enfoque, que implica el uso de ecuaciones alométricas, con el objetivo principal de evaluar el valor del servicio ecosistémico proporcionado por las especies arbóreas urbanas. En contexto, se presenta una revisión de la literatura científica publicada en los últimos ocho años, centrándose en estudios relacionados con la estimación de la biomasa en zonas de bosque seco tropical, aplicando las metodologías mencionadas anteriormente, con el propósito de proporcionar una visión actualizada del estado del conocimiento, directamente relevante para los objetivos de este proyecto.

Omar López, Rolando Pérez y Emilio Mariscal llevaron a cabo un estudio en el año 2015, enfocado en un fragmento de bosque seco tropical con el objetivo de analizar la composición florística del bosque y evaluar su importancia ecológica. Su investigación, titulada "Diversidad de árboles y arbustos en fragmentos de bosque seco tropical en Río Hato, Panamá", se centró en la delimitación de 61 parcelas de 100 metros cuadrados, se realizaron mediciones de DAP (Diámetro a la Altura del Pecho) para los individuos con un diámetro mayor a 5 centímetros. En el transcurso del estudio, se identificaron un total de 52 especies pertenecientes a 24 familias botánicas, entre ellas, las familias Fabaceae, Burseraceae y Myrtaceae destacaron por su alta presencia de especies. Además, la familia Fabaceae mostró la mayor frecuencia y dominancia relativa. Los resultados indicaron que el fragmento de bosque seco tropical bajo análisis presentaba una alta diversidad, según la clasificación de Shannon. En sus conclusiones, los autores destacaron la importancia ecológica significativa de la zona de estudio y enfatizaron la relevancia de la conservación de los bosques secos tropicales en la región.

En el estudio titulado "Estimación del CO₂ emitido y capturado en la sede Sabanas y el Campus Deportivo de la Universidad Popular del Cesar" realizado en el año 2015, se calcularon las emisiones de CO₂ empleando factores de emisión para las distintas fuentes de la universidad, además, se calculó la emisión por fuentes móviles teniendo en cuenta tanto el factor de conversión por cilindrada como la distancia recorrida de los vehículos. Con respecto al secuestro de carbono, los autores Kristinne Echávez, Yulbreyner Pastran y Ángel polo, realizaron un censo forestal donde registraron el DAP, altura comercial y total, diámetro de la copa, especie y coordenadas de cada individuo objeto del estudio. Lo anterior, se utilizó en el cálculo de la biomasa aérea por medio de la ecuación alométrica desarrollada por Chave para ecosistemas de bosque seco tropical, y el contenido de carbono se determinó con el factor de conversión 0,5. El

propósito del estudio fue cuantificar el secuestro de carbono en los árboles y las emisiones de CO₂ de la Universidad Popular del Cesar, sede Sabanas y Campus Deportivo, y sus resultados revelaron que en el año 2014 se generaron 47,67 ton de CO₂, donde las fuentes móviles representaron el mayor contribuyente de emisiones de CO₂ con 24,49 ton en el año. En cuanto a la captura de carbono, los árboles de ambas sedes capturaron 39.364,03 ton de CO₂ durante toda su vida. Además, las especies con mayor captación de carbono fueron la *Mangifera indica* (Mango), *Pithecellobium saman* (Algarrobillo) y *Tabebuia rosea* (Roble o Urapo).

Ahora, con el objetivo de cuantificar y comparar el carbono contenido tanto en la biomasa aérea como de las raíces de los árboles y monocotiledóneas al interior de la Universidad Autónoma de Occidente en Cali. La autora Brittany Largo Rodríguez obtuvo los datos de DAP, altura total, densidad, familia y especie, de la CVC-DAGMA-UAO (censo arbóreo de Cali), luego estimaron la biomasa tanto aérea como de las raíces, empleando ecuaciones alométricas propuestas por Brown et al. en 1989 y Sierra et al. 2003, respectivamente. El contenido de carbono fue calculado con el factor de conversión que indica que el 50% de la biomasa en las raíces es carbono, y 47% de la biomasa aérea también. En total, analizaron 260 árboles (36 especies) que capturaron 46,2 ton/ha en total, lo cual es una cantidad media-baja en comparación con otros ecosistemas tanto naturales como urbanos, por ello, los autores infieren que la mayoría de las especies son introducidas con propósitos ornamentales. Este estudio se realizó en el año 2017 y se tituló “Biomasa y fijación de carbono en el campus de la Universidad Autónoma de Occidente”.

También el año 2017, se realizó el estudio titulado “Plan de manejo del arbolado ornamental de la Universidad Francisco de Paula Santander, sede Cúcuta” por Yesid Mauricio Hernández

Daza y Paola Alejandra Patiño Contreras el cual tuvo como propósito elaborar un plan de manejo de los árboles presentes en la Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta. Para ello, los autores realizaron un inventario de las especies de palmas, árboles y arbustos de la universidad, donde llevaron registro del nombre común, nombre científico, ubicación geográfica (coordenadas), estado fitosanitario, estado integral y estado de la raíz del árbol, DAP, altura total, valor estético, afectación urbana, observaciones, entre otras. Como resultado, reconocieron 1032 individuos distribuidos en 47 especies, donde el Oithi fue la especie más abundante (232 individuos), seguido por el Árbol nim y Urapo (136 y 98 individuos, respectivamente). La palma real obtuvo un total de 84 ejemplares, la palma paraíso 24 y la areca 17. En cuanto al estado fitosanitario, 86 árboles presentan pudrición, 4 tumores, 6 gomosis, 1 clorosis y 60 plagas, además, 536 árboles fueron podados de forma antitécnica, lo que condujo a una serie de malformaciones y deterioro de los individuos arbóreos, los autores también encontraron árboles suprimidos por la elección inadecuada de la especie de árbol de acuerdo con el espacio disponible.

A su vez, se presentan estudios dedicados a demostrar los servicios ecosistémicos en coberturas tipo bosque seco tropical (Bs-T) por medio de la estimación de biomasa aérea desde la técnica de alometría teniendo en cuenta la clasificación climática, como el estudio elaborado por Liliana Zuluaga y Edison Castro en el año 2018 titulado “Valoración de Servicios Ambientales por Captura de CO₂ en un Ecosistema de Bosque Seco Tropical en el Municipio de el Carmen de Bolívar, Colombia”. Este bosque caribeño se caracterizó por su biodiversidad de especies, con un índice de valor de importancia (IVI) promedio del 67% y con un almacenamiento aproximado del 57.2 toneladas de carbono por hectárea (t/ha) distribuidas en 63 especies nativas la más representativa correspondió al Guacamayo (*Albizia niopoides*), que se

encuentra en más del 61% de las parcelas muestreadas. Para cuantificar el carbono, se utilizaron ecuaciones desarrolladas por Yepes en 2011 y densidades establecidas por Chave en 2005 para las especies identificadas en 353 transectos establecidos. Además, se midió la altura total y el diámetro a la altura del pecho (DAP) de especies maduras con un DAP superior a 10 cm. A su vez, el estudio reveló que la biomasa en los árboles fustales aumenta después de períodos de defoliación, en este proceso, los árboles regeneran la biomasa perdida y continúan secuestrando dióxido de carbono (CO₂) de la atmósfera. Los autores concluyeron, que existe muy poca información sobre la dinámica y estructura del bosque seco tropical, por lo que incentiva al desarrollo de nuevas investigaciones enfocadas a este contexto.

Ahora, en el estudio titulado "Análisis de la vegetación sucesional en un fragmento de bosque seco tropical en Toluviejo-Sucre (Colombia)," llevado a cabo por Dayana Olascuaga, Jorge Mercado y Luis Sánchez, se realizó la caracterización y el censo de la vegetación florística en tres estados de sucesión presentes en un bosque seco tropical ubicado a un kilómetro de Toluviejo. El objetivo del estudio era evaluar la cobertura forestal y su diversidad, para llevar a cabo esta investigación, se definieron los perímetros de muestreo y se identificaron un total de 138 especies, pertenecientes a 42 familias botánicas. La familia más abundante resultó ser la Fabaceae, seguida de Sapindaceae y Rubiaceae. Los resultados indicaron que los tres estados de sucesión presentaron una alta diversidad, según se determinó a través del índice de Shannon. El estado de sucesión intermedio mostró el valor más alto con 4.06, seguido del estado temprano con 3.26 y el estado tardío con 3.67. En cuanto a las especies de mayor valor ecológico en los diferentes estados de sucesión, se encontró que en el estado temprano destacaba *Astronium graveolens*, en el estado intermedio era más relevante *Brosimum alicastrum*, y en el estado tardío

también se registraba la presencia de *B. alicastrum*. Estos hallazgos proporcionaron una visión más clara de la dinámica de la sucesión en el bosque seco tropical de Toluviejo-Sucre.

Igualmente, en el departamento de Sucre, pero en el municipio de Galeras, Mayerlys Sofía Hernández Anaya realizó un estudio, donde evaluó la vegetación en ocho parques y siete calles con una mayor extensión de metros cuadrados. La investigación tenía como objetivo principal analizar la diversidad y la estructura de la flora urbana en estas áreas. El estudio implicó la realización de un inventario detallado de las zonas de estudio, posteriormente, se procedió a la caracterización de los individuos vegetales según su tipo (lianas, hierbas, arbustos, árboles y palmas). Además, se definieron aspectos relacionados con la estructura forestal y se estimó la biomasa aérea mediante ecuaciones alométricas específicas para los ecosistemas de estudio. De esta manera, se logró determinar la cantidad de carbono almacenado a través del uso de factores de conversión de biomasa a carbono. Los resultados del estudio, titulado "Diversidad, estructura y captura de CO₂ de la flora urbana del municipio de Galeras, departamento de Sucre, Colombia," arrojaron un total de 1,190 individuos distribuidos en 125 especies. De estas especies, 67 eran de origen nativo y 51 de origen introducido, pertenecientes a 44 familias. La familia más numerosa fue Leguminosae, seguida de Apocynaceae y Moraceae. El análisis también reveló que los árboles eran el tipo de vegetación más abundante, seguidos por los arbustos y las palmas. En cuanto a la importancia ecológica de los rodales, destacaron especies como *Mangifera indica* en la categoría de árboles, *Ixora coccinea* en arbustos y *Adonidia merrilli* en palmas. Entre los parques estudiados, Pelinkú mostró el mayor secuestro de dióxido de carbono, mientras que Galilea registró el menor. Las conclusiones del estudio resaltaron la alta y media diversidad en las áreas verdes evaluadas. Además, enfatizaron la importancia de la

planificación de la biodiversidad urbana, que debe tener en cuenta la estructura ecológica y las estrategias de conservación de los servicios ecosistémicos en las zonas urbanas.

Ese mismo año en la región de Indonesia cuatro investigadores de distintas universidades publican “Secuestro de carbono por biomasa aérea en espacios verdes urbanos de la ciudad de Singaraja” por Oviantari, Gunamantha, Ristiati, Santiasa y Astariani con el objetivo de determinar la cantidad de biomasa secuestrada y su potencial de almacenamiento de carbono de las zonas verdes presentes en la ciudad implementando ecuaciones alométricas para el arbolado y el factor de expansión de biomasa para las herbáceas y hojarasca, al momento determinar el carbono se apoyó del método de Walkley y Black aplicado para dos zonas de muestreo en la ciudad de Singaraja. El análisis de datos demostró para ambas zonas que la vegetación herbácea contiene mayor cantidad de biomasa promedio en toneladas, el segundo lugar se rivalizaba entre el arbolado y la hojarasca, sin embargo, los autores señalaron que lo anterior no desmiente el gran potencial que presentan los árboles en la captura de carbono de donde argumentaron la importancia del arbolado dentro de las ciudades.

Simultáneamente, en Alemania, se llevó a cabo un estudio poco convencional titulado "La influencia de los parámetros vegetales individuales y la composición de las especies en el potencial alergénico de los espacios verdes urbanos." El enfoque de la investigación se centró en el área verde del parque Hofgarten, ubicado en la ciudad de Eichstätt, con el propósito de evaluar el potencial alergénico generado por este espacio. Los autores del estudio, Susanne Jochner-Oette, Teresa Stitz, Johanna Jetschni y Paloma Cariñanos, argumentaron que, si bien el estudio de la estructura ecológica urbana es importante, es esencial considerar el índice de potencial alergénico en la planificación de la biodiversidad urbana y la conservación de los servicios

ecosistémicos para garantizar el bienestar de la comunidad. Para llevar a cabo esta evaluación, se desarrolló un índice de alergenidad específico para el área de estudio, la única variable dasométrica considerada en este índice fue la altura total de los individuos. Se identificaron un total de 231 individuos arbóreos y 69 individuos arbustivos en una extensión de 2.2 hectáreas, además, se utilizaron constantes previamente definidas para crear este índice. No obstante, los investigadores concluyeron que se requieren más estudios en este enfoque de conocimiento para asegurar su validez y destacar su importancia en la gestión de áreas verdes en entornos urbanos.

De igual manera, en la capital de Irlanda, se publicó el estudio "Diversidad de árboles en parques urbanos de Dublín, Irlanda," realizado por el investigador Chunping Xie. En este estudio, se evaluó la estructura florística y la diversidad de árboles presentes en 34 parques de la ciudad, los cuales fueron clasificados en dos categorías: parques históricos y parques modernos. Para llevar a cabo este análisis, el autor optó por estudiar la clase diamétrica de los rodales para evaluar la estructura forestal y definir la diversidad e importancia ecológica en cada área de estudio. Los resultados revelaron la presencia de un total de 8,603 individuos arbóreos distribuidos en 139 especies, la mayoría de las cuales se registraron como de origen introducido y pertenecientes a 37 familias botánicas. Además, se observó que las familias Aceraceae, Rosaceae y Tiliaceae destacaron por su importancia ecológica en los 34 parques urbanos estudiados. El autor también identificó similitudes en el tamaño de la altura y la copa de los árboles, lo que sugiere cambios en los rodales a lo largo de distintos periodos históricos y su influencia en el crecimiento de los árboles.

En cuanto a investigaciones difundidas en el año 2019, se expone la investigación titulada "Biomasa Aérea en Estados Sucesionales del Bosque Seco Tropical en el Norte del Tolima,

Colombia," a cargo de Polonia Cleves Karen Astrid. Este estudio se centró en la estimación de la biomasa aérea en diferentes estados sucesionales del bosque seco tropical en los municipios de Honda, Armero-Guayabal y Falán, para lograr este objetivo, los autores establecieron monitoreos en parcelas de 0,1 ha y crearon un total de 12 parcelas distribuidas en cuatro estados de sucesión: tardío, intermedio, temprano y degradado, hicieron uso de ecuaciones alométricas para cuantificación del carbono considerando tres variables dasométricas (altura, DAP y densidad de la madera). Los resultados revelaron la presencia de 1.903 individuos pertenecientes a 124 especies de las cuales 10 de ellas representaron el 45% del total del IVI. La parcela en estado sucesional tardío e intermedio mostró la mayor biodiversidad de especies, sin embargo, los valores más altos de biomasa aérea se registraron en el estado sucesional intermedio, donde la especie *Anacardium Excelsum* destacó al contribuir con una cantidad significativa de biomasa, alcanzando 31,28 t/ha. Además, de las 44 familia identificadas, Fabaceae presentó el mayor número de especies, seguido de la Lauraceae y Malvaceae.

La técnica alométrica también se ha aplicado en sistemas agroforestales, como se exploró en el estudio de caso “Cuantificación de las reservas de carbono de las capas de los árboles en un bosque alimentario templado: un estudio de caso de policultivo periurbano” del bosque alimentario periurbano en el Agroforestry Research Trust en Devon, Reino Unido por Lucas Schafer, Marin Lysák y Christian Henriksen. El objetivo consistió en estimar el carbono almacenado en este bosque y destacar su potencial como sumidero de carbono. Se midieron árboles con alturas superiores a 2 metros y el DAP mayor de 2 centímetros, se recopilaron datos dendrométricos de los 528 individuos presentes en la zona. La biomasa aérea se estimó utilizando veintitrés ecuaciones alométricas específicas para la región, mientras que la biomasa subterránea se calculó mediante la relación raíz-brote. Los resultados sugieren que este tipo de

bosque puede tener un secuestro de biomasa comparable a otras coberturas presentes en entornos urbanos. Este estudio se publicó en 2019 y destaca la importancia de continuar investigando la valoración ambiental de los bosques alimentarios.

Además, se ha estudiado la intervención de variables bióticas y abióticas que afectan el secuestro y almacenamiento de carbono en las coberturas forestales que según Alejandro Souza y Jonas Longhi; las tala indiscriminada, las temperaturas atípicas y las precipitaciones inusuales afectan a las zonas boscosas tropicales significativamente en su proceso de biomasa como lo explican en su publicación “La historia de las perturbaciones media los efectos del cambio climático en la biomasa y la dinámica de los bosques subtropicales” publicada en el 2019, donde corroboraron la significativa influencia del cambio climático en la estructura y dinámica de los bosques afectados por perturbaciones históricas aplicado al Bosque Nacional Sao al sur de Brasil. Para ello, definieron cinco parcelas correspondientes a bosques maduros no intervenidos y las otras 5 a bosques maduros que experimentaron una tala selectiva no controlada en algún momento, cada muestreo fue de 10 ha de modo que identificaron los distintos individuos vegetales por especie y familia, seguido de calcular su biomasa por medio de los parámetros y alometría establecidos por Chave, Tirpolo y Sanquetta según el tipo de vegetación de la región y encontraron que la cantidad de biomasa fue mayor en los bosques no intervenidos con signos de crecimientos positivos al carbono, característica no encontrada en las otras parcelas.

A su vez, en el territorio africano se impulsó la indagación “Cuantificación de la biomasa aérea y almacenamiento de carbono de especies de árboles urbanos en la metrópolis de Sokoto, noroeste de Nigeria” por Angulla Murtala, Latifah Abd Manaf, Mohammed Firuz Ramli, Mohd Rusli Yacob, y Ahmad Makmom en el año 2019, el cual abordó la estimación de la biomasa en

200 parcelas de 30 metros por 30 metros. El estudio se caracterizó por delimitar cuidadosamente las áreas de muestreo, identificar un total de 722 árboles pertenecientes a 30 especies y 14 familias diferentes, y recopilar las diversas variables dasométricas (altura total, diámetro a la altura del pecho, área basal) necesarias para aplicar la ecuación alométrica desarrollada por Brown, Gillespie y Lugo, la cual, se utiliza para cuantificar la biomasa aérea en climas secos. Este estudio reveló que las dos especies arbóreas con mayor capacidad de secuestro de carbono fueron la *Azadirachta indica* (Neem) y la *Mangifera indica* (Mango). Además, se destacó que las áreas verdes presentaban una densidad de carbono considerablemente mayor en comparación con las áreas de cultivo, lo que llevó a los autores a señalar su importancia como sumideros de carbono y su capacidad para absorber significativas cantidades de dióxido de carbono en entornos urbanos. Estos hallazgos respaldaron la relevancia de las áreas verdes en la mitigación del cambio climático.

Chamorro María y Falconi Saddams llevaron a cabo el cálculo del secuestro de carbono en el área urbana de 89 parques distribuidos tres distritos de la provincia de Huancayo, Perú en el año 2019 titulado “Potencial De Secuestro De Carbono Por Los Árboles En Los Parques Urbanos De Los Distritos De El Tambo, Huancayo Y Chilca”. Este estudio se basó en dos enfoques metodológicos; el primero fue naturaleza descriptiva no experimental donde la recopilación y presentación de datos fue en un solo momento, sin seguimiento a lo largo del tiempo. Este enfoque incluyó la identificación de especies, inventarios arbóreos y la medición de parámetros como la altura, el diámetro a la altura del pecho (DAP) y el estado de los individuos arbóreos. El segundo enfoque descriptivo se centró en determinar la densidad de la madera de cada especie, utilizando el instrumento forestal Barreno de Pressler donde se extrajeron 176 tarugos de madera de un total de 2,371 individuos distribuidos en 29 especies, los cuales fueron sometidos a

procesos de pesado y secado en intervalos de tiempo específicos. Los resultados revelaron que, sorprendentemente, las especies introducidas mostraron una mayor capacidad como sumideros de carbono y captadoras de dióxido de carbono (CO₂) en comparación con las especies nativas, con una diferencia significativa. Entre las especies, *Eryobotrya japonica* registró la densidad más alta. En cuanto a los parques transectos, el Parque Grau destacó como el mayor secuestrador de carbono, acumulando 19.51 toneladas de carbono y 71.53 toneladas de CO₂.

A su vez, el profesional Samuel Angulo Urango en el año 2019 desarrolló un estudio con la finalidad de evaluar el confort térmico y secuestro de carbono como servicios ecosistémicos brindados por los árboles de la Universidad de Sucre, sede Puerta Roja; el cual se tituló “Captura de carbono y confort térmico del arbolado en la Universidad de Sucre sede Puerta Roja, Sincelejo, Colombia”. Para ello, el autor primero, realizó un censo florístico donde midió las variables dendrométricas necesarias para aplicar las ecuaciones alométricas que le permitió la estimación del secuestro de carbono, luego, realizó una regresión lineal múltiple para calcular el grado de relación entre la biomasa con las demás métricas de los árboles. Por otro lado, valoró el confort térmico con el registro de la temperatura y humedad relativa. También, empleó los índices de Shannon-Wiener y Simpson para determinar la diversidad de especies. Como resultado, registró 601 árboles pertenecientes a 61 especies y 25 familias donde la especie *Tectona grandis* se reconoció como la más abundante, asimismo, de acuerdo con los números de diversidad de Hill, hubo 25 especies abundantes y 15 muy abundantes. La biomasa aérea total fue de 245 toneladas y el carbono secuestrado fue de 123 toneladas, en cuanto a la regresión lineal, encontró que el DAP obtuvo un mayor grado de relación con la biomasa, no obstante, el autor incluyó todas las variables dasométricas en el modelo resultante. Por último, las especies con un índice de confort “muy confortable” fueron la *Albizia saman*, *Erythrina fusca*, *Ceiba*

pentandra, Capparis indica y Mangifera indica; la especie que se presentó como “ligeramente comfortable” fue Pachira quinata.

En el año 2020, se publicó un estudio titulado "Almacenamiento de carbono a nivel de ecosistema y sus vínculos con la biodiversidad, los factores estructurales y ambientales en los bosques tropicales de los Ghats occidentales, India", realizado por Subashree Kothandaraman, Javid Ahmad Dar, Somaiah Sundarapandian, Selvadurai Dayanandán y Mohamed Latif Khan. El objetivo principal de este estudio fue estimar la cantidad de carbono almacenado en tres tipos de bosques presentes en el Santuario de Vida Silvestre Kanyakumari, ubicado en la región de Western Ghats, en el extremo sur de la India. La metodología utilizada en el estudio comprendió dos fases fundamentales. En la fase de campo, se recopilaron variables dasométricas relacionadas con la estructura arbórea de los bosques. En la fase experimental, se cuantificó el promedio de carbono almacenado en los bosques caducifolios, semiperennes y perennes mediante tres ecuaciones alométricas. Los resultados revelaron que la cantidad promedio de carbono almacenado fue de 336,8 mega gramos por hectárea. Además, se identificaron seis tipos de vegetación, y se encontró que las especies leñosas, el sotobosque y la hojarasca contribuyeron de manera significativa a la captura de carbono. Estos resultados subrayan la importancia de estos bosques como sumideros de carbono, tanto a nivel nacional como a nivel mundial. Además, se destaca que las tres coberturas boscosas forman parte del porcentaje de los bosques secos tropicales en el mundo.

El mismo año, se publicó el estudio titulado "Estructura de la vegetación, composición de especies y potencial de sumidero de carbono en espacios verdes urbanos de la ciudad de Nagpur, India", llevado a cabo por Shruti Lahoti, Ashish Lahoti, Rajendra Kumar Joshi y Osamu Saito.

Esta investigación se centró en la evaluación de las zonas verdes en toda la ciudad, divididas en un total de 246 parcelas, con el tamaño de cada parcela adaptado según el tipo de área verde correspondiente. Posteriormente, se procedió a obtener métricas relacionadas con la estructura arbórea, con el fin de cuantificar la biomasa forestal mediante el uso de ecuaciones alométricas específicas para cada categoría de área verde urbana. Durante el estudio, se identificaron diversos escenarios en la ciudad. En primer lugar, se encontró una presencia mínima de robles centenarios y el promedio de DAP oscilaba entre 10 y 40 centímetros. En segundo lugar, se observó una alta biodiversidad en las zonas verdes infantiles (con un promedio de 335 toneladas de carbono por hectárea) y en las avenidas (con un promedio de 324 toneladas de carbono por hectárea), mientras que la diversidad en los bosques fue notablemente menor debido a la uniformidad de especies presentes. En tercer lugar, a pesar de que la ciudad se considera una de las más verdes, se evidenció una disminución en la cobertura de áreas verdes debido a la constante expansión de la infraestructura gris, que ha suprimido áreas arboladas. Por este motivo, se enfatiza la importancia de fomentar la gestión urbana sostenible a través de programas forestales y la implementación de monitoreos de carbono.

A su vez, el equipo compuesto por Thony Huera Lucero, Adela Salas-Ruiz y Carlos Bravo Medina identificó una oportunidad en la zona de Puto, Ecuador, donde se presentaba un conflicto de intereses relacionado con el uso del suelo agrícola e infraestructura. Su objetivo fue cuantificar la biomasa aérea en la zona El Paseo, ubicada en las afueras de la ciudad. Para llevar a cabo esta tarea, delimitaron parcelas de 6.4 hectáreas y utilizaron tecnología satelital para secuestrar imágenes geoespaciales con una resolución de 10 metros. Luego, emplearon el software ArcGIS (Sistema de Información Geográfica de Análisis de Raster y Vector) para cartografiar y georreferenciar el paisaje, ajustando así los resultados con mayor precisión.

Además, complementaron estas características de mapeo con un vuelo no tripulado utilizando DJI Phantom 4 Pro. Este estudio se publicó bajo el título "Hacia una planificación urbana sostenible para Puyo (Ecuador): el paisaje forestal amazónico como potencial infraestructura verde". Durante el estudio, se identificaron 129 rodales que albergaban 51 especies distribuidas en 28 familias. La estimación de la biomasa aérea se realizó mediante ecuaciones alométricas, y las reservas de carbono se calcularon utilizando una ecuación que relaciona los tres tipos de biomasa (aérea, subterránea y hojarasca). Se observó que las familias biológicas más importantes desde una perspectiva ecológica fueron Melastomataceae y Urticaceae. Además, se encontró una alta biodiversidad en la zona El Paseo, con un índice de Shannon de 3.53 y una dominancia de 0.97 según el índice de Simpson.

Así mismo, en diez parques de la zona urbana del cantón Jipijapa, en la provincia de Manabí, Ecuador, se llevó a cabo una evaluación de las áreas verdes presentes en estos espacios de recreación. El estudio fue realizado en el año 2020 por el equipo conformado de César Cabrera, Carlos Ponce, Cristóbal Cantos, Jessica Morán y Rodrigo Cabrera. En el transcurso de la investigación, se realizó un inventario minucioso de cada una de estas áreas verdes. Los investigadores llevaron a cabo una caracterización taxonómica de los individuos encontrados y evaluaron la importancia ecológica de las especies presentes, así como el cumplimiento del Índice Verde Urbano por habitante, conforme a las directrices establecidas por la Organización Mundial de la Salud (OMS). Adicionalmente, cartografiaron las áreas verdes que previamente habían georreferenciado. Los resultados obtenidos revelaron una superficie total de áreas verdes de 16,473 metros cuadrados, lo que representó un 4.13% de la unidad de muestreo. Se registraron 134 individuos arbóreos distribuidos en 13 especies, de las cuales 8 eran especies introducidas y 5 especies nativas, pertenecientes a 10 familias en total de los diez parques

muestreados. Además, se determinó que el árbol nim (*Azadirachta indica* A. Juss.) era la especie con mayor importancia ecológica, con un porcentaje del 52.22%, mientras que el limón (*Citrus limon* L.) presentaba la menor importancia, con un 1.68%. Los autores del estudio, titulado "Áreas verdes y arbolado en la zona urbana del cantón Jipijapa", concluyeron que el cantón no cumplía con los metros cuadrados de áreas verdes por habitante, ya que la OMS establece un mínimo de 9 metros cuadrados, mientras que en Jipijapa solo se registraban 2.7 metros cuadrados por habitante.

Fernando Antonio Cristancho Vanegas realizó un estudio titulado "Propiedades y cualidades del árbol de Neem (*Azadirachta indica* a. juss) como especie promisoría en arreglos agroforestales" con el objetivo de explorar los beneficios y roles ecosistémicos del árbol Neem desde una perspectiva forestal. Este estudio se basó en una revisión literaria para examinar los diversos enfoques presentados por otros autores. El autor encontró que el *Azadirachta indica* es altamente valioso en la recuperación de suelos dañados o degradados, particularmente aquellos afectados por actividades humanas, como la extracción de recursos naturales. Además, se determinó que esta especie puede utilizarse para la conservación del medio ambiente, la protección de áreas de cultivo, la creación de barreras contra el viento, como cercas vivas, para mejorar el paisaje y favorecer la retención de agua en el suelo. Asimismo, el estudio destacó que el Neem se puede emplear como fertilizante o abono verde, ya que posee un alto contenido de potasio (K) y nitrógeno (N), lo que beneficia el crecimiento de las plantas. También se resaltó su utilidad como agente espermicida, bactericida, fungicida y viricida, lo que lo convierte en una herramienta valiosa para proteger los cultivos contra plagas y enfermedades, lo que se traduce en cosechas más limpias y saludables.

Así mismo, en el año 2021 el Instituto Nacional del Medio Ambiente del Himalaya, en colaboración con el Departamento de Silvicultura y Recursos Naturales de la Universidad de HNB y el Departamento de Botánica de la Universidad Almora, llevó a cabo un estudio titulado "Evaluación de la Biomasa Arbórea y las Reservas de Carbono en los Bosques Templados y Subtropicales del Himalaya Central, India", realizado por Vinod Joshi, Vikram Negi, Deepa Bish, Sundriyal y Dhani Arya. Este estudio se centró en comparar dos tipos de bosques en la misma región y evaluar su capacidad para almacenar carbono. Para llevar a cabo esta evaluación, se aplicaron ecuaciones alométricas específicas para diversas especies arbóreas en dos muestreos representativos por tipo de bosque. Los resultados revelaron que el bosque subtropical almacena una mayor cantidad de carbono en comparación con el bosque templado. Sin embargo, es importante destacar que la diferencia no resultó significativa. En otras palabras, ambas masas forestales desempeñan un papel importante en la mitigación del cambio climático. No obstante, los bosques subtropicales presentan ciertas dinámicas que favorecen una mayor absorción de carbono, como el tipo de vegetación, la composición de especies y el tamaño de los individuos arbóreos.

Por su parte, la ciudad de Nagpur, ubicada en el estado de Maharashtra, India, se llevó a cabo un estudio con el propósito de evaluar la capacidad de almacenamiento de carbono en el área urbana protegida de Seminary Hills. En la fase de campo, se realizaron mediciones de la altura de los árboles y del Diámetro a la Altura del Pecho (DAP) utilizando un clinómetro y una cinta métrica, respectivamente. La estimación de la biomasa sobre el suelo se basó en ecuaciones volumétricas. Además, se evaluó la biodiversidad de la zona muestreada mediante el cálculo de los índices de Shannon y Simpson, así como el valor de importancia ecológica de las especies presentes. Posteriormente, se llevó a cabo un análisis de correlación de Pearson para examinar la

relación entre el área basal y la biomasa aérea, utilizando el software estadístico SPSS. El estudio, titulado "Cuantificación de las Reservas de Carbono de los Árboles en el Bosque Urbano Históricamente Conservado de Seminary Hills en Nagpur, India," fue realizado por Shalini Dhyani, Ajay Singh, Nihal Gujre y Rajendra Kumar Joshi. Durante la investigación, se identificaron un total de 27 especies de árboles en los 150 cuadrantes establecidos, distribuidas en 12 familias. Los resultados revelaron una biomasa total de 67.41 ha destacado la especie *Tectina Grandis* fue la que presentó la mayor reserva de carbono, con un valor de 143.9 toneladas de carbono por hectárea.

Otro estudio llevado a cabo en entornos urbanos se desarrollado en el conocido Parque Jail Road, situado en la ciudad de Lahore, Pakistán. En este estudio, los investigadores Namood-e-Sahar, Farzana Kishwar, Arifa Tahir y Muhammad Aboid Ullah identificaron un total de 115 árboles, divididos en 56 especies nativas y 59 especies exóticas, pertenecientes a 16 familias diferentes. El estudio, titulado "Aprovechamiento de los árboles para el secuestro de carbono como un beneficio integral del urbanismo", involucró la medición de tres variables dendrométricas clave en estos rodales: altura, DAP y edad. La estimación de la biomasa se basó en relaciones estequiométricas, habiendo sido previamente validada mediante una prueba piloto en la Universidad Lahore College for Women University, que incluyó 10 árboles, con el objetivo de calcular la capacidad de secuestro de carbono del área urbana. Los resultados del estudio revelaron que el área del parque Jail Road es capaz de secuestrar un total de 588,452.9 kilogramos de carbono, lo que equivale a 588,5 toneladas, aproximadamente. Además, se confirmó, mediante el análisis de correlación de Pearson, una relación positiva y significativa entre el DAP y la biomasa. Asimismo, la prueba *t de Student* demostró que las especies nativas

tienen una capacidad de secuestro de carbono significativamente mayor que las especies exóticas.

Por otra parte, en el año 2022, Christian David Terán Muenala publicó el estudio titulado 'Estimación de carbono aéreo en bosques secos de Dos Parroquias ubicadas en la cuenca media del Río Mira' en Ecuador. El objetivo de este estudio fue cuantificar la biomasa aérea presente en los bosques secos de Dos Parroquias. Para lograrlo, el investigador llevó a cabo mediciones dasométricas, que incluyeron el DAP, la altura, la densidad básica y la recolección de muestras de biomasa. Estas mediciones se realizaron en dos áreas específicas: una de 10.3 hectáreas en la parroquia de Tumbabiro y otra de 10.8 hectáreas en La Concepción. Posteriormente, se procesaron los datos utilizando programas estadísticos y se llevaron a cabo análisis de laboratorio en las instalaciones de la universidad. Los resultados indicaron que La Concepción presentó una mayor cantidad de toneladas de carbono en comparación con Tumbabiro. Además, el autor concluyó que el mejor modelo de estimación de biomasa incluye la altura, el DAP y la densidad, basándose en el error porcentual calculado.

Así mismo, el bosque húmedo tropical ubicado en la provincia de Los Ríos, Ecuador, fue objeto de estudio en el año 2022 por Jacqueline Pesantes y Carmita Bonifaz. En su investigación, caracterizaron la vegetación primaria del bosque y analizaron su estructura. Para llevar a cabo esta tarea, recopilaron datos dasométricos que se limitaron al Diámetro a la Altura del Pecho (DAP) para árboles con un diámetro superior a 10 centímetros y la altura total del dosel, estos datos se obtuvieron de dos parcelas de muestreo de 50 por 50 metros cuadrados, ubicadas a una distancia de 100 metros. Luego, calcularon el área basal y el volumen de cada individuo mediante ecuaciones preestablecidas para el ecosistema en cuestión. Los resultados de este

estudio, titulado "Caracterización del bosque húmedo primario de la Estación Biológica Pedro Franco Dávila, Provincia de Los Ríos, Ecuador", revelaron un total de 155 individuos florísticos distribuidos en 19 especies pertenecientes a 12 familias. Entre las familias más abundantes se encontraban Moraceae, Fabaceae y Rubiaceae. Asimismo, identificaron que el diámetro de los árboles en el bosque se situaba en un rango de 10 a 19 centímetros, abarcando el 59,3% de los rodales, mientras que las alturas oscilaban entre 10 y 19 metros, comprendiendo el 57,41% de los árboles. Además, determinaron que el bosque presentaba una diversidad media, sin que ninguna especie fuera dominante. Como conclusión, los autores señalaron que, aunque la diversidad era considerablemente buena, la cantidad de árboles robustos o de mayor tamaño era limitada. Por lo tanto, sugirieron que se debía evaluar y considerar la captura de carbono al abordar los servicios ecosistémicos en el bosque.

A su vez, en la provincia de Manabí, se llevó a cabo un estudio centrado en la estructura florística de seis parcelas ubicadas en el bosque seco tropical. El objetivo principal de esta investigación, realizada por Wagner Ramírez y Narcisa Ayoví, se centró en aumentar el conocimiento sobre la dinámica forestal y la importancia ecológica de este ecosistema. El estudio fue titulado "Estructura y composición arbórea del bosque seco tropical en el valle Sancán, Manabí, Ecuador". En el transcurso del estudio, se realizaron mediciones de dos variables dasométricas: el DAP se midió para individuos con un diámetro mayor a 5 centímetros, y se registró la altura total de los mismos. Los resultados revelaron un total de 236 individuos distribuidos en 21 especies pertenecientes a 14 familias botánicas. Entre las familias más abundantes se destacaron la Fabaceae, Capparaceae, Euphorbiaceae y Malvaceae. Además, al evaluar la estructura forestal a través del cálculo del índice de diversidad de Shannon, se observó una alta riqueza en cada una de las parcelas. Entre las especies con mayor importancia ecológica

se encontraron la *Ceiba trichistandra*, *Bursera graveolens* y *Geoffroea spinosa*. Estos resultados proporcionaron para los autores una valiosa contribución al entendimiento y conservación del bosque seco tropical en el valle Sancán de Manabí, Ecuador.

En el mismo año 2022, un equipo de investigadores compuesto por Ingo Kowarik, Léonie Fischer y Dave Kendal publicó el artículo titulado "Conservación de la biodiversidad y desarrollo urbano sostenible". Su investigación se basó en una revisión de diversas fuentes científicas relacionadas con el tema. En su estudio, abordaron diferentes enfoques geográficos y temáticos. Exploraron las presiones urbanas y su impacto en la biodiversidad, así como las oportunidades para la conservación y protección de la biodiversidad en entornos urbanos, además, profundizaron en el papel de las ciudades como sistemas socio ecológicos. Los autores llegaron a la conclusión de que las ciudades modifican la dinámica natural de los ecosistemas a los que reemplazan con una estructura ecológica diferente. Sin embargo, destacaron que las áreas urbanas tienen un potencial significativo para la conservación y preservación de la biodiversidad, tanto en términos de flora como de fauna, siempre y cuando se implementen estrategias de gobernanza urbana que integren políticas de gestión integral de manera holística.

Cabe señalar, que en ese año, Ricardo Javier Castillo Rupert, Vicente Enrique Bello Pinargote, Yulio Santiago Loor Barrezueta y Carlos César Ayón Hidalgo, realizaron un estudio titulado "Captura de carbono del arbolado de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, Ecuador", el cual tuvo como objetivo calcular el contenido de carbono presente en los árboles de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, en la ciudad de Manta, Ecuador. Para ello, los autores realizaron un inventario arbóreo donde tuvieron registro de los árboles con DAP superior o igual a 5 cm, a los cuales les midieron la altura total y diámetro, también realizaron una

evaluación de la abundancia y riqueza. Luego, estimaron la biomasa forestal teniendo en cuenta las mediciones hechas en campo y la densidad de las maderas de las especies obtenida en la literatura, lo anterior les permitió calcular el contenido de carbono de los árboles. Como resultado, identificaron 1200 individuos pertenecientes a 68 especies donde 38 especies fueron introducidas y 20 nativas. Los árboles evaluados capturaron un total de 19.650,76 toneladas de CO₂, sin embargo, varios individuos evidenciaron tener un conflicto con la infraestructura física, por ese motivo los autores recomendaron diseñar un plan de manejo del arbolado donde se retiren los árboles en conflicto y se priorizar las especies nativas.

Ahora bien, en el estudio realizado en el año 2023 y titulado “Morphological responses of *Bombax ceiba* to habitat heterogeneity in Southwest China”, los autores Yafang Wang, Yueping Zhang, Kaizé Mao, Wei Li y Xiping Cheng midieron la altura, diámetro de la copa y otras cuatro variables de la estructura de los árboles, además de, ocho rasgos foliares de los mismos, y, algunos factores edafoclimáticos en dos ubicaciones geográficas de la provincia de Yunnan. Por último, emplearon herramientas analíticas para examinar cómo las características del árbol de ceiba y sus hojas se ven afectados por los diferentes factores del entorno y cómo se adaptan morfológicamente a esa variabilidad del entorno. Como resultado encontraron que existe una correlación alta positiva entre el DAP y altura total de 0,896 en Mengla y 0,904 en Yuan Jiang. También, encontraron una correlación negativa entre la estructura de los árboles y los rasgos de las hojas en los dos hábitats. En cuanto a los factores edafológicos tuvieron un impacto positivo en la estructura de los árboles, mientras que los factores climáticos tuvieron efectos diferentes en las diferentes áreas. Las hojas fueron sensibles a las diferencias del entorno y la adaptación del árbol ceiba a hábitats variadas dependió de su capacidad para utilizar los recursos.

En este punto transitamos desde la revisión de literatura centrada en la estimación de biomasa aérea mediante el empleo de técnicas alométricas hacia una nueva perspectiva que se enfoca en investigaciones que han optado por enfoques alternativos y diversas tecnologías. A continuación, se llevará a cabo un breve recorrido por estas metodologías, profundizando en cómo se combinan en ciertos casos para potenciar la precisión de las estimaciones de biomasa.

Lo que llevaron a cabo Mingxia Yang, Xiaolu Zho, Zelin Liu, Peng Li, Jiayi Tang, Binggeng Xie y Changhui Peng en su estudio titulado "Una revisión de los métodos generales para cuantificar y estimar la biomasa en árboles urbanos" fue una exhaustiva investigación en la que consultaron diversas bases de datos científicas y seleccionaron un conjunto de investigaciones relevantes para su objetivo principal: comprender el creciente avance de las técnicas alternativas en la estimación de la biomasa en árboles urbanos y cómo estas se complementan entre sí, basándose en investigaciones previas realizadas en bosques urbanos. Los hallazgos de este estudio subrayan la importancia de las mediciones de campo para mejorar la precisión de los datos utilizados en programas de teledetección y satélites. Además, se destaca la recomendación de emplear enfoques espaciotemporales y multiescala de manera simultánea para obtener información geoespacial de manera más eficiente. Entre las técnicas más relevantes para el monitoreo del carbono en bosques urbanos, se encuentra la teledetección, especialmente aquellas con una mayor resolución temporal. Los autores concluyen que es esencial complementar las estimaciones de biomasa mediante el uso de vuelos con vehículos no tripulados y datos de campo para calibrar los resultados y obtener una representación más precisa de la escala real en los bosques urbanos.

Ahora, para el 2018 esta técnica alométrica fue investigada desde el panorama de nuevos métodos para la creación de ecuaciones locales y más exactas a la zona de estudio utilizando el escaneo láser terrestre (TLS) por Atticus Stovall, Herman Shugart, Kristina Anderson en su estudio de “Evaluación del escaneo láser terrestre para desarrollar alometría de biomasa no destructiva” donde explican que las ecuaciones alométricas en su desarrollo matemático requiere de una muestra forestal amplia para la regresión log-lineal y eso implican aumento de costos económicos y arbórea en este proceso, de ahí el objetivo de crear ecuaciones para la biomasa mediante el TLS donde evaluaron el error de las ecuaciones, el umbral de tamaño de muestra y lo compararon con las ecuaciones nacionales del estado de Virginia (EE. UU). El estudio concluye que el TLS es una excelente herramienta para el desarrollo de ecuaciones locales sin incurrir al método destructivo e ideal para reconstrucción tridimensional de mapas de biomasa.

Así mismo, el Reino Unido ha adoptado el uso de ecuaciones alométricas desarrolladas a través de la tecnología de teledetección LiDAR para estimar la biomasa, como se ilustra en el estudio titulado "Estimación de la biomasa urbana sobre el suelo con LiDAR multiescala" realizado por Phil Wilkes, Mathías Disney, Matheus Boni Vicari, Kim Calders y Andrew Burt en el Distrito Londinense de Camden. Este enfoque implica la creación de ecuaciones específicas a nivel local mediante la detección láser que recopila datos dendrométricos de las estructuras arbóreas. Los datos obtenidos se procesaron para identificar los individuos arbóreos utilizando la detección de árboles individuales (ITD) y, posteriormente, se realizó la cuantificación de la biomasa utilizando las fórmulas matemáticas junto con la tecnología LiDAR. Los resultados revelaron que las variables de altura y área de copa representan el 95% de la precisión de estas ecuaciones, ya que son elementos clave de la estructura forestal en el análisis de regresión. Además, los autores destacaron la importancia de generar ecuaciones alométricas específicas

para cada ubicación, ya que las ecuaciones alométricas generales subestimaron la biomasa en comparación con los datos obtenidos mediante LiDAR. En resumen, el estudio respalda el uso de LiDAR como una herramienta esencial para el mapeo espacial de las coberturas forestales y la estimación precisa de la biomasa en áreas densas y de difícil acceso.

En el mismo año, se publicó un artículo centrado en los bosques tropicales, realizado por Jucker y otros investigadores, quienes desarrollaron un modelo local para estimar las reservas de carbono en los bosques de la isla de Borneo, específicamente en Sabah, una región de Asia tropical. Para llevar a cabo esta estimación, utilizaron la tecnología de detección remota ALS (escaneo láser aéreo). Establecieron un total de 173 parcelas de muestreo donde se midieron dos variables clave: la altura del dosel forestal y la cobertura del mismo. Cabe destacar que estas variables dasométricas se obtuvieron a partir de los datos proporcionados por la tecnología ALS, lo que significa que no fue necesario realizar mediciones en campo, en su lugar, utilizaron mapeos básicos que secuestraron la estructura arbórea. Los resultados de este estudio, titulado "Estimación de la densidad de carbono sobre el suelo y su incertidumbre en los bosques tropicales estructuralmente complejos de Borneo mediante escaneo láser aéreo", llevaron a la conclusión de que este modelo es especialmente adecuado para aplicarse en zonas de bosques tropicales de gran altura, incluyendo áreas con historiales de tala u otras perturbaciones forestales.

La Universidad de California propuso estimar la biomasa de árboles urbanos mediante imágenes satelitales, específicamente WorldView-2, con el apoyo de LiDAR. Este enfoque se presentó en el estudio realizado por Jindong-Wu en 2019, titulado "Desarrollo de ecuaciones generales para la estimación de la biomasa de árboles urbanos con imágenes satelitales de alta

resolución". El estudio se llevó a cabo en el campus universitario, donde se evaluó la altura, DAP y área de la copa de 191 árboles distribuidos en 111 especies, de los cuales 27 eran de hoja perenne y 164 de hoja caduca. De estas especies, se seleccionaron solo 7 para el diseño alométrico del que se concluyó que LiDAR es una herramienta eficaz en términos de recursos y tiempo de medición, pero también recomendó considerar los valores del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) para reducir el error en las fórmulas.

Así mismo, "Erik Velasco y Kian Wee Chen llevaron a cabo una mejora en las ecuaciones alométricas tropicales en Singapur mediante el uso de la técnica de LiDAR terrestre en 3D. Para ello, escanearon un total de 65 árboles individuales en una zona residencial del estado insular, durante el proceso, se registraron datos cruciales como la altura, el DAP y la densidad específica de la madera por especie, ya que estos parámetros son esenciales en el modelo que desarrollaron para estimar las reservas de carbono. En su estudio titulado "Estimación del almacenamiento de carbono en árboles urbanos tropicales mediante un modelo alométrico mejorado para la biomasa aérea basado en escaneo láser terrestre", los investigadores concluyeron que la tecnología LiDAR permite la reconstrucción precisa de árboles derribados y muertos, incluyendo su volumen y datos dendrométricos. Esta capacidad resulta ventajosa para obtener mediciones precisas de la biomasa en áreas forestales. Además, observaron que el DAP se erige como una variable clave en la formulación de ecuaciones y en la estimación de la biomasa, ya que desempeña un papel esencial en la reducción de la incertidumbre en los resultados. Al desarrollar un modelo local, lograron disminuir el sesgo en las estimaciones tanto a nivel individual como de parcela, al comparar las estimaciones de biomasa aérea con los datos obtenidos mediante LiDAR. En última instancia, los investigadores destacaron que estos procedimientos permiten

valorar el servicio ecosistémico proporcionado por las zonas verdes, subrayando su importancia como mitigadores del cambio climático.

Cristina Vittuccia, Gaia Vaglio, Gianluca Tramontana, Paolo Ferrazzoli, Leila Guerrero y Darío Papale llevaron a cabo un estudio de cinco años titulado "Profundidad óptica de la vegetación en la banda L y biomasa aérea en el rango tropical: evaluación de sus relaciones a escala continental y regional", el cual fue publicado en el año 2019. En este estudio, se enfocaron en las zonas tropicales de África y sur América, utilizando el índice de profundidad óptica de la vegetación (VOD) como variable principal en las regresiones matemáticas para estimar la biomasa. Para ello, recopilaron datos de biomasa aérea de estudios anteriores en zonas tropicales, que utilizaron como punto de referencia para comparar los resultados obtenidos mediante el método empleado. Además, integraron el VOD con variables climáticas y el déficit hídrico local. Descubrieron que las mejores estimaciones de biomasa se obtuvieron al considerar tanto el VOD como la evapotranspiración, aunque también obtuvieron buenos resultados al usar solo el VOD junto con algunas variables climáticas. Estos resultados demuestran la utilidad de la banda L para estimar la distribución de biomasa en los bosques tropicales a nivel continental, lo que representa un avance significativo en comparación con investigaciones previas que solo habían establecido una relación entre la señal de VOD y la biomasa forestal sobre el suelo (AGB).

Al año siguiente, un equipo de investigadores de Hong Kong, China, liderado por Sawaid Abbas, Man Sing Wong, Jin Wu, Naeem Shahzad y Syed Muhammad Irteza, se dedicó a explorar en profundidad las aplicaciones de la teledetección por satélite en la evaluación de la biomasa aérea en bosques tropicales. Su investigación, titulada " Enfoques de la teledetección

por satélite para la evaluación de la biomasa aérea en los bosques tropicales: escala pan tropical a nacional”, se centró en la aplicación de tecnologías de teledetección, en particular el satélite SAR (Radar de Apertura Sintética). En su estudio, llevaron a cabo una revisión exhaustiva de los sensores remotos utilizados en zonas tropicales durante la última década, discutiendo detenidamente sus hallazgos y los avances resultantes. Los autores destacan que las técnicas alternativas, especialmente SAR, LiDAR y la detección remota, poseen un gran potencial para estimar la biomasa forestal con un margen de incertidumbre notablemente bajo. Asimismo, sugieren la necesidad de desarrollar indicadores que permitan evaluar si un bosque ha experimentado intervenciones humanas, si está en proceso de recuperación o si se mantiene en su estado natural, ya que estos factores influyen en la dinámica forestal. Además, señalan la importancia de investigar la relación entre la diversidad biológica de especies florísticas en una zona forestal y su capacidad para secuestrar carbono.

En el estudio titulado “Aprendizaje automático y enfoques geo estadísticos para estimar la biomasa aérea en los bosques subtropicales chinos” del mismo año 2020, Hui Yi Su, Wenjuan Shen, Jingrui Wang, Arshad Ali y Mingshi Li, se empleó un enfoque que combina bosques aleatorios y la técnica de interpolación espacial (co-kriging) con el objetivo de mejorar la precisión en la cartografía de la biomasa aérea en la región septentrional de Guangdong, China. Esta metodología integra las ventajas de la inteligencia artificial y los métodos geo estadísticos. Se utilizó una variedad de fuentes de datos, incluyendo observaciones de satélite Landsat, información del radar de apertura sintética de banda L (PALSAR) del satélite de observación terrestre (ALOS), y datos del Inventario Forestal Nacional (NFI) como referencia adicional. Estos datos se emplearon para generar mapas que representan la biomasa aérea forestal en tres momentos temporales diferentes (1992, 2002 y 2010). Estos mapas permitieron analizar cómo la

biomasa evolucionó en términos de su distribución espacial a lo largo del tiempo en las zonas tropicales de China. En resumen, se concluyó que la cartografía se presenta como una herramienta eficiente en términos de tiempo y recursos, lo que la hace ideal para aplicaciones en la gestión forestal, específicamente en la cuantificación del secuestro de carbono. Este enfoque cobra una gran relevancia en el contexto del cambio climático.

En el 2020, se publicaron los resultados de un análisis realizado en Auckland, Nueva Zelanda, que abarcó el período comprendido entre 1989 y 2014. Este análisis se centró en las coberturas vegetales urbanas y las estimaciones de la reserva de carbono aéreo (AGC) para esos años. Para llevar a cabo esta investigación, se establecieron 60 parcelas de muestreo en el campo, de las cuales 20 correspondían a bosques, 19 a matorrales y 21 a pastizales, cada una de ellas con diferentes dimensiones. Asimismo, se clasificó la vegetación en tres categorías: árboles, arbustos y helechos, incluyendo las palmas en esta última categoría debido a su estructura y densidad similares. En cada parcela, se realizaron mediciones de la altura del dosel y el Diámetro a la Altura del Pecho (DAP). Posteriormente, se cuantificó la biomasa aérea utilizando ecuaciones alométricas obtenidas de la literatura especializada en bosques nativos de Nueva Zelanda. Finalmente, se estimó la AGC, primero utilizando LiDAR y luego Landsat 8. Una vez procesadas las imágenes y los mapas de cobertura, se compararon los resultados con los datos de 1989. El estudio, titulado "Evaluación de Cambios en la Cubierta Vegetal Urbana y las Reservas de Carbono en el Suelo Utilizando Datos de Imágenes LiDAR y Landsat en Auckland, Nueva Zelanda," fue llevado a cabo por Vincent Wang, Jay Gao y Luitgard Schwendenmann. Los hallazgos revelaron una disminución del 3.7% en la cobertura vegetal a lo largo del período estudiado. Sin embargo, se observó un aumento del 45.8% en el sumidero de carbono desde 1989 hasta 2014. Esta tendencia se explicó por la introducción de nuevas plantaciones en el área, a

pesar de una disminución en la extensión total de la tierra. Además, el estudio destacó la eficacia de LiDAR en la creación de mapas debido a su capacidad para secuestrar datos relacionados con la estructura forestal, en contraste con Landsat, que tendió a sobrestimar los valores de AGC debido a la alta saturación de sus datos.

En el área urbana de Sassuolo en Italia el equipo por Mueed Choudhury, Ernesto Marcheggiani, Sofía Costanzini, Francesca Despini, Paolo Rossi, Andrea Galli y Sergio Teggi realizaron la cartografía digital del almacenamiento de carbono presente por el arbolado dominante de esa zona por medio de imágenes multiespectrales generadas por la técnica satelital WorldView 3 con el objetivo de comprobar la eficacia del método en el mapeo de carbono de áreas urbanas con alta influencia en la mitigación del cambio climático. Para ello, clasificó la zona urbana usando análisis de imágenes basado en objetos (OBIA) como dato de calibración, además se calcularon dos datos dendrométricos; altura de la copa y DAP usando fotogrametría y manejando los márgenes de error con láser terrestre. Para generar el mapeo de carbono optaron por calcular la biomasa aérea con ecuaciones alométricas ajustadas a su zona climática, luego consideraron cuatro índices para ajustar el procesamiento de imágenes y por ultimo implementaron el software QGIS para la graficación geométrica de la zona. Los autores concluyeron en su estudio titulado “Identificación de especies de árboles urbanos y mapeo de reservas de carbono para la planificación y gestión ecológica urbana” cómo la fotogrametría es una técnica eficiente y versátil en el cálculo de variables dendrométricas arbóreas ahorrando tiempo y recursos, además la graficación tuvo una precisión del 78% lo que asegura que es una metodología practica en la gestión urbanística de la ciudad y útil en procesos de planificación ambiental.

En una línea similar de investigación, Abdul Mueed Choudhury, Ernesto Marcheggiani, Andrea Galli, Giuseppe Módica y Ben Somers llevaron a cabo un estudio comparativo de los resultados obtenidos mediante el uso de LiDAR y WorldView-3 (WV-3) en un entorno urbano en Bruselas, Bélgica. Para esto, seleccionaron un área de muestreo y realizaron mediciones dendrométricas en el campo para recopilar los datos necesarios que se ajustarían a la ecuación alométrica de árboles urbanos. Además, emplearon la teledetección para calcular el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), el cual se utilizó como corrección en las estimaciones de carbono. Los resultados de este estudio, publicados en 2021 bajo el título “Mapeo del stock de carbono atmosférico urbano mediante datos LiDAR y WorldView-3”, sugieren que esta investigación podría ayudar a los planificadores urbanos en la evaluación y selección de fuentes de información de percepción remota, considerando aspectos como la accesibilidad y su utilidad en el respaldo a la implementación de sistemas de gestión urbana sostenible y respetuosos con el medio ambiente. Además, los autores destacan la importancia de evaluar la relación costo-eficacia al elegir entre métodos, ya que mientras el LiDAR ofrece ventajas en términos de precisión de mapeo, las imágenes de WV-3 pueden ser una herramienta útil en términos de costos y accesibilidad para mediciones espaciales.

En el estudio titulado "La Utilidad de los Datos Espectrales de Sentinel-2 para Cuantificar las Reservas de Carbono sobre el Suelo en un Paisaje Urbano Reforestado," realizado por Mthembeni Mngadi, John Odindi y Onesimo Mutanga, se evaluaron los instrumentos de alta resolución proporcionados por el satélite europeo Sentinel-2 en el contexto de Sudáfrica, específicamente en la provincia de KwaZulu-Natal. El objetivo principal de esta investigación fue analizar la eficacia de estos instrumentos para estimar el almacenamiento de carbono en áreas urbanas sujetas a reforestación. El estudio comenzó con la recopilación de datos métricos en el

terreno, donde se utilizó un clinómetro para medir la altura de los árboles y un calibrador vernier, también conocido como "pie de rey," para medir el diámetro a la altura del pecho de los árboles, y de esta forma calcular la biomasa aérea mediante ecuaciones alométricas. Posteriormente, se procesaron imágenes geospaciales en el software QGIS, y se llevó a cabo un análisis de efectividad utilizando conceptos estadísticos como el error y el coeficiente de determinación (R cuadrado). Los resultados concluyeron que los mejores modelos para estimar las reservas de carbono incorporaron índices espectrales como el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), el Índice de Vegetación Mejorada (EVI), el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada de Borde Rojo (Red Edge NDVI), y el Índice de Proporción Simple Modificado (MSPI), que mostraron una alta correlación en el rango de 0.95 a 0.98 en el coeficiente de determinación (R cuadrado). Estos resultados demostraron la eficacia de Sentinel-2 y los índices espectrales en la estimación precisa de las reservas de carbono sobre el suelo en un entorno de paisaje urbano reforestado.

2.2 Marco Teórico

Para abordar la valoración de los servicios ecosistémicos proporcionados por los árboles en entornos urbanos, es esencial establecer una sólida base teórica y científica, de esta forma se comprenden los aspectos fundamentales relacionados con la presente investigación, como ecosistemas urbanos, servicios ecosistémicos, biometría forestal, biomasa y las técnicas para la estimación de la biomasa aérea.

2.2.1 Ecosistemas urbanos

Según el Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (s.f.) un ecosistema es la unidad básica funcional que comprende el medio biótico, abiótico y sus interacciones; sin embargo, las ciudades no suelen considerarse como ecosistemas (Angeoletto et al., 2015). No obstante, Samson (2017) y Quispe (2022) indican que las ciudades deben considerarse como ecosistemas urbanos, debido a que difieren en gran medida a los ecosistemas naturales. Además, las áreas aledañas a las ciudades que proveen energía y materiales, y sirven de depósitos de residuos, son extensiones de las ciudades mismas, por ese motivo, se incluyen en el ambiente urbano (Angeoletto et al., 2015). Dada la complejidad de la dinámica de los ambientes urbanos, es necesario integrar la ecología y la planificación urbana para abordar los desafíos de esta desde una perspectiva interdisciplinaria y de esta forma contribuir a la sostenibilidad de las ciudades (Grimm et al., 2008; Angeoletto et. al., 2015).

Por consiguiente, en el marco de esta complejidad de los ambientes urbanos y la diversidad de opiniones sobre su naturaleza ecológica, es fundamental abordar el desafío de las emisiones de gases de efecto invernadero, que provienen en su mayoría de entornos urbanos, representando hasta el 80% de dichas emisiones (Crippa et al., 2021; Smaliychuk & Latocha, 2023). Además, las islas de calor urbanas tienen un impacto adverso en la calidad ambiental y el confort térmico exterior, lo que plantea inquietudes sobre la salud y el bienestar urbanos (Fong et al., 2023). En consonancia con estas preocupaciones, se recomienda la asignación de al menos 9 metros cuadrados (m²) de áreas verdes por habitante por parte de la Organización Mundial de la Salud (Gómez & Velázquez, 2018) y se establece un estándar similar en la "Estrategia climática de largo plazo de Colombia para cumplir con el acuerdo de París (E2050)" para ciertos municipios

(Gobierno de Colombia, 2021). Esto resalta la necesidad de integrar infraestructuras verdes a nivel municipal, coordinando estas iniciativas con políticas territoriales a gran escala que sirvan para abordar la degradación de los ecosistemas y el incremento en la demanda de servicios ecosistémicos (Chapin, Kofinas & Berkes, 2009; Acuña et al., 2021), la planificación urbana sostenible, el fomento de áreas verdes y la mitigación de emisiones como componentes fundamentales en la mejora de la calidad de vida urbana y la reducción del impacto ambiental.

También se ha observado que el crecimiento de la urbanización puede disminuir la disponibilidad de estos servicios ecosistémicos; por lo tanto, es esencial cuantificar y evaluar estos valores para comprender mejor el impacto de la expansión urbana en nuestros entornos (Bastian et al., 2012; Valderrama et al., 2023). En particular, la vegetación urbana constituye un componente esencial de la infraestructura urbana, ya que brinda una amplia gama de servicios ecosistémicos, que incluyen servicios de regulación, abastecimiento, soporte y cultural (Calaza, 2019; Duval et al., 2022).

Servicios ecosistémicos en las ciudades. Las personas obtienen beneficios directos o indirectos de la naturaleza que ayudan a satisfacer sus necesidades, a esto se le conoce como “servicios ecosistémicos” (Millennium Ecosystem Assessment [MEA], 2005; Quispe, 2022), en la Tabla 1 se exploran algunos de estos servicios ecosistémicos en el contexto urbano. Sin embargo, la eficiencia de los servicios ecosistémicos depende de los caracteres funcionales de las plantas, así como la planificación de las mismas en entornos urbanos; hablando de árboles, sus servicios ecosistémicos se ven limitados por la utilización de especies arbóreas inapropiadas en ubicaciones inadecuadas; en ese sentido, la infraestructura verde ofrece la planificación de áreas verdes urbanas que proveen servicios sociales y ecológicos (Vásquez, 2016; Quispe, 2022).

Cultural	Funciones estéticas	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Recreativas	✓	✓		✓	✓	✓	✓
	Recursos culturales y artísticos	✓	✓	✓	✓	✓		
	Funciones espirituales	✓		✓		✓		✓
	Ciencia y educación	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Nota. Tomado de Szumacher & Malinowska, 2013; Quispe, 2022.

En resumen, los servicios ecosistémicos urbanos se derivan de los procesos y funciones de la biodiversidad, además representan beneficios tanto directos como indirectos para las personas generando bienestar (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible e Instituto von Humboldt, 2017). Además, se puede monitorear los servicios ecosistémicos mediante la aplicación de la biometría forestal, dado que esta desempeña un papel crucial en la gestión y monitoreo de los recursos arbóreos urbanos, permitiendo una evaluación precisa de su crecimiento, salud y contribución a la calidad de vida urbana.

Biometría forestal. Biometría forestal. La biometría forestal, una disciplina que se enfoca en el estudio de las características físicas (Diámetro a la Altura del Pecho – DAP, altura total y comercial, densidad, diámetro de la copa, entre otras) y biológicas (crecimiento, competencia, mortalidad, y demás factores relacionados) de los bosques, desempeña un papel crucial en la comprensión de la estructura y dinámica de estos ecosistemas (Attis, 2015). En este contexto, las herramientas biométricas se han convertido en instrumentos esenciales para modelar y predecir el crecimiento arbóreo, contribuyendo así a la gestión sostenible de los recursos forestales (Nava et al., 2020; García et al., 2020). Por otro lado, uno de los aspectos más destacados en la biometría forestal es la relación entre el DAP y otras variables físicas de los árboles (Dieguéz et al., 2005). Además, se ha enfocado en el análisis del crecimiento, así como la identificación de

factores que influyen en el crecimiento de los árboles de esta forma se adquiere un acercamiento de su bienestar (Boa, 2008; Palacio, 2018).

Algunos autores afirman que existe una correlación significativa entre el DAP y la altura total de los árboles, como Jäger (2020), quien indica que hay una relación lineal no sólo entre el DAP y la altura total, sino también, entre el DAP y la edad. Sin embargo, otros autores como Castañeda et al. (2021) señalan que se presenta una correlación muy baja el DAP y la altura total. Además de la relación entre el DAP y la altura, otros estudios han explorado correlaciones entre variables dasométricas y diversas características de los árboles. Caselli (2020), mencionó que estas variables no siguen una distribución normal y las correlacionó con el área foliar. Parra & Hernández (2023), indicaron la presencia de correlaciones significativas entre la altura dominante y factores edafoclimáticos. De manera similar, Jiang et al. (2022), apunta a que se muestran correlaciones significativas entre la tasa de crecimiento y factores ambientales.

Por otro lado, es importante destacar que los árboles urbanos presentan diferencias significativas con respecto a los que crecen en entornos naturales. (Magarik et al., 2020; McHale et al., 2017) señaló estas diferencias, que incluyen podas regulares, menor densidad, estrés ambiental y disponibilidad variable de nutrientes y agua. Jaramillo (2020) también subrayó la influencia del entorno urbano en el crecimiento y la competencia de los árboles. En ese sentido, el análisis detallado de la estructura y el crecimiento de los árboles no solo es fundamental para la gestión sostenible de los recursos forestales, sino que también desempeña un papel esencial en la evaluación de su contribución al secuestro de carbono y, en última instancia, en la estimación precisa de la biomasa aérea, dado que la biomasa depende de las variables volumétricas de los árboles.

2.2.2 Estimación de la biomasa-carbono

La biomasa se define como la materia orgánica contenida sobre el suelo (biomasa aérea) y por debajo del suelo (biomasa subterránea) (Marroquín, 2019; Bravo, 2022). El cálculo de la biomasa es fundamental para entender el ciclo de nutrientes, secuestro de dióxido de carbono (CO₂) y productividad; lo anterior es esencial en países en desarrollo por las grandes emisiones que generan en actividades de deforestación y degradación forestal (REDD+), además de conservar las reservas de carbono forestal (Mahmood et al., 2020). Sin embargo, la estimación de biomasa subterránea implica costos elevados, en consecuencia, el análisis de la biomasa aérea ha sido más valorizado (Visús, 2022).

Por otra parte, existen dos métodos para cuantificar la biomasa, destructivos (directos) y no destructivos (indirectos) (Marroquín, 2019; Mahmood et al., 2020 Bravo, 2022). El método destructivo representa un costo monetario y ambiental debido a que consiste en la tala de árboles para pesar de forma directa sus componentes (Marroquín, 2019; Bravo, 2022; Sánchez, 2023; Briones, 2023), sin embargo, según Poley & McDermid (2020), es el método de mayor precisión, razón por la cual se emplea en la elaboración de ecuaciones alométricas para la estimación de biomasa de forma indirecta o no destructiva (Briones, 2023).

Uno de los retos actuales radica en el desarrollo de técnicas confiables y precisas que permitan hacer seguimiento sistemático a los contenidos de carbono en los diferentes tipos de bosques (Cihlar et al., 2002). Existen ecuaciones alométricas que se adaptan a distintos ecosistemas e incluso a múltiples especies, lo cual precisa la validez de la información hallada por medio de la aplicación de dichas ecuaciones (Zhao et al., 2019; Velasco & Chen, 2019;

Tetemke et al., 2019; Issa et al., 2020; Miah et al., 2020; Khan et al., 2021; Abich et al., 2021). También, se considera el DAP como variable principal en los modelos alométricos de sitio, emplean como variable principal el DAP, debido a la facilidad de medición que este representa (Abich et al., 2021; Zhao et al., 2019), otras variables que pueden ser empleadas para ajustar los resultados a la especie son la altura y la densidad de la madera (Herrera, 2022; Burt et al., 2020; Puc et al., 2020; Marroquín, 2019).

Cabe señalar que, el 50% de la biomasa aérea está compuesto por carbono, el cual fue fijado por medio del proceso de fotosíntesis donde se absorbe dióxido de carbono (CO_2) y se libera oxígeno (O_2) (Herrera, 2022; Sánchez, 2023), por ese motivo, se puede calcular el secuestro de CO_2 y liberación de O_2 empleando balances estequiométricos. Esta interacción es de suma relevancia en el contexto actual de cambio climático, ya que los bosques no solo almacenan carbono, sino que también contribuyen activamente al secuestro de CO_2 atmosférico y a la producción de oxígeno, procesos esenciales para la regulación del clima y la calidad del aire (Cifuentes et. al., 2021). Por lo tanto, estimar con precisión la biomasa no solo es un ejercicio científico, sino una herramienta crucial para comprender y abordar los desafíos ambientales globales.

2.3 Marco Legal

En el contexto de la investigación, que aborda la evaluación de los servicios ecosistémicos proporcionados por los árboles urbanos, centrándose en el servicio fundamental de regulación ambiental, específicamente, el secuestro de dióxido de carbono (CO_2) y la liberación de oxígeno (O_2). Para comprender adecuadamente la base legal que sustenta y guía la gestión de estos

servicios en el ámbito urbano, se presenta en la Tabla 2 un resumen conciso del marco legal pertinente.

Tabla 2. Disposiciones Legales concernientes al proyecto de investigación

TIPO DE REGULACIÓN	DICTA	DESCRIPCIÓN
Decreto 2811/1974	Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente	Artículo 9. Establece principios que rigen el uso de los elementos ambientales y los recursos naturales renovables establecen que la planificación del manejo de estos recursos debe llevarse a cabo de manera integral. Este enfoque integral tiene como objetivo principal contribuir al desarrollo equilibrado tanto en entornos urbanos como rurales, con el fin de promover el bienestar de la comunidad. Como parte de esta planificación, se debe garantizar la creación y preservación de áreas verdes en los centros urbanos y sus zonas circundantes.
		Artículo 187. Dicta la planeación del desarrollo urbano en cuanto a diversos sectores, que abarcan áreas residenciales, cívicas, comerciales, industriales y de recreación. También se consideran zonas destinadas a la vegetación, que actúan como espacios de oxigenación y amortiguación, además de contemplar la necesaria incorporación de elementos de arborización ornamental.
		Artículo 188. El plan urbanístico aborda diversas consideraciones, entre las cuales se incluyen aspectos clave como la definición de áreas de descanso y recreación, así como la implementación de servicios que contribuyan a mantener un entorno saludable y agradable para la comunidad.
Ley 9 DE 1989	Por la cual se dictan normas sobre planes de desarrollo municipal, compraventa y expropiación de bienes y se dictan otras disposiciones	Artículo 302. Destaca que la comunidad tiene el derecho fundamental de disfrutar de paisajes tanto urbanos como rurales que promuevan su bienestar físico y espiritual. En este sentido, se deben identificar y determinar aquellos paisajes que merecen protección y conservación.
		Artículo 5. Define al espacio público como un conjunto que abarca tanto inmuebles de propiedad pública como elementos arquitectónicos y naturales de inmuebles privados. Esto comprende áreas destinadas a la circulación, ya sea para peatones o vehículos, así como espacios para actividades de recreación pública, ya sean activas o pasivas. También incluye áreas dedicadas a la seguridad y la tranquilidad de los ciudadanos, franjas de retiro de edificaciones en relación con las vías, elementos como fuentes de agua, parques, plazas, zonas verdes y otros elementos similares, entre otros.
Ley 388 de 1997	Por la cual se modifica la Ley 9 de 1989, y la Ley 2 de 1991 y se dictan otras disposiciones.	Artículo 4: Establece una de las funciones públicas del urbanismo, que es garantizar a los habitantes el acceso a los espacios públicos y su dedicación al uso común.
		Artículo 11. Enuncia los objetivos de la política de

TIPO DE REGULACIÓN	DICTA	DESCRIPCIÓN
		<p>estructura ecológica en el suelo urbano.</p> <p>Artículo 55. Se detallan los programas y proyectos que deben ser implementados en su totalidad, con énfasis en el programa de silvicultura urbana. Este programa busca fortalecer las áreas verdes públicas ya existentes y reconocidas como componentes del sistema de espacio público, además de crear corredores de vegetación para conectar con la estructura ecológica del municipio. El propósito de estos corredores es mantener servicios ambientales como la regulación climática, la generación de sombra y la mitigación de la contaminación, particularmente en las vías principales del centro urbano.</p>
<p>Política de Gestión Ambiental Urbana 2008</p>	<p>Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial</p>	<p>Establece las directrices, recursos e instrumentos esenciales para promover la gestión sostenible de las áreas urbanas en Colombia, con el objetivo de resaltar su biodiversidad regional. Este enfoque involucra la colaboración de actores a nivel nacional, regional y local, coordinando esfuerzos, competencias y roles para impulsar una gestión interinstitucional basada en normativas y en la activa participación ciudadana.</p>
		<p>Página 44. Establece pautas cruciales para el desarrollo del ordenamiento ambiental del territorio, con un enfoque centrado en la resiliencia de los sistemas socio-ecológicos. Reconoce que las actividades locales pueden tener impactos tanto a nivel regional como global, y que esta relación bidireccional se debe a la interconexión dinámica entre diversas escalas temporales y espaciales dentro del entorno ambiental. Esta comprensión arroja luz sobre la génesis del cambio climático, la pérdida de biodiversidad y la contaminación.</p>
<p>Política nacional para la gestión integral de la biodiversidad y sus servicios ecosistémicos (PNGIBSE) 2012</p>	<p>Política de Estado cuyo objetivo es promover la Gestión Integral de la Biodiversidad y sus Servicios Ecosistémicos (GIBSE)</p>	<p>Página 79. Identifica a los procesos urbanísticos de cualquier índole como factores desencadenantes de cambios significativos en la biodiversidad de un área específica. Esto se debe a que las zonas urbanas, debido a razones socioeconómicas, a menudo albergan la mayor concentración de población. Sin embargo, la dinámica territorial genera impactos tanto directos como indirectos a nivel local que afectan diversos componentes del ecosistema, elementos fundamentales para la calidad de vida de sus habitantes.</p>
		<p>Página 84. Presenta cuatro ejes temáticos y líneas estratégicas relacionados con la biodiversidad. El primer eje, denominado "Biodiversidad, Conservación y Cuidado de la Naturaleza," destaca la importancia de acciones de conservación tanto in situ como ex situ. El segundo eje, "Biodiversidad, Gobernanza y Creación de Valor Público," busca fortalecer la relación entre el Estado y los ciudadanos urbanos y rurales, promoviendo una mejor gobernanza. El tercer eje, "Biodiversidad, Desarrollo Económico, Competitividad y Calidad de Vida," aborda la necesidad de integrar la biodiversidad en la planificación y toma de decisiones, con impactos en el desarrollo económico y la calidad de vida. El cuarto eje,</p>

TIPO DE REGULACIÓN	DICTA	DESCRIPCIÓN
		"Biodiversidad, Gestión del Conocimiento, Tecnología e Información," se enfoca en promover la generación y divulgación de información y conocimiento para respaldar decisiones informadas en materia de biodiversidad, incorporando desarrollos tecnológicos. Estos ejes y líneas estratégicas buscan una gestión integral y efectiva de la biodiversidad.
Ley 119 de 2012	Por medio de la cual se otorgan beneficios tributarios para las construcciones ambientalmente sostenibles y se dictan otras disposiciones.	Artículo 150. Se aborda la sostenibilidad ambiental en contextos urbanos, considerando la alta concentración de población en las ciudades colombianas. Se proponen seis acciones para mejorar la calidad ambiental en estos entornos. Entre estas acciones, se destaca la promoción de la inclusión de aspectos ambientales en la Política Nacional de Espacio Público, con el objetivo de aumentar las áreas verdes en áreas urbanas y desarrollar corredores lineales y de conectividad. Esto se plantea como una medida para adaptarse al cambio climático y proteger el entorno ambiental en entornos urbanos. Además, se propone el desarrollo de modelos de gestión urbana con una perspectiva ecosistémica y una colaboración activa entre las áreas urbanas y regionales.
	Objetivo 11: Lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles	11.3 Hasta el año 2030, se pretende promover un aumento de la urbanización de forma inclusiva y sostenible, al mismo tiempo que se refuerza la habilidad para planificar y gestionar de manera participativa y abarcadora los asentamientos humanos en todas las naciones. 11.7 Para el año 2030, el objetivo es asegurar que mujeres, niños, personas mayores y aquellos con discapacidades tengan acceso universal a áreas verdes y espacios públicos que sean seguros, inclusivos y de fácil acceso.
Objetivos de Desarrollo Sostenible	Objetivo 13: Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos	13.1 Fortalecer la capacidad de resistencia y adaptación ante los peligros derivados del clima y los eventos naturales extremos en todas las naciones. 13.3 Mejorar la excelencia de la educación, la sensibilización y la capacitación, tanto a nivel personal como en instituciones, en relación con la reducción del cambio climático, la adaptación a sus consecuencias, la minimización de sus efectos y el establecimiento de sistemas de alerta temprana.
	Objetivo 15: Gestionar sosteniblemente los bosques, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras, detener la pérdida de biodiversidad	15.9 Para el año 2020, se persigue integrar los valores proporcionados por los ecosistemas y la diversidad biológica en la planificación a nivel nacional y local, así como en los procedimientos de desarrollo y en las estrategias destinadas a combatir la pobreza.
Decreto 1076 de 2015	Por la cual se presenta el decreto único reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible a partir de la fecha de su expedición.	Sección 6. En el apartado (i), se establece que la autoridad ambiental tiene la responsabilidad de determinar el porcentaje destinado al paisajismo urbano, el cual variará de acuerdo a la densidad de población del municipio. Esto abarca áreas de zonificación ornamentales, áreas protegidas y zonas arboladas. Además, este aspecto debe

TIPO DE REGULACIÓN	DICTA	DESCRIPCIÓN
		ser tenido en cuenta en la planificación de proyectos de infraestructura gris.
Resolución 1447 del 2018	Por la cual se reglamenta el sistema de monitoreo, reporte y verificación de las acciones de mitigación a nivel nacional de que trata el artículo 175 de la Ley 1753 de 2015, y se dictan otras disposiciones	Artículo 3. Se consideran acciones mitigadoras del cambio climático a los sistemas productivos que involucran la silvopastoril, la agroforestería y las plantaciones comerciales, entre otros sistemas basados en árboles. Estos deben ser implementados en áreas que no sean bosques naturales.
CONPES 3918 del 2018	Estrategia para la implementación de los objetivos de Desarrollo sostenible (ODS) en Colombia	Proporciona un plan detallado que contempla las metas y estrategias esenciales para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030 en Colombia. Este enfoque incluye una hoja de ruta específica para cada meta, que abarca indicadores, las entidades responsables de su ejecución y los recursos necesarios para llevar a cabo dichas metas.
CONPES 4021 del 2020	Política nacional para el control de la deforestación y la Gestión sostenible de los bosques	Página 3. Señala al territorio de Colombia como reconocido por su abundancia en diversos tipos de bosques, lo que lo convierte en una región extremadamente rica en biodiversidad. Estos bosques desempeñan un papel vital al proporcionar servicios ecosistémicos esenciales para el bienestar humano. No obstante, el uso excesivo e irracional de estos recursos forestales ha resultado en la pérdida de alrededor de 2,8 millones de hectáreas de bosque, según estimaciones que abarcan desde el año 2000 hasta 2019. Esto resalta la necesidad inaplazable de comprometerse con la conservación y la restauración de las áreas boscosas en todo el territorio colombiano. Este esfuerzo debe llevarse a cabo en estrecha colaboración con diversas entidades, actores locales y la comunidad en general.
		Página 15. Por otra parte, delimitan un conjunto integral de acciones orientadas a prevenir y controlar la deforestación en el territorio. Estas acciones se enfocan en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y comprenden cinco líneas estratégicas: la disminución de la deforestación, la mitigación de la degradación de los bosques naturales, la conservación de reservas forestales de carbono, el aumento de las reservas forestales de carbono y el fomento del manejo sostenible de los bosques. Estas iniciativas se llevarán a cabo con el respaldo financiero de países industrializados, subrayando nuestro compromiso en la lucha contra el cambio climático y la preservación de nuestros recursos forestales.

TIPO DE REGULACIÓN	DICTA	DESCRIPCIÓN
<p>Programa Nacional para la Conservación y Restauración del Bosque Seco Tropical en Colombia PNCBST</p> <p>2020 -2030</p>	<p>Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible</p> <p>Plan de acción</p>	<p>Página 32-36. Línea estratégica de gestión del conocimiento. Meta 1. Sistema de información diseñado e implementado, de libre acceso para conocimiento y monitoreo del bosque seco de Colombia basado en información biológica, edáfica, ecológica, geoambiental, social y económica. Generar información nueva a nivel biológico, de ecología de poblaciones, social y económico indispensable que incluya estudios de ecología de las especies en diferentes estados de su ciclo de vida (semillas hasta adultos), estudios de dendrocronología, para determinar el crecimiento poblacional, y determinar las mejores estrategias para uso y manejo sostenible, restauración, conservación (bases de datos, información geográfica, videos, sonidos) del bosque seco. Meta 2. Redes de conocimiento integradas por diferentes actores que participan en la generación de información a través de acciones concretas hacia la conservación, preservación, restauración, uso sostenible del Bs-T y el bienestar de la población. Visibilizar el valor e importancia del Bs-T para el bienestar humano.</p> <p>Página 52-53. Línea estratégica de restauración. Meta 5. Programas de arbolado para las áreas urbanas del Bs-T: Realizar diagnósticos y zonificaciones sobre el estado actual del arbolado en las áreas urbanas de Bs-T; identificar y promover la propagación de especies nativas del bosque seco para siembras en áreas urbanas; diseñar e implementar un programa de arbolado urbano en las áreas urbanas de Bs-T en Colombia.</p>
<p>Ley 2169 de 2021</p>	<p>Por medio de la cual se impulsa el desarrollo bajo en Carbono del país, mediante el establecimiento de metas y Medidas mínimas en materia de carbono neutralidad y Resiliencia climática y se dictan otras disposiciones</p>	<p>Artículo 13. Los institutos de investigación que forman parte del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible tendrán la tarea de coordinar la estimación del potencial de mitigación de gases de efecto invernadero en diversos ecosistemas, como los ubicados en áreas de alta montaña, los manglares y pastos marinos, los humedales, así como evaluar el impacto del arbolado urbano en ciudades con una población superior a 100,000 habitantes. Asimismo, serán responsables de rastrear las emisiones de carbono que se hayan reducido o absorbido a nivel nacional.</p>
<p>Plan Nacional de Desarrollo 2022 – 2026</p>	<p>Colombia, potencial mundial de la vida</p>	<p>Abarca estrategias destinadas a promover el desarrollo de entornos urbanos sostenibles y resilientes, mediante la implementación de dinámicas que incluyan la recuperación, transformación y mantenimiento de áreas paisajísticas. Estas estrategias también se centran en la creación de espacios de recreación y renaturalización urbana que desempeñen un papel fundamental como herramientas para mitigar los efectos del cambio climático en las ciudades de nuestro país. Además, se busca la integración de las ciudades con áreas verdes para mejorar el bienestar social y preservar la diversidad biológica de la flora y fauna regional.</p>

TIPO DE REGULACIÓN	DICTA	DESCRIPCIÓN
Plan de Desarrollo Municipal	Plan de desarrollo de Cúcuta 2020-2023	Proponen el plan llamado "Cúcuta Ciudad Verde" enfocado en la silvicultura urbana, con la visión de convertir a Cúcuta en un municipio con una gran cantidad de árboles, lo que garantizará el secuestro de CO ₂ y la producción de oxígeno. Este esfuerzo está diseñado para desempeñar un papel fundamental en la reducción de los efectos del cambio climático.
Norma Técnica Colombiana NTC 4595:2020	Ingeniería Civil y Arquitectura Planeamiento y Diseño de Instalaciones y Ambientes Escolares	Se centra en el planeamiento y diseño de instalaciones y entornos escolares, y aunque no aborda directamente las áreas verdes por estudiante en instituciones de educación superior, si cuenta, con un impacto significativo al definir que por estudiante se debe cumplir con un área de 2.5 metros cuadrados en áreas verde y circulación peatonal, haciendo la salvedad que el 60% de esa extensión debe estar proyectada en zonas verdes es decir 1.5 metros cuadrados por estudiante, además que el 30% de los espacio debe ser ocupado por especies nativas.

3. Metodología

3.1 Tipo de investigación

El proyecto de investigación fue de nivel descriptivo porque caracterizó a un grupo de individuos arbóreos de distintas especies con el fin de establecer su estructura y función dentro del ecosistema urbano. Su diseño fue de campo, puesto que se tomaron los datos pertinentes directamente de los individuos y de fuentes bibliográficas sin alterar las condiciones existentes. Su enfoque fue cuantitativo y sus resultados se adentraron en la ciencia pura o básica. (Arias, 2012).

3.2 Localización

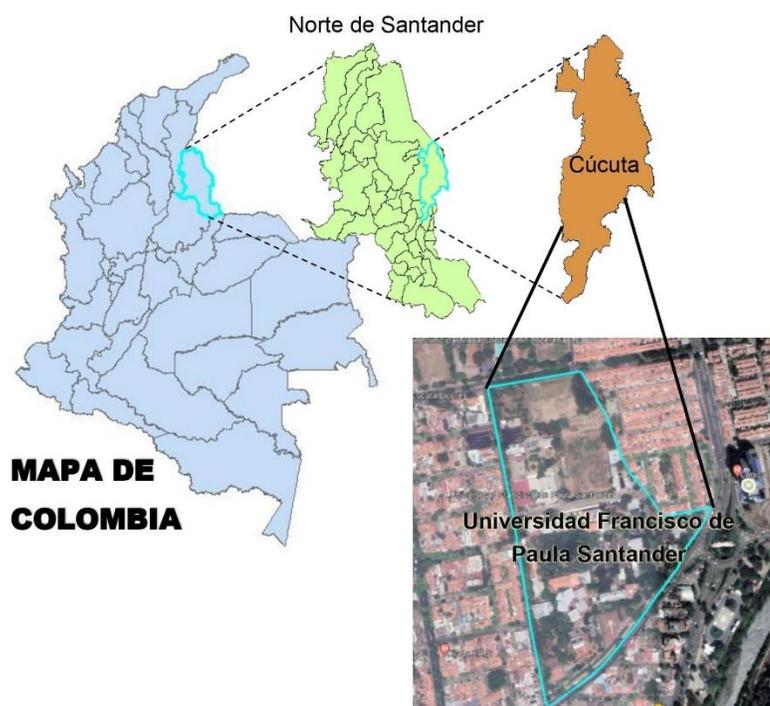


Figura 1. Ubicación geográfica UFPS Cúcuta. *Nota.* Modificado de Google Earth.

Las coordenadas geográficas de la Universidad Francisco de Paula Santander Cúcuta son: $7^{\circ} 53' 53.59''$ de latitud Norte y $72^{\circ} 29' 16.16''$ de longitud Oeste y con una altura media de 301 metros sobre el nivel del mar según la Figura 1.

3.2.1 *Clima*

El área de estudio se encuentra a 250 metros sobre el nivel del mar con una temperatura promedio de $27,2^{\circ}\text{C}$ y precipitaciones anuales de 747,7 mm (Ortiz Diaz et al., 2018) lo que corresponde a Bosque seco Tropical (Bs-T) según las zonas de vida de Holdridge.

3.3 Población y muestra

La población de nuestro proyecto son las especies de plantas de la Universidad Francisco de Paula Santander – Cúcuta, en la cual, la muestra objetivo fueron los árboles y palmas presentes en el campus, es decir, 1169 individuos correspondientes a 65 especies.

3.4 Instrumentos para la Recolección de Información

3.4.1 *Fuentes Primarias*

Se acudió directamente a la muestra de población arbórea donde se realizó un censo florístico obteniendo valores dasométricos, es decir, altura total, diámetro a la altura del pecho (DAP), datos taxonómicos como la familia y especie de los árboles, la ubicación georreferenciada y registro fotográfico, por último, se extrajeron tarugos de la muestra de los

individuos arbóreos seleccionados para determinar la densidad de la madera de las diferentes especies. Por otra parte, se secuestraron imágenes con un dron para el procesamiento y análisis del ortomosaico y determinar la extensión de las zonas verdes de la universidad-

3.4.2 Fuentes Secundarias y Terciarias

Se recurrió a artículos de investigación, tesis de grado, revistas electrónicas, bases de datos (Scopus, ScienceDirect, Scielo, Dialnet, entre otros) y la Biblioteca Eduardo Cote Lamus para realizar la revisión bibliográfica sobre las distintas metodologías empleadas para el cálculo de la biomasa aérea de los árboles y, estimación de dióxido de carbono (CO₂) secuestrado y oxígeno (O₂) producido. También, se indagó acerca de la técnica de fotogrametría y otros temas relacionados con el propósito de la investigación para obtener información relevante que soporte la misma.

3.5 Análisis de Resultados

3.5.1 Fase Exploratoria

A continuación, se describe el proceso de revisión literaria comprendido en cuatro etapas diferentes que explican la técnica usada en la gestión y síntesis documental además de precisar las herramientas y criterios adoptados en la selección de estudios literarios.

Etapa 1. Estrategia de Búsqueda. En el ejercicio de definir la búsqueda de literatura bajo los lineamientos de la investigación, se trazó una estrategia que fuera objetiva al momento

de generar la búsqueda por los repositorios digitales, filtrando la información pertinente a la orientación del estudio, además de disminuir la incertidumbre en los resultados obtenidos y acertar con literatura relevante de las áreas de interés.

Por lo tanto, se seleccionaron temáticas y conceptos que se relacionaban estrechamente con las estimaciones de biomasa área forestal apoyados en la consulta de tesauros propios de las ciencias forestales y del ambiente, que facilitó la sinonimia entre las diferentes expresiones que luego se sometieron a iteraciones de consulta en once bases de datos seleccionadas: Red Nacional de Datos Abiertos Sobre Biodiversidad (SIB), Repositorio Digital Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), EFE Verde, Repositorio Institucional Universidad Nacional de Colombia (UNAL), ScienceDirect, Scopus, Ebscohost, Organización Mundial de la Salud (OMS), Dialnet, Redalyc y Scielo, lo que llevó a reconocer las expresiones con mayores resultados de búsqueda por base de dato, de esta forma, se seleccionaron las palabras claves empleadas en la estructuración la ecuación de búsqueda.

La elaboración de una ecuación de búsqueda es una herramienta valiosa que facilita la formulación clara y precisa de la intención de búsqueda del investigador, al combinar estratégicamente palabras clave y operadores, se logra traducir dicha intención en un lenguaje coherente, permitiendo una búsqueda efectiva y enfocada (Gómez et al., 2014 y Maturana et al., 2019). Los operadores booleanos (AND, NOT, OR y XOR) desempeñan un papel clave en el proceso de construcción de la ecuación de búsqueda, se utilizan para establecer conexiones lógicas entre términos o frases en múltiples campos textuales y para unir conceptos dentro de un mismo campo (Gómez, 2017). Su aplicación estratégica permite optimizar la búsqueda y obtener resultados precisos durante la revisión bibliográfica (Rendon, 2017), véase en la Tabla 3.

Tabla 3. Operadores Booleano

Operador Lógico	Define	Obtendrá
AND	Reduce el número de registros, utiliza ambas palabras clave en la búsqueda simultáneamente; esto significa que cuantas más palabras clave uses, menos resultados obtendrás.	Registros que contengan ambos términos
NOT	Incluye un término y excluye el siguiente, por lo que filtra la información según el orden de la posición del término.	Registros que contengan la primera palabra y depuraran los que contengan la segunda
OR	Recupera información de ambos términos sin requerir que ambos términos estén presentes al mismo tiempo.	Resultados para ambas palabras
XOR	Filtra estudios que incluyan los términos de manera individual.	Resultados mayor cantidad de resultados

Nota: Adaptado de Gómez, 2017.

A partir de ahí, se procedió a la elaboración de diversas ecuaciones de ensayo. Estas ecuaciones fueron sometidas a pruebas en diferentes bases de datos con el fin de determinar cuál de ellas se ajustaba de manera óptima a los requerimientos específicos del estudio y aportaba los resultados más relevantes y significativos (como se puede ver en el Anexo 1).

En seguida, se llevó a cabo una selección de los tres repositorios que presentaron la mayor cantidad de resultados derivados de la ecuación previamente definida. Posteriormente, estos repositorios fueron sometidos a un análisis bibliométrico detallado de sus características cuantitativas lo que permitió identificar y determinar el motor de búsqueda más adecuada para llevar a cabo la revisión literaria.

Etapa 2. Análisis Bibliométrico. Con el propósito de establecer una ruta de análisis fundamentada para la selección de la fuente de búsqueda y el cotejo entre investigaciones, se llevó a cabo una serie de pasos. En primer lugar, se definió el periodo de divulgación de los últimos 10 años (2012 al 2021) para cada base de datos. En segundo lugar, se aplicó la ecuación en los buscadores pertinentes, y se procedió a examinar las características cuantitativas de los resultados obtenidos en cada repositorio, para ello, se utilizó una hoja de cálculo de Excel como herramienta de apoyo. Dentro del proceso de análisis, se estudiaron tres indicadores clave: Producción, Visibilidad e Impacto y Colaborativo (Tabla 4). Estos indicadores permitieron medir el comportamiento de las producciones científicas desde diferentes perspectivas y contrastes lo que condujo a la selección de una única fuente de búsqueda que cumplía con los criterios establecidos.

Una vez elegido el repositorio adecuado, los resultados de búsqueda fueron exportados en dos tipos de formatos: CSV y BibTeX, con el fin de realizar un tratamiento integral de la información obtenida. En el caso del archivo CSV, se estructuró un listado de datos en Excel, incluyendo diversas características cuantitativas como criterios de selección que resultaron útiles en el proceso de filtrado de los 50 estudios más pertinentes y significativos para la investigación dando preferencia a estudios con mayor cantidad de citas (Tabla 5); lo cual denotaba su relevancia en el ámbito científico, también se consideraron investigaciones que abordaran temáticas afines al enfoque del estudio, garantizando su pertinencia, y se consideraron los artículos de libre acceso para facilitar una revisión bibliográfica. Simultáneamente, se administraron los metadatos de las investigaciones mediante la interfaz del gestor bibliográfico Zotero, utilizando el formato BibTeX, lo que posibilitó una organización sistemática de la

colección científica y captura del documento según el permiso de acceso de las divulgaciones asegurando así una revisión bibliográfica rigurosa y bien estructurada.

Tabla 4. Indicadores y sus características cuantitativas

Indicadores por Categoría	Características
<i>Producción</i>	Año de Publicación
<i>Visibilidad e Impacto</i>	Especialización Temática
	Tipo de Documento
<i>Colaborativo</i>	País
	Idioma

Nota: Tomado de Paz & AVECILLAS, 2021

Etapa 3. Revisión literaria. En la etapa de la revisión literaria, se llevó a cabo un análisis exhaustivo de los 50 artículos seleccionados acerca de la estimación de biomasa aérea en bosques y temas relacionados. Para ello, se empleó una matriz donde se ahondó en los siguientes criterios de evaluación:

✓ Autores: Se examinaron y registraron los nombres de los autores de cada artículo para identificar sus contribuciones.

✓ Año: Se tomó nota del año de publicación de cada artículo para comprender la evolución temporal del tema central y su relevancia en diferentes momentos.

✓ Tema principal: Se identificó el tema principal de cada artículo y se agruparon aquellos que compartían similitudes y abordaban tópicos asociados.

✓ Descripción del tema principal: Se realizó una descripción detallada de los aspectos más relevantes de cada tema principal, destacando los hallazgos clave y las conclusiones más significativas.

✓ Epítome: Se elaboró un resumen conciso de los puntos cruciales y conclusiones fundamentales de cada artículo, resaltando su contribución al campo de estudio.

✓ Referencias relacionadas: Se recopilaron y añadieron las referencias bibliográficas de otros artículos dentro de los mismos 50 seleccionados, los cuales abordaban temas centrales similares. Estas referencias relacionadas enriquecieron la base de conocimiento y respaldaron la contextualización y discusión de los resultados.

Tabla 5. Criterios de selección de artículos

Características Cuantitativas	Filtros / Criterios
<i>Authors (Autores)</i>	NA
<i>Title (Título)</i>	Biomass (Biomasa) – Urban (Urbano) – Tree (árbol) – Forest (Bosque)
<i>Year (Año)</i>	2018 – 2022
<i>Source Title (Título de la Fuente)</i>	NA
<i>Cited (Citado)</i>	Mayor a Menor
<i>DOI</i>	NA
<i>Keywords (Palabras Clave)</i>	Biomass (Biomasa) – Urban (Urbano) – Tree (árbol) – Forest (Bosque)
<i>Document Type (Tipo de Documento)</i>	NA
<i>Publication stage (Etapa de Publicación)</i>	Finalizado
<i>Open Access (Acceso Abierto)</i>	All (Todo)

Durante esta etapa de análisis riguroso y sistematizado, la revisión minuciosa de los 50 artículos seleccionados proporcionó una visión completa y coherente del área de estudio. Al examinar cuidadosamente los contenidos de cada artículo, se identificaron patrones recurrentes, tendencias emergentes y aportes significativos en el campo de investigación abordado. La detección de similitudes temáticas y enfoques compartidos entre los artículos permitió establecer una sólida fundamentación conceptual y contextualizar los resultados en relación con la literatura científica existente. Asimismo, se pudieron destacar posibles brechas de conocimiento y oportunidades para futuras investigaciones. En última instancia, este análisis brindó una perspectiva integral y robusta del estado actual de la Ecología Forestal (estimación de la biomasa aérea en bosques).

3.5.2 Fase de Campo

En la fase de campo del proyecto, se llevó a cabo una actualización del censo florístico en la Universidad Francisco de Paula Santander sede Cúcuta, basándose en el Manual de Campo: Inventario forestal nacional de Colombia del 2018, como se muestra en la Figura 2. Para facilitar la toma de datos en campo, la universidad se dividió en 4 sectores, lo que permitió un muestreo más eficiente. Se emplearon instrumentos como el clinómetro, decámetro, cinta diamétrica y GPS. Además, se diseñó un formato detallado que incluía información relevante, como localización, fecha, observadores, distancia vertical, número de individuo, nombre común, coordenadas, distancia horizontal, ángulo y hasta 5 columnas de Diámetro a la Altura del Pecho (DAP) para aquellos árboles con varias ramificaciones. Cabe señalar que, en el formato se elaboró un instructivo conciso donde se incluye la descripción de cada variable y los 4 sectores de la universidad (véase Anexo 2). Por ese motivo, este formato permitió una recopilación

precisa y sistemática de datos, asegurando la eficiencia y confiabilidad del estudio en la universidad.

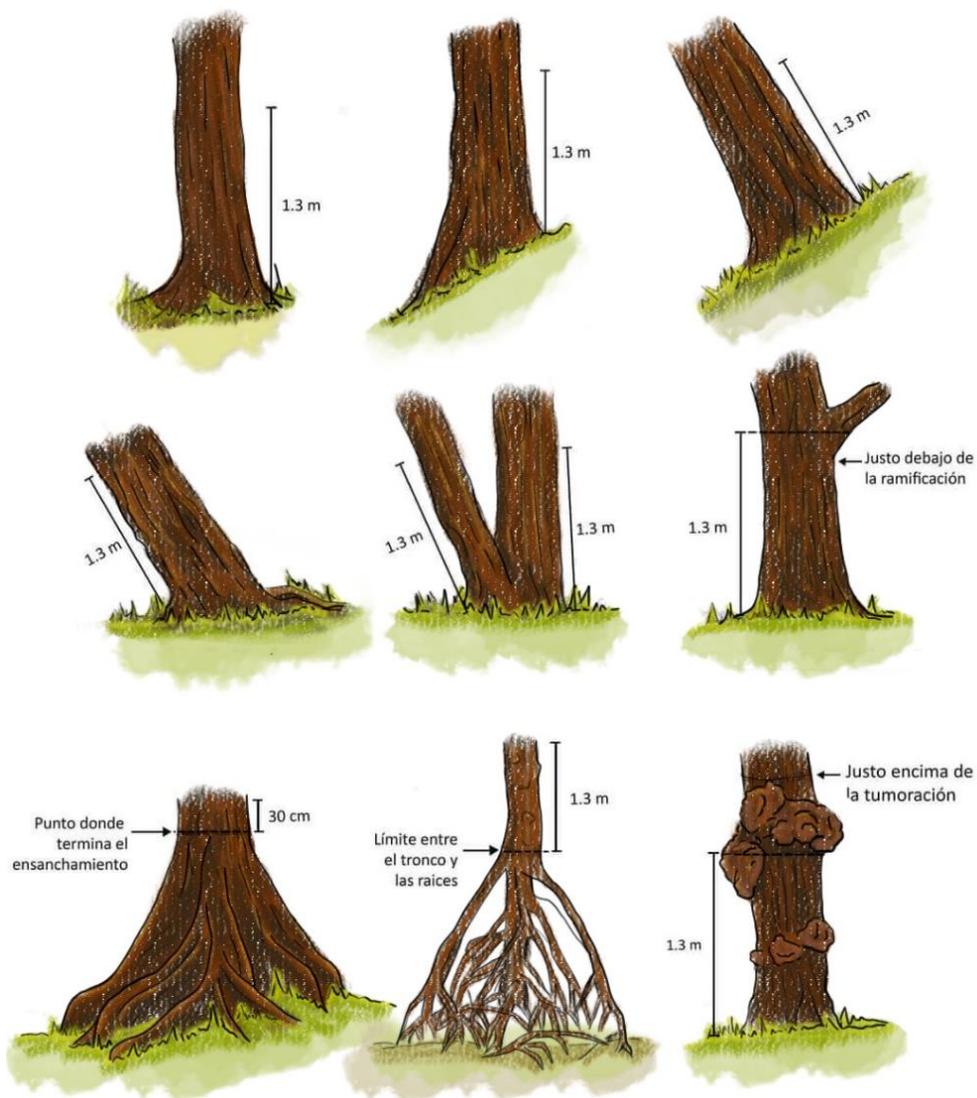


Figura 2. Medición del DAP para diferentes troncos

En el estudio, se implementó un enfoque de muestreo no probabilístico por cuotas, basado en la metodología propuesta por Requena (2014) y Mercado (2021). La población objetivo consistió en 1229 individuos de 65 especies diferentes, ubicados en el campus universitario. La selección de muestras se dividió por grupos según la especie, permitiendo la inclusión de hasta tres individuos por cada especie con un Diámetro a la Altura del Pecho (DAP) igual o superior a 10 cm. De esta manera, se logró obtener muestras de la madera de árboles que fueran representativas en función de la cantidad de individuos de cada especie. El enfoque de muestreo por cuotas, junto con el criterio del DAP, se aplicó para facilitar y asegurar la obtención de datos adecuados para el análisis de la densidad de la biomasa aérea en el estudio forestal.

En el proceso de muestreo, se empleó el barreno de Pressler para realizar la toma de muestras de madera de los árboles seleccionados de manera no destructiva. Cuidadosamente, se extrajeron tarugos de madera, también conocidos como núcleos, tal como se ilustra en la Figura 3. Estos datos se diligenciaron en un formato previamente diseñado, el cual incluía variables importantes como el número de árbol, nombre común, coordenadas, longitud, masa de la caja de Petri, masa verde, masa seca, volumen, datos generales de la zona de estudio y observadores, así como el diámetro interno del barreno utilizado en el proceso (información detallada [Anexo 3](#)).

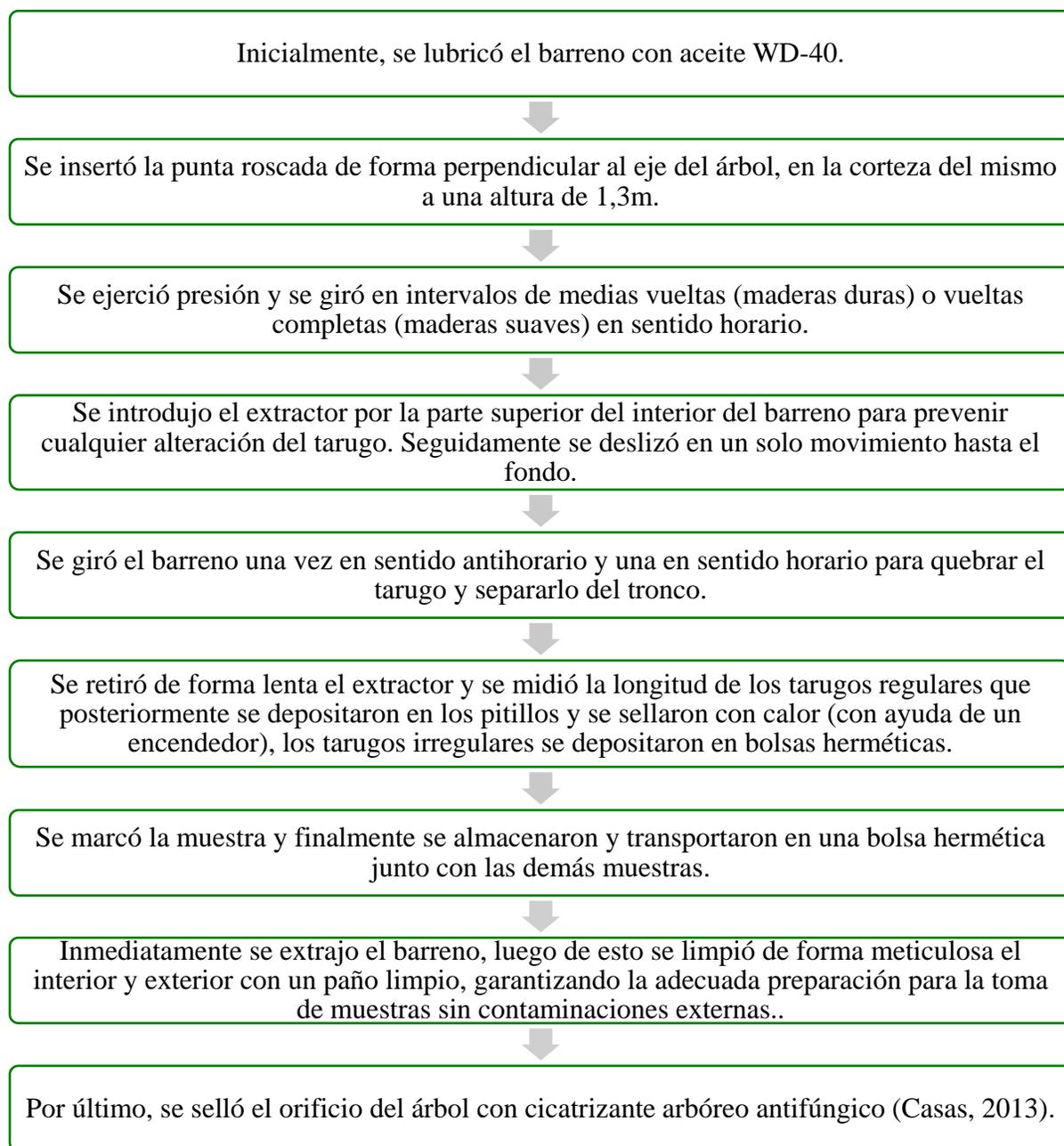


Figura 3. Flujograma de proceso para la toma de muestras de la madera de los árboles en pie. Fuente Modificado de Gutiérrez et. al, 2013.

Adicionalmente, se implementó la técnica de fotogrametría con ayuda de un profesional en el área certificado, para obtener una representación visual precisa de la extensión de zonas verdes en la universidad. Con este propósito, se llevaron a cabo dos rutas de vuelos meticulosamente

planificados para el dron, el cual capturó imágenes aéreas de alta resolución y precisión. Durante los vuelos, se aseguró una altura de vuelo de 60 metros debido a restricciones aeronáuticas en la zona, así como una velocidad de desplazamiento de 7.9 metros por segundo. Además, el tiempo total de vuelo para ambos trayectos fue de 30 minutos. La cámara utilizada en el dron, una DJI Phantom 4, proporcionó una resolución excepcional de 20 millones de píxeles (MP), asegurando imágenes de calidad y detalles nítidos. Asimismo, el proceso de captura de imágenes se llevó a cabo considerando condiciones ambientales y de iluminación óptimas, lo que garantizó resultados precisos y confiables en la representación geoespacial de las zonas verdes universitarias.

3.5.3 Fase de Experimental

A partir de las muestras de madera tomadas, se realizó el respectivo procedimiento de laboratorio para las formas regulares (cilíndricas) de los tarugos y las formas irregulares (astillas), de esa manera se determinó las densidades de cada especie arbórea. En cuanto al procedimiento empleado, se trató de los métodos B para formas irregulares y el método E para formas regulares, como menciona la norma técnica internacional American Society for Testing and Materials ASTM D2395-14 (Fassina, 2015), como se muestra a continuación:

Método B - modo IV. El volumen se determina empleando el principio de Arquímedes. En primer lugar, se agregó suficiente agua para cubrir la muestra en una probeta graduada, se midió el volumen de agua antes y después de sumergir la muestra, por lo tanto, el volumen del tarugo es la diferencia entre esos volúmenes.

Método E. Se determinó el volumen a partir del diámetro interno del barreno y la longitud del tarugo que se midió inmediatamente fue tomada la muestra. Entonces, el volumen se calculó aplicando la siguiente ecuación:

$$V = \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2 l$$

Dónde,

V: Volumen, d: diámetro interno del barreno de Pressler, y, l: longitud medida del tarugo.

Posteriormente, se seccionaron y dispusieron las muestras cuidadosamente en cajas de Petri de forma que se evitara perder material de estas, además se rotularon, luego se pesaron las muestras para obtener la masa verde, y se realizó el secado en un horno a una temperatura de $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ durante 48 horas para la determinar del peso seco (Polonia, 2019).

Cálculo de la Densidad. Se calcula la densidad de la madera de cada sub-muestra con la siguiente fórmula:

$$D = Ps / Vv$$

Donde, D: Densidad de la madera, Ps: Peso en seco o anhidro, Vv: Volumen verde o saturado.

Posteriormente, se calculó el promedio de las densidades para cada especie, con el propósito de obtener una visión detallada de la heterogeneidad en la densidad de madera entre las distintas especies, en consecuencia, la distinción de biomasa aérea teniendo en cuenta la densidad como variable independiente.

Paralelamente se importaron las imágenes capturadas al software Agisoft Metashape para ser procesadas en datos geométricos desde una perspectiva aérea. Este procedimiento se basó de la guía y documentación en los levantamientos fotogramétricos elaborada por Feliciano en 2021. Principalmente, implicó la corrección de proyecciones para adaptarlas a coordenadas geográficas, eligiendo el sistema geodésico Magna Sirgas Nacional como referencia, cabe señalar que no hubo necesidad de tomar puntos de control. Posteriormente, utilizando las herramientas del programa, se logró la alineación de las fotografías en función de los píxeles compartidos, garantizando una alta precisión entre ellas. Seguidamente, se creó el modelo digital de elevación y se generó la nube de puntos densa con alta calidad y un filtrado de profundidad. Finalmente, se completó la creación del ortomosaico con una resolución de 5 centímetros por píxel que se exportó en formatos .tif y KMLZ, lo que permitió una visualización minuciosa y precisa del área de interés.

3.5.4 Fase de Análisis de Datos

Correlación DAP – altura total. En primer lugar, se exploró la relación entre el DAP y la altura total de los árboles presentes en el campus universitario utilizando técnicas estadísticas que permitieron evaluar la fuerza y dirección de esta correlación, proporcionando así una comprensión más profunda de los factores que influyen en el crecimiento de estos. Para eso, se

seleccionaron solo las especies correspondientes a palmas y árboles, además, se organizó la información de tal forma que cada DAP de las especies con múltiples tallos se consideraron como individuos separados, con la misma altura total registrada para el árbol.

Seguidamente, se analizó la relación entre el DAP y la altura total de los árboles para ello se empleó el coeficiente de Pearson (r), este análisis estadístico permitió evaluar la fuerza y dirección de la correlación, como se muestra en la Tabla 6. Luego, se realizó un análisis de regresión lineal donde el DAP se consideró como la variable predictora y la altura total como variable dependiente. La regresión lineal modela la relación entre las variables y calcula la función que mejor se adapte a la nube de puntos (Lobo, 2020). Adicionalmente, se aplicó la prueba t Student para evaluar la normalidad de la distribución de las variables DAP y altura total, y un nivel de significancia de 0.05, es decir, $t < 0.05$ se conoce como distribución normal y $t > 0.05$ como distribución no normal (Lind et al., 2012).

Tabla 6. Interpretación del coeficiente r – Pearson

<i> r </i>	<i>Interpretación</i>
0	<i>Nula</i>
>0.0 –0.2	<i>Muy baja</i>
>0.2 –0.4	<i>Baja</i>
>0.4 –0.6	<i>Moderada</i>
>0.6 –0.8	<i>Alta</i>
>0.8 –<1.0	<i>Muy alta</i>
1	<i>Perfecta</i>

Nota. Modificado de Lomelí, 2023.

Posteriormente, se evaluó la precisión de las estimaciones producto de la regresión lineal calculando el error estándar (e) de las mismas, esto permitió identificar de forma visual los valores atípicos de la nube de puntos, debido a que se graficaron las rectas de \hat{Y} (función de la

regresión lineal), $\hat{Y} + e$, y , $\hat{Y} - e$, como se muestra en la Figura 4. Se revisaron detenidamente los valores atípicos para determinar la naturaleza del mismo recurriendo a la ubicación de estos, las causas de estos valores pueden ser por error de medición, digitación u otro factor que afectara el crecimiento del árbol, como: competencia entre especies, intervenciones humanas, mal estado fitosanitario, entre otros. La comprensión de los factores que inciden en el crecimiento de los mismos además de información valiosa para la gestión forestal y la conservación de los ecosistemas urbanos.

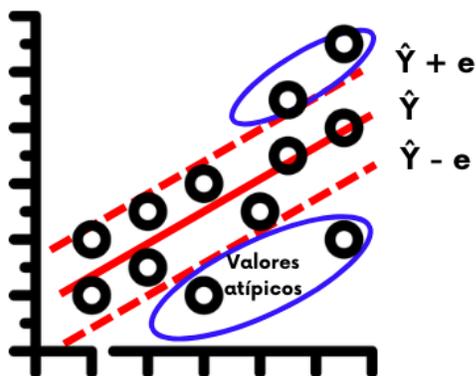


Figura 4. Selección de valores atípicos a partir del error estándar

Estimación de la Biomasa aérea. Árboles: A fin de calcular la biomasa aérea de las especies arbóreas se empleó la fórmula correspondiente a bosque seco tropical (bs-T) del “protocolo nacional y subnacional para la estimación de biomasa-carbono en Colombia”:

$$\ln(BA) = a + B1 \ln(D^2 H \rho)$$

Dónde, $a = -2,29$ $B1 = 0,932$

Las variables independientes son: diámetro en centímetros (D), altura en metros (H) y densidad de madera en g/cm^3 (ρ) y, la variable dependiente: biomasa en kilogramos (BA). (Yepes et al., 2011)

Palmas: Teniendo en cuenta que el secuestro de carbono de las Palmas no se concibe en los mismos parámetros que de un árbol, se optó por la aplicación de una formula adicional:

$$B_{palm} = (\exp(0,9285 \times \ln(D^2) + 5,7236) \times 1,050/10^3)/1000$$

Dónde, B_{palm} (Biomasa de la palmera en toneladas), D (Diámetro a la altura del pecho en centímetros) (Cabudivo, 2017).

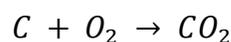
Para evitar la extensión de cifras, las mediciones de biomasa aérea fueron convertidas a toneladas utilizando un factor de conversión $1 \text{ tn} = 1000 \text{ kg}$. Esta estrategia tuvo la intención presentar los resultados de manera más concisa y facilitar la interpretación de los datos en el contexto del estudio.

Cálculo del carbono almacenado. El carbono almacenado representa aproximadamente el 50% de la biomasa vegetal, por lo tanto, la biomasa calculada anteriormente se multiplicó por 0,5 correspondiente al factor de conversión (F_c) (Cabudivo, 2017).

$$CT = BT \times F_c$$

Dónde, Carbono almacenado (CT), Biomasa aérea total (BT).

Cálculo de la productividad de la biomasa aérea. El de CO₂ secuestrado y el O₂ liberado se halló a partir de la relación estequiométrica entre los compuestos, dado que:



$$C \text{ (tn)} \times \frac{1 \text{ mol } CO_2}{1 \text{ mol } C} \times \frac{43,991 \frac{\text{tn}}{\text{mol}} CO_2}{12,011 \frac{\text{tn}}{\text{mol}} C} = CO_2 \text{ (tn) secuestrado}$$

$$CO_2 \text{ secuestrado} \times \frac{1 \text{ mol } O_2}{1 \text{ mol } CO_2} \times \frac{31,98 \frac{\text{tn}}{\text{mol}} O_2}{43,991 \frac{\text{tn}}{\text{mol}} CO_2} = O_2 \text{ (tn) liberado}$$

3.5.5 Fase de Consolidación

Se realizó la síntesis de los hallazgos y conceptos más relevantes obtenidos en las diferentes fases del estudio, resaltando el nivel de significancia y contribución de los árboles urbanos en la prestación del servicio ecosistémico de regulación al interior de la Universidad Francisco de Paula Santander. A través de esta integración de datos, se estableció una base sólida para la interpretación y análisis de los resultados con el objetivo de generar una nemotecnia que facilite la comprensión y divulgación de los roles ecosistémicos proporcionados por los árboles en el entorno universitario.

A fin de conocer la abundancia ecológica de las especies arbóreas en términos de equidad y entender la diversidad de la zona y el grado de importancia que presentan las especies y familias botánicas, se calculó el índice de valor de importancia, equitatividad y Shannon.

El Índice de Valor de Importancia (IVI) se utiliza para evaluar el grado ecológico en el que las especies individuales contribuyen a la estructura horizontal de toda la comunidad forestal. Esto se logra al considerar la abundancia, frecuencia y dominancia de las especies en términos porcentuales, y la suma de estas variables relativas definen IVI (Moreira, 2021). En consecuencia, las especies que mejor se adaptan y responden a la dinámica del bosque se identifican como las de mayor importancia por su contribución significativa en la estructura y la función del ecosistema forestal (Cortes & Varón, 2018; Moreira, 2021). A continuación, se presenta en tabla 7 las ecuaciones usadas en el cálculo del índice según (Cabrera et al., 2020):

Tabla 7. Fórmulas para el cálculo del IVI

Abundancia	$Ai = \frac{N}{S}$	$\% AR = \left(\frac{Ai}{\sum Ai} \right) * 100$
Frecuencia	$fi = \frac{Pi}{Ns}$	$\% FR = \left(\frac{fi}{\sum fi} \right) * 100$
Dominancia	$Di = \frac{AB}{S}$	$\% DR = \left(\frac{Di}{\sum Di} \right) * 100$
IVI	$\% IVI = \frac{AR + FR + DR}{3}$	

Nota: Donde Ai: abundancia absoluta de la especie, N: número de individuos de la especie, S: Superficie del área muestreada (ha), fi: frecuencia absoluta, Pi: número de sitios en la que está presenta la especie, Ns: número de sitios de muestreo, Di: dominancia absoluta de la especie (m²/ha), AB: suma de área basal de la especie, DR: dominancia relativa de la especie.

El índice de Shannon (H') es una medida que evalúa tanto la riqueza de especies como la uniformidad de su distribución en una muestra forestal. Este índice refleja la probabilidad de seleccionar al azar una especie específica de la comunidad arbórea por lo que, cuantifica la predicción de cuál especie se elegiría en una selección aleatoria a partir del grado de diversidad biológica que presenta (Castillo, 2023) por medio de la siguiente ecuación (Moreira, 2021).

$$H' = - \sum (P_i * \ln(P_i))$$

Donde, P_i es el número de individuos de la especie con respecto al total, además, se determinó la categoría de diversidad biológica que presenta el arbolado de la universidad basados en la clasificación de (Pasantes & Bonifaz, 2022) como se presenta en la Tabla 8.

Tabla 8. Interpretación del índice de Shannon

DIVERSIDAD	
0 - 1.5	Baja
1.6 - 3	Media
3.1 - 5	Alta

Nota: Tomado de Pasantes & Bonifaz, 2022

El Índice de Pielou (J) se utiliza para medir la uniformidad en la abundancia de especies dentro de una comunidad ecológica. Su valor varía de 0 a 1, donde 1 indica que todas las especies tienen una abundancia igual, es decir, la distribución es completamente equitativa y 0 indica una distribución altamente desigual de la abundancia entre las especies (Cortes & Varón, 2018). Este índice se complementa con el índice de Shannon ya que evalúa la equitatividad de la biodiversidad de la zona lo que proporcionan una visión más completa de la estructura del arbolado (Moreira & Vélez, 2023).

Los resultados se generaron inicialmente mediante el uso de Microsoft Excel, y para verificar la precisión de los datos, se empleó el software PAST (Paquete de Software de Estadísticas Paleontológicas para Educación y Análisis de Datos), este programa no solo permitió evaluar la diversidad biológica en los cuadrantes de muestreo, sino que también proporcionó una visión más detallada del comportamiento de la diversidad presente en el

campus. Esto se logró a través del uso de los índices predeterminados en la interfaz del software, que además facilitaron la creación de gráficos útiles para una posterior discusión y análisis de los resultados.

A su vez, se empleó la extensión de ArcGIS Desktop conocida como ArcMap para llevar a cabo el diseño y delimitación cartográfica tanto de las coberturas presentes en el campus universitario para el 2017 y 2023 siguiendo la clasificación de Corine Land Cover (Cooperation in Europe for the Reporting of the International Nature of Europe), como también la apreciación visual de la ubicación de árboles y palmas presentes en la institución basados en las coordenadas de puntos tomados en la actualización del censo florístico. Para ello, se procesaron los datos geoespaciales de los ortomosaicos de los años 2017 y 2023 mediante la digitalización de capas de polígonos y la asignación de atributos descriptivos, manteniendo una escala de 1:4.000. Es relevante mencionar que el primer ortomosaico fue proporcionado por la docente e ingeniera Alba Nely Arévalo Vergel. En relación con el tercer mapeo, se llevaron a cabo procesos para la transformación de los puntos geográficos en el formato comprensibles por ArcMap, creando capas de puntos, asignación de simbología y leyendas adecuadas, manteniendo la misma escala de 1:4.000. Una vez, generada la delimitación de coberturas se procedió a calcular la extensión en metros cuadrados de las áreas verdes y evaluar su conformidad con respecto a la Norma Técnica Colombiana NTC 4595:2020.

4. Resultados

Los resultados de este proyecto enfatizan la importancia de los árboles en la Universidad Francisco de Paula Santander (UFPS), Cúcuta como elementos fundamentales en el servicio ecosistémico de secuestro de dióxido de carbono (CO₂) y liberación de oxígeno (O₂). Su contribución esencial para mantener un entorno más saludable en el campus y su entorno local subrayan la necesidad de conservar y promover la vegetación en la universidad en beneficio de la comunidad estudiantil y la sostenibilidad ambiental.

4.1 Evaluación de los registros de información secundaria

Se exponen los patrones, tendencias y observaciones relevantes que surgieron en el ejercicio de revisión sistémica, lo que permitió fundamentar y contextualizar adecuadamente este artículo, identificando el crecimiento significativo en la investigación aplicada al contexto de estudio. Cabe destacar que este análisis no solo se ha centrado en la cantidad de publicaciones, sino también en la calidad y relevancia de las investigaciones, asegurando así que los hallazgos sean robustos y confiables.

4.1.1 *Análisis Bibliométrico*

En la indagación de bases de datos que fueran apropiadas para el estudio de revisión, se realizó un análisis bibliométrico de productividad en tres bases de datos durante 10 años, desde el año 2012 hasta el año 2021, las cuales fueron: Scopus, ScienceDirect y Ebscohost. En el análisis bibliométrico se consideraron los números de documentos que se encontraban relacionados con año, área de conocimiento, tipo de documento, país e idioma.

En la Figura 5 se observa la cantidad de documentos que fueron publicados en las tres bases de datos, donde se evidencia que la base de datos con mayor número de documentos encontrados fue Scopus desde el año 2013 hasta el año 2021, mientras que ScienceDirect y Ebscohost representaron valores similares de búsqueda. Por otro lado, se evidencia que la cantidad de documentos encontrados en las tres bases de datos presentaron una tendencia ascendente en el transcurso de 2012 a 2021. En vista de lo expuesto, Scopus se presenta como la herramienta ideal para la búsqueda de información relacionada con biomasa forestal y servicios ecosistémicos.

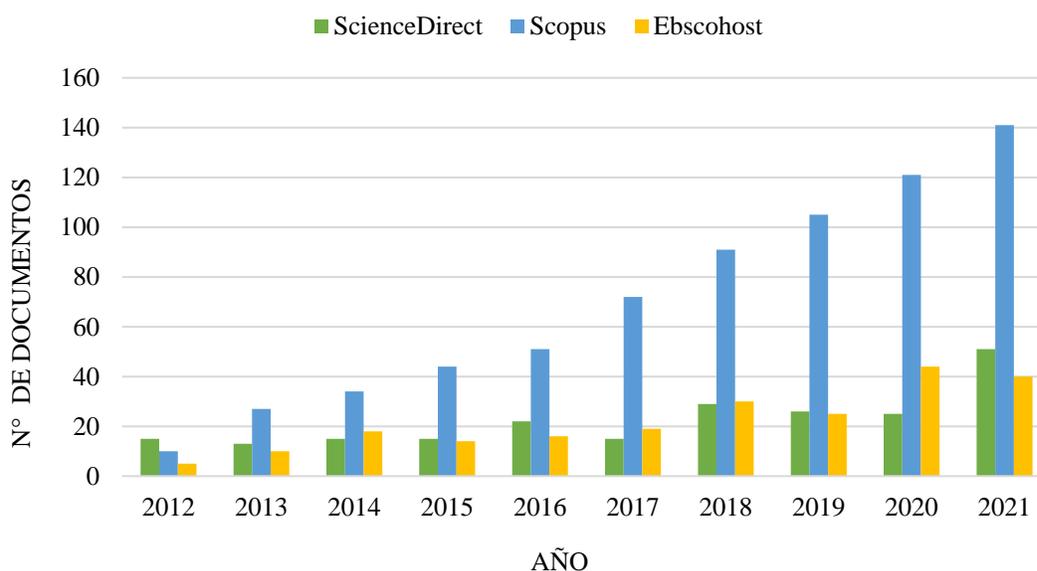


Figura 5. Número de documento por año

En la Figura 6 se muestra la cantidad de documentos publicados en Scopus y ScienceDirect según la especialización temática. Se observa que las áreas de Ciencias Ambientales y Ciencias Agrarias y Biológicas cuentan con el mayor número de documentos. Por otro lado, se encontró que la base de datos Ebscohost también contiene términos relevantes para la investigación, como biomasa, secuestro de carbono y biomasa forestal, sin embargo, debido a que las áreas temáticas

en Ebscohost no coinciden con las analizadas en este estudio, no fue posible realizar una comparación directa con dicha base de datos.

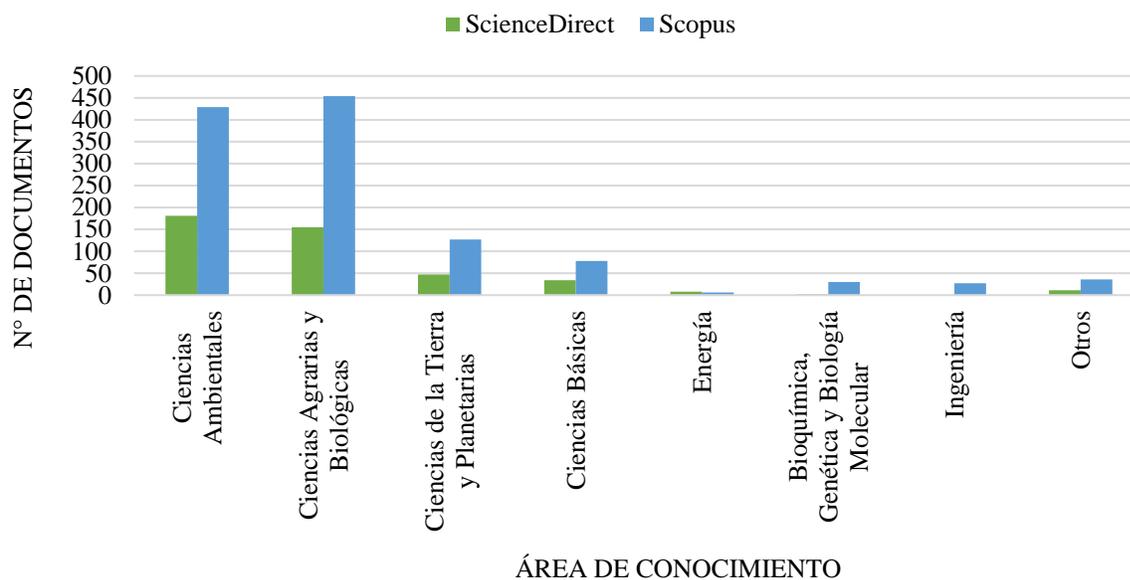


Figura 6. Número de documentos por áreas de conocimiento

En la Figura 7 se aprecia la productividad científica según el tipo de documento, resaltando que la mayoría de los escritos son artículos. Esta información es de gran relevancia, ya que los artículos científicos se consideran fuentes fundamentales para acceder a conocimientos especializados sobre biomasa forestal y servicios ecosistémicos. Aunque Ebscohost carece de un filtro específico para el tipo de documentos publicados, la preponderancia de artículos en las demás bases de datos valida su importancia en la búsqueda de información sólida y actualizada en el ámbito de estudio.

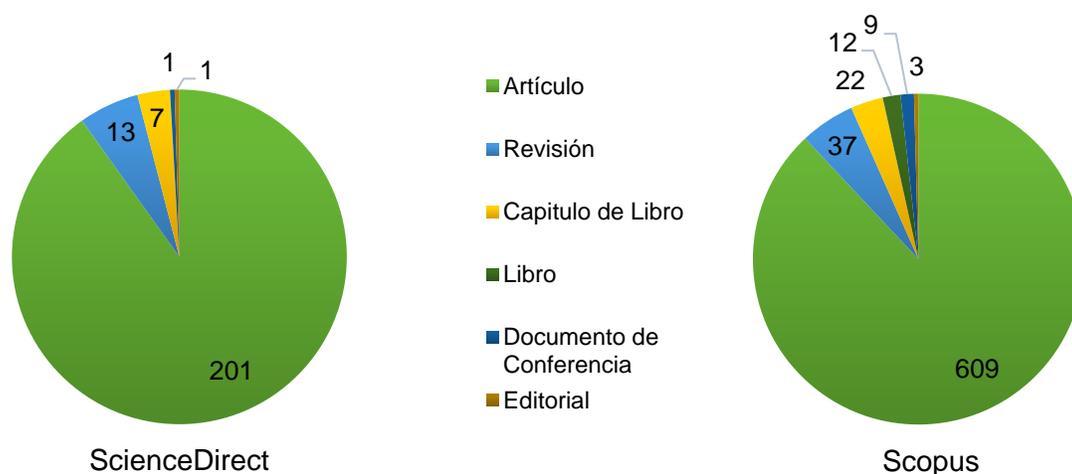


Figura 7. Número de escritos por tipo de documento

En la Figura 8 se presenta un análisis de los países con 20 o más resultados de búsqueda en la base de datos Scopus, ya que esta plataforma proporciona información detallada en cuanto a la cantidad de documentos por país, diferente a ScienceDirect y Ebscohost, donde carecen de esta información específica. En esta visualización, se destaca que Estados Unidos lidera con 178 publicaciones, seguido por el Reino Unido con 89, y Australia y China con 81 cada uno. En contraste, 97 países obtuvieron 20 o menos resultados de búsqueda. Estos datos ponen de manifiesto la ventaja de utilizar Scopus para obtener una visión panorámica de los países más activos en este campo resaltando la importancia de la colaboración internacional para el avance de la ciencia en esta área.

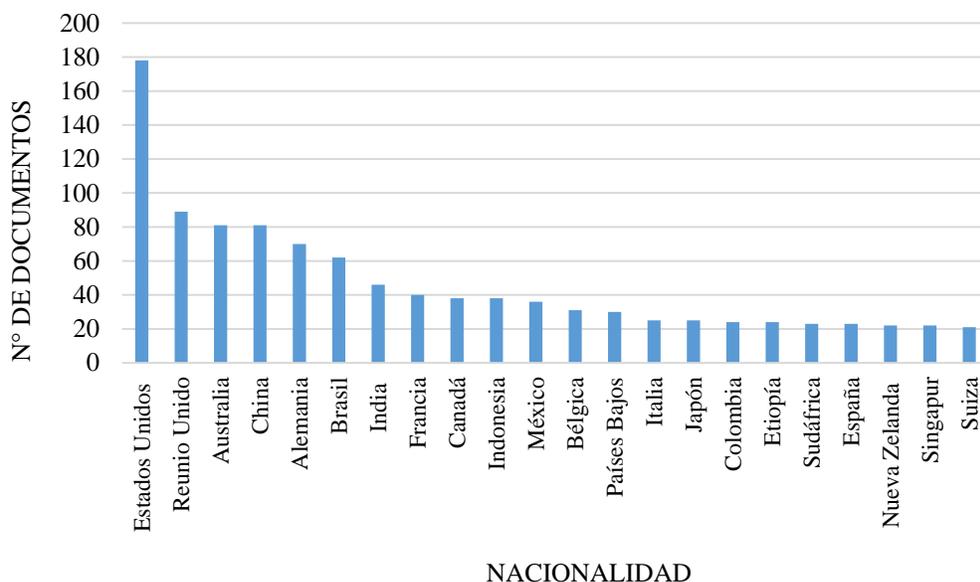


Figura 8. Número de documentos por país

El análisis bibliométrico realizado con VOSviewer (Figura 9) reveló patrones y relaciones interesantes en las producciones científicas seleccionadas. De las 2069 palabras identificadas inicialmente, se filtraron 37 con una ocurrencia mínima de 10 en Scopus, lo que asegura su relevancia para el análisis. Estas palabras clave se agruparon en cinco clústeres, representando conjuntos densos de términos relacionados con diferentes líneas de investigación. Cada clúster mostró una fuerte conectividad interna, mientras que la conectividad entre clústeres fue menor. Entre las palabras clave analizadas, "above ground biomass" se destacó como el núcleo central, con alta frecuencia de aparición (94 repeticiones) y numerosos vínculos (115), abarcando diversas disciplinas y enfoques de investigación.

Este análisis proporciona una visión integral de la estructura temática y las tendencias de investigación en el campo de estudio. Los resultados son relevantes para comprender la

identificar 8 clústeres de colaboración, donde cada clúster agrupa a investigadores con intereses y áreas temáticas afines. La proximidad entre los clústeres refleja el grado de interconexión y colaboración entre ellos, lo que indica una dinámica y diversidad en las redes de colaboración científica. Algunos clústeres muestran una mayor conectividad interna, lo que sugiere una fuerte colaboración dentro de sus miembros, mientras que otros clústeres presentan una conexión significativa con otros grupos, fomentando la interdisciplinariedad y la sinergia en el ámbito académico.

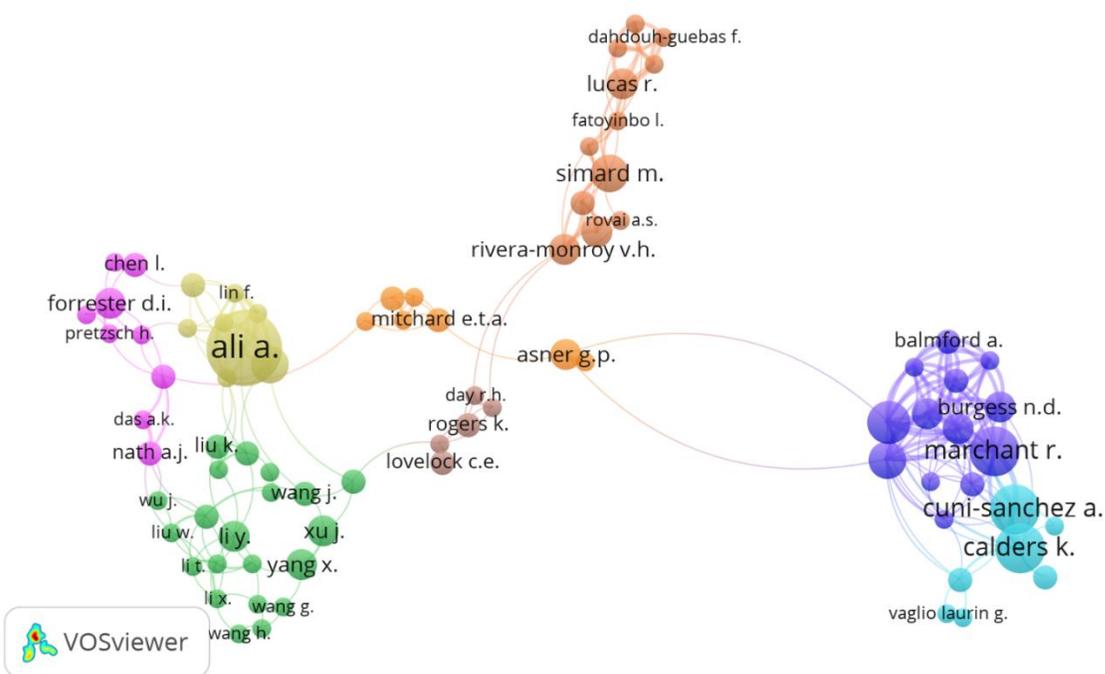


Figura 10. Análisis de co-autoría. Nota. Elaborado desde el programa VOSviewer

4.1.2 Revisión Literaria

Tras examinar la productividad científica según el año, país, idioma, tipo de documento y área de conocimiento, se concluyó que Scopus ofrecía el repertorio más extenso de documentos

y, en particular, una amplia colección de artículos que resultaron ser de fácil comprensión y alta relevancia para el tema en cuestión. Asimismo, la aplicación del mapa de coocurrencia de palabras clave y el análisis de coautoría en VOSviewer permitió identificar las principales tendencias temáticas y la dinámica colaborativa entre autores. Partiendo de ello, se seleccionaron 50 producciones científicas relacionadas con la estimación de biomasa aérea en zonas urbanas y empleando técnicas de alometría, sin embargo, el análisis de coocurrencia mostró que los estudios en áreas urbanas son poco contribuyentes, en consecuencia, se optó por incluir documentos con temáticas a fines en la práctica de estimación de biomasa aérea para cubrir el alcance.

Es importante destacar que la selección de los artículos de esta revisión literaria fue realizada de manera intencionada, con el objetivo de abordar específicamente el estado del arte de los bosques secos tropicales en áreas urbanas. Sin embargo, es relevante reconocer que esta estrategia de selección podría implicar cierto sesgo en la información recopilada, ya que se priorizaron temas y enfoques específicos. La revisión de literatura permite tener un panorama amplio, actualizado (2018 a 2022) y más influyente, del estado del arte en el campo de interés (revisar [Anexo 4](#)).

Se puede apreciar en la Figura 11 que la técnica de teledetección tuvo su auge en el año del 2018, para el año 2019 se empezó a presentar una disminución en sus producciones a diferencia de las técnicas de ecuaciones alométricas fueron constantes excepto en el 2019 que tuvo un evidente incremento, por otro lado, desde el año 2018 se emplearon a utilizar otras técnicas de medición como son el software i-Tree, catálogos de biomasa aérea y métodos destructivos. Cabe señalar, que los estudios realizados en el año 2022 hablan sobre biomasa aérea, importancia de

los servicios ecosistémicos de los árboles y temas a fines, pero no mencionan técnicas de estimación. Lo anterior, indica que la teledetección y la alometría se destacan como las técnicas predominantes en la estimación de biomasa, tanto en áreas forestales como urbanas, gracias a su precisión y facilidad de aplicación según el contexto de estudio.

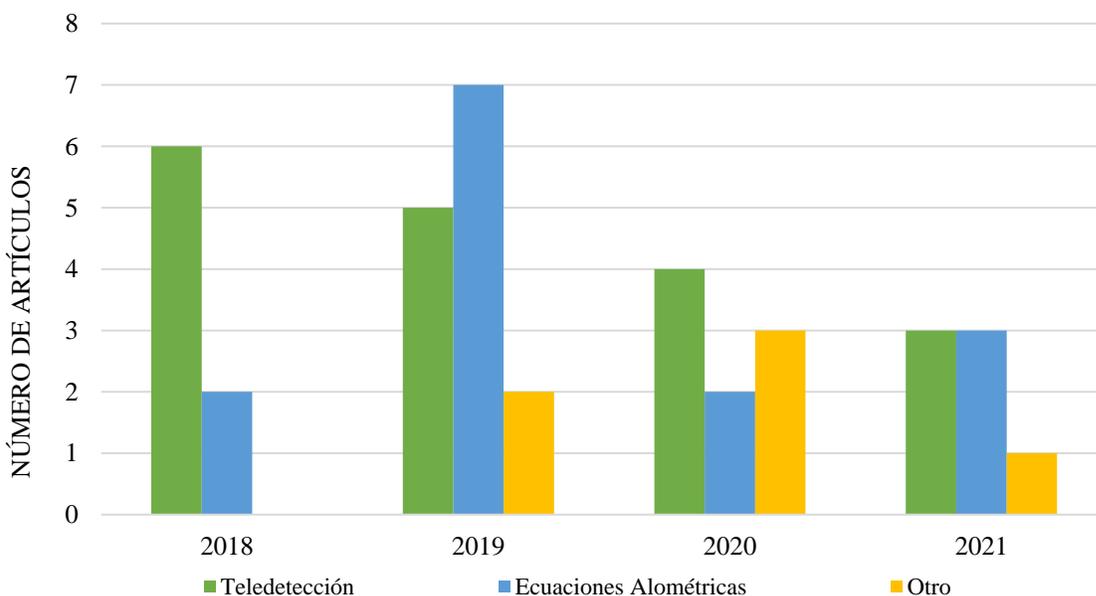


Figura 11. Técnicas de estimación de biomasa aérea

La Figura 12 revela que los años 2019 y 2020 fueron destacados por el mayor número de publicaciones científicas relacionadas con estimaciones de biomasa en el área forestal, mostrando una disminución gradual a partir del 2021. En marcado contraste, se observa un crecimiento significativo en la cantidad de escritos aplicados al contexto urbano, superando incluso al área forestal en los años 2019 y 2021. Cabe mencionar que el área urbana abarca los límites periurbanos, mientras que el área forestal puede incluir zonas protegidas.

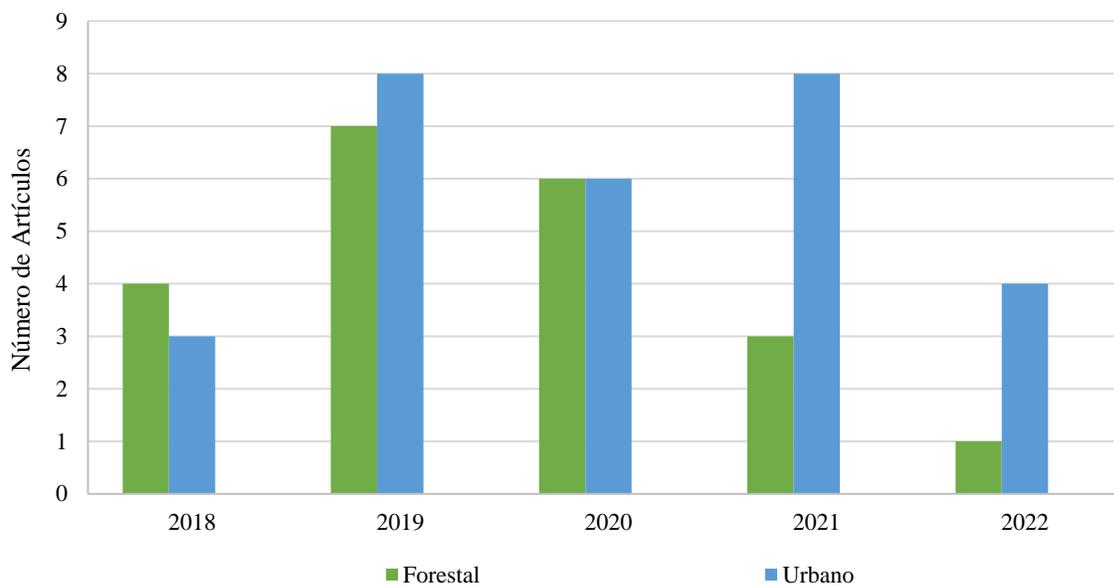


Figura 12. Área de estudio: forestal y urbano

En relación a las zonas de vida analizadas en la Figura 13, se procedió a simplificarlas según las especificaciones geográficas y climáticas proporcionadas por los autores. Como resultado, se optó por agruparlas en tres categorías: tropicales, húmedas y secas. Donde se puede observar que la zona tropical ha sido la más estudiada y cuenta con un mayor número de publicaciones durante los años 2018 a 2021. Se destacó especialmente en el año 2019 publicaciones que abarcaron investigaciones en las tres zonas de vida mencionadas, lo que resalta la relevancia de dicho periodo en el estudio de la estimación de biomasa en diferentes entornos naturales. Por otro lado, las zonas húmedas y secas también han sido objeto de investigación, con publicaciones registradas en los años 2018 y 2019 para las zonas húmedas, y en 2019 y 2021 para las zonas secas. Es importante mencionar que en el año 2022 no se encontraron publicaciones que especificaran el tipo de zona de vida en la que se aplicó el estudio.

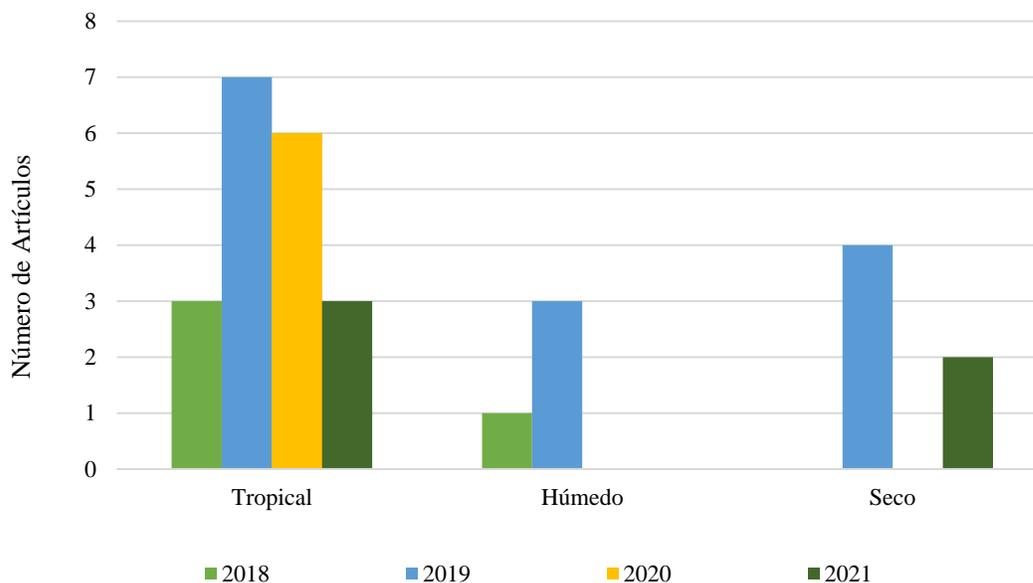


Figura 13. Zonas de vida

4.2 Estimación del secuestro de carbono de las especies arbóreas y palmas

4.2.1 *Inventario de flora*

En el estudio realizado, se llevó a cabo un inventario donde se identificaron los árboles, palmas, pinos y algunas especies arbustivas que se encuentran en el campus de la UFPS sede Cúcuta, en el inventario se incluyeron datos taxonómicos (familia, nombre común y nombre científico) y dasométricos (DAP y altura total), como se observa en la Figura 14. En las imágenes A, C y D se evidencia la toma del DAP en el Mango, Camajón y Palma real respectivamente, usando la cinta diamétrica. En la imagen B se tomó punto GPS y registro en la planilla, para las imágenes D y E se visualiza la toma de altura total usando la brújula lensática,



Figura 14. Mediciones dasométricas

Se identificó un total de 65 especies distribuidas en 26 familias botánicas, como se muestra en la Tabla 9. La identificación de especies por familia proporciona una visión estructurada de la biodiversidad en el campus, facilitando análisis posteriores y la evaluación de su contribución a la ecología del entorno (como se observa [Anexo 5](#)).

Tabla 9. Identificación de especies por familia

Nombre común	Nombre científico	Familia
Mango	<i>Mangifera indica</i> L.	Anacardiaceae
Marañón	<i>Anacardium occidentale</i> L.	
Guanábana	<i>Annona muricata</i> L.	Annonaceae
Azuceno blanco	<i>Plumeria alba</i> L.	Apocynaceae
Cobalongo	<i>Thevetia peruviana</i> (Pers.) K. Schum.	
Pino araucaria	<i>Araucaria heterophylla</i> (Salisb.) Franco	Araucariaceae
Palma abanico	<i>Washingtonia robusta</i> H. Wendl.	
Palma africana	<i>Elaeis guineensis</i> Jacq.	
Palma areca	<i>Dypsis lutescens</i> (H. Wendl.) Beentje & J. Dransf.	
Palma Bismarck plateada	<i>Bismarck nobilis</i> Hildebrandt & H. Wendl.	Arecaceae
Palma cola de zorro	<i>Wodyetia bifurcata</i> A. K. Irvine	
Palma corozo	<i>Bactris guineensis</i> (L.) H.E. Moore	
Palma paraíso	<i>Veitchia merilli</i> (Becc.) H.E. Moore	
Palma real	<i>Roystonea regia</i> (Kunth) O.F. Cook	
Árbol de la felicidad	<i>Dracaena fragrans</i> (L.) Ker Gawl.	
Palma cola de caballo	<i>Beaucarnea recurvata</i> (K. Koch & Fintelm.) Lem.	Asparagaceae
Palma yucca	<i>Yucca aloifolia</i> L.	
Cañahuate	<i>Tabebuia chrysantha</i> G. Nicholson	
Gualanday	<i>Jacaranda mimosifolia</i> D. Don	
Totumo	<i>Crescentia cujete</i> L.	Bignoniaceae
Tulipán africano	<i>Spathodea campanulata</i> P. Beauv.	
Urapo	<i>Tabebuia rosea</i> (Bertol.) A. DC.	
Coralito	<i>Cordia sebestana</i> Linneo	Boraginaceae
Oithi	<i>Licania tomentosa</i> (Benth.) Fritsch	Chrysobalanceae
Almendron	<i>Terminalia catappa</i> L.	Combretaceae
Pino ciprés	<i>Cupressus sempervirens</i> L.	Cupressaceae
Pino libro	<i>Platycladus orientalis</i> (L.) Franco	
Palma Cyca	<i>Cycas revoluta</i> Thunb.	Cycadaceae
Palmiche	<i>Carludovica palmata</i> Ruiz & Pav.	Cyclanthaceae
Acacia amarilla	<i>Senna siamea</i> (Lam.) H.S. Irwin & Barneby	
Acacia blanca	<i>Leucaena leucocephala</i> (Lam.) de Wit	
Chaperno	<i>Lonchocarpus sericeus</i> (Poir.) Kunth ex DC.	
Chiminango	<i>Pithecellobium dulce</i> (Roxb.) Benth.	
Cují negro	<i>Prosopis julliflora</i> (Sw.) De Candolle	Fabaceae
Jero	<i>Acacia polyphylla</i> DC.	
Lluvia de oro	<i>Cassia fistula</i> Dwyer, J. D.	
Matarratón	<i>Gliricidia sepium</i> (Jacq.) Kunth ex Walp.	
Samán	<i>Samanea samán</i> (Jacq.) Merr.	

Nombre común	Nombre científico	Familia
Tamarindo	<i>Tamarindus indica</i> L.	
Aguacate	<i>Persea americana</i> Mill.	Lauraceae
Camajón	<i>Sterculia apetala</i> (Jacq.) H. Karst.	
Ceiba	<i>Ceiba pentandra</i> (L.) Gaertn.	Malvaceae
Guácimo	<i>Guazuma ulmifolia</i> Lam.	
Árbol nim	<i>Azadirachta indica</i> A. Juss.	
Árbol paraíso	<i>Melia azedarach</i> L.	Meliaceae
Cedro caoba	<i>Cedrela odorata</i> Breteler, F. J.	
Caucho	<i>Ficus elastica</i> Roxb.	
Ficus	<i>Ficus benjamina</i> L.	
Matapalos	<i>Ficus pallida</i> Vahl	Moraceae
Moral	<i>Maclura tinctoria</i> (L.) D. Don ex Steud.	
Moringa	<i>Moringa oleifera</i> Lam.	Moringaceae
Plátano	<i>Musa x paradisiaca</i> L.	Musaceae
Grosello	<i>Phyllanthus acidus</i> (L.) Skeels	Phyllanthaceae
Noni	<i>Morinda citrifolia</i> L.	Rubiaceae
Limón	<i>Citrus limón</i> (L.) Burm. f.	
Limon Swinglea	<i>Swinglea glutinosa</i> Merr.	
Mandarina	<i>Citrus reticulata</i> Blanco	
Mirto	<i>Murraya paniculata</i> (L.) Jack	Rutaceae
Naranja	<i>Citrus sinensis</i> (L.) Osbeck	
Naranja agria	<i>Citrus aurantium</i> L.	
Jaboncillo	<i>Sapindus saponaria</i> L.	
Mamón	<i>Melicoccus bijugatus</i> Jacq.	Sapindaceae
Seso vegetal	<i>Blighia sapida</i> K.D. Koenig	
Níspero	<i>Manilkara zapota</i> (L.) P. Royen	Sapotaceae
Guayacán Carrapo	<i>Bulnesia carrapo</i> Killip & Dugand	Zygophyllaceae

La Figura 15 proporciona una representación visual de la distribución de especies arbóreas organizadas según sus respectivas familias botánicas. Algunas familias, como Fabaceae y Arecaceae, sobresalen por la cantidad de especies que pertenecen a cada una de ellas, es decir, 10 y 8 especies, en el mismo orden mencionado. En contraste, familias como Cyclanthaceae o Boraginaceae muestran una representación más limitada, con solo una especie cada una, lo que indica su menor abundancia en el campus. Esta información sobre la biodiversidad de familias es esencial para comprender la ecología del campus y puede servir como base para futuros análisis y estudios de las funciones ecosistémicas y relaciones biológicas en este entorno.

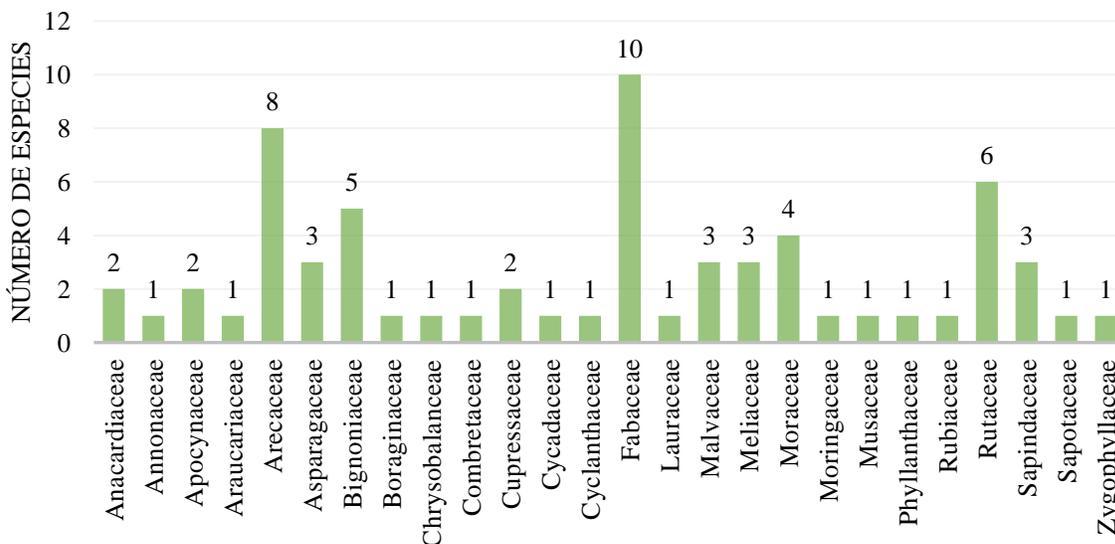


Figura 15. Distribución de especies por familia

La Tabla 10 proporciona información detallada sobre la abundancia de cada especie arbórea en el campus de la Universidad Francisco de Paula Santander - Cúcuta. A partir de esta tabla, se puede observar que algunas especies son más abundantes que otras, lo que sugiere una variabilidad significativa en la densidad de individuos dentro del campus. Además, se puede notar que hay una especie, "Oithi (*Licania tomentosa*)", que se destaca por su alta abundancia con un total de 282 individuos, lo que la convierte en la especie dominante en el campus. Por otro lado, varias especies, como "Caucho (*Ficus elástica*)", "Marañón (*Anacardium occidentale*)", "Guanábana (*Annona muricata*)", y "Naranja (*Citrus sinensis*)", tienen solo un individuo cada una, lo que indica su presencia más limitada en el área estudiada.

Tabla 10. Especies identificadas en la UFPS, Cúcuta

Nombre común	Nombre científico	Individuos
Acacia amarilla	<i>Senna siamea</i> (Lam.) H.S. Irwin & Barneby	4
Acacia blanca	<i>Leucaena leucocephala</i> (Lam.) de Wit	3
Aguacate	<i>Persea americana</i> Mill.	2

Nombre común	Nombre científico	Individuos
Almendron	<i>Terminalia catappa</i> L.	1
Árbol de la felicidad	<i>Dracaena fragrans</i> (L.) Ker Gawl.	26
Árbol nim	<i>Azadirachta indica</i> A. Juss.	115
Árbol paraíso	<i>Melia azedarach</i> L.	2
Azuceno blanco	<i>Plumeria alba</i> L.	39
Camajón	<i>Sterculia apetala</i> (Jacq.) H. Karst.	24
Cañahuate	<i>Tabebuia chrysantha</i> G. Nicholson	1
Caucho	<i>Ficus elastica</i> Roxb.	1
Cedro caoba	<i>Cedrela odorata</i> Breteler, F. J.	13
Ceiba	<i>Ceiba pentandra</i> (L.) Gaertn.	1
Chaperno	<i>Lonchocarpus sericeus</i> (Poir.) Kunth ex DC.	1
Chiminango	<i>Pithecellobium dulce</i> (Roxb.) Benth.	38
Cobalongo	<i>Thevetia peruviana</i> (Pers.) K. Schum.	3
Coralito	<i>Cordia sebestana</i> Linneo	20
Cují negro	<i>Prosopis julliflora</i> (Sw.) De Candolle	3
Ficus	<i>Ficus benjamina</i> L.	32
Grosello	<i>Phyllanthus acidus</i> (L.) Skeels	1
Guácimo	<i>Guazuma ulmifolia</i> Lam.	16
Gualanday	<i>Jacaranda mimosifolia</i> D. Don	1
Guanábana	<i>Annona muricata</i> L.	4
Guayacán Carrapo	<i>Bulnesia carrapo</i> Killip & Dugand	3
Jaboncillo	<i>Sapindus saponaria</i> L.	1
Jero	<i>Acacia polyphylla</i> DC.	113
Limón	<i>Citrus limón</i> (L.) Burm. f.	6
Limon Swinglea	<i>Swinglea glutinosa</i> Merr.	2
Lluvia de oro	<i>Cassia fistula</i> Dwyer, J. D.	2
Mamón	<i>Melicoccus bijugatus</i> Jacq.	17
Mandarina	<i>Citrus reticulata</i> Blanco	1
Mango	<i>Mangifera indica</i> L.	33
Marañón	<i>Anacardium occidentale</i> L.	1
Matapalos	<i>Ficus pallida</i> Vahl	1
Matarratón	<i>Gliricidia sepium</i> (Jacq.) Kunth ex Walp.	3
Mirto	<i>Murraya paniculata</i> (L.) Jack	7
Moral	<i>Maclura tinctoria</i> (L.) D. Don ex Steud.	13
Moringa	<i>Moringa oleifera</i> Lam.	9
Naranja	<i>Citrus sinensis</i> (L.) Osbeck	1
Naranja agria	<i>Citrus aurantium</i> L.	1
Níspero	<i>Manilkara zapota</i> (L.) P. Royen	5
Noni	<i>Morinda citrifolia</i> L.	1
Oithi	<i>Licania tomentosa</i> (Benth.) Fritsch	282
Palma abanico	<i>Washingtonia robusta</i> H. Wendl.	13
Palma africana	<i>Elaeis guineensis</i> Jacq.	1

Nombre común	Nombre científico	Individuos
Palma areca	<i>Dypsis lutescens</i> (H. Wendl.) Beentje & J.Dransf.	37
Palma Bismarck plateada	<i>Bismarck nobilis</i> Hildebrandt & H.Wendl. <i>Beaucarnea recurvata</i> (K. Koch & Fintelm.) Lem.	2
Palma cola de caballo	<i>Lem.</i>	1
Palma cola de zorro	<i>Wodyetia bifurcata</i> A. K. Irvine	1
Palma corozo	<i>Bactris guineensis</i> (L.) H.E. Moore	1
Palma Cyca	<i>Cycas revoluta</i> Thunb.	2
Palma paraíso	<i>Veitchia merilli</i> (Becc.) H.E. Moore	46
Palma real	<i>Roystonea regia</i> (Kunth) O.F. Cook	76
Palma yucca	<i>Yucca aloifolia</i> L.	12
Palmiche	<i>Carludovica palmata</i> Ruiz & Pav.	1
Pino araucaria	<i>Araucaria heterophylla</i> (Salisb.) Franco	4
Pino ciprés	<i>Cupressus sempervirens</i> L.	1
Pino libro	<i>Platycladus orientalis</i> (L.) Franco	12
Plátano	<i>Musa x paradisiaca</i> L.	3
Samán	<i>Samanea samán</i> (Jacq.) Merr.	26
Seso vegetal	<i>Blighia sapida</i> K.D. Koenig	1
Tamarindo	<i>Tamarindus indica</i> L.	5
Totumo	<i>Crescentia cujete</i> L.	7
Tulipán africano	<i>Spathodea campanulata</i> P. Beauv.	40
Urapo	<i>Tabebuia rosea</i> (Bertol.) A. DC.	84
Total de individuos		1229

La Figura 16 ofrece una representación visual de cómo se distribuyen las especies arbóreas en el campus de la universidad. En este gráfico, cada barra corresponde a una especie y su altura representa el número de individuos. Al observar el gráfico, se pueden identificar diferencias significativas en la abundancia de las especies, dado a que, algunas especies tanto de árboles como palmas se destacan por tener una mayor abundancia, como es el caso del Oithi, árbol nim, jero, palma real y palma paraíso. Mientras que otras especies presentan un número de individuos limitado, como el caucho, noni, naranja agria, jaboncillo. Lo anterior indica que, no hay una distribución uniforme entre las especies identificadas en la universidad.

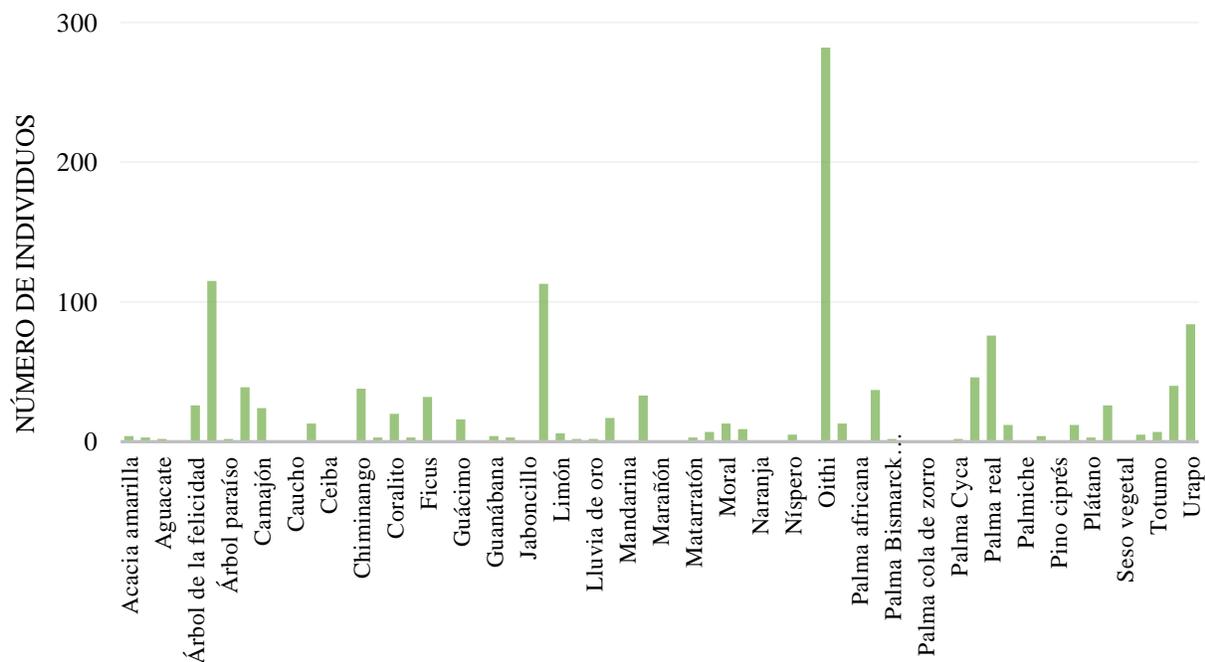


Figura 16. Especies identificadas en la UFPS, Cúcuta

En la Tabla 11, se identifican las especies de la UFPS y su origen, ya sean nativas (propias de la zona) o introducidas (tienen su origen en otras regiones). Se encontró que en el campus universitario hay mayor cantidad de especies introducidas que nativas, teniendo valores de 41 y 24 en el mismo orden mencionado. Cabe señalar que la totalidad de especies de pinos son introducidos, además, las palmas también son introducidas, exceptuando a la palma corozo que es nativa de la región. Teniendo en cuenta las especies reconocidas anteriormente como más abundantes, se resalta que el Jero es nativo mientras que el Oithi, Árbol nim y, las Palmas real y paraíso, son especies introducidas, lo que sugiere que no solo la mayor cantidad de especies presentes en la universidad son introducidas, sino que también la mayor cantidad de árboles y palmas lo son. Por lo anterior, se destaca la importancia de considerar la conservación de las especies autóctonas y ahondar sobre la dinámica de las especies introducidas en el ecosistema urbano.

Tabla 11. Origen de las especies de la UFPS, Cúcuta

Nombre común	Nombre científico	Origen
Acacia amarilla	<i>Senna siamea</i> (Lam.) H.S. Irwin & Barneby	Introducida
Acacia blanca	<i>Leucaena leucocephala</i> (Lam.) de Wit	Introducida
Aguacate	<i>Persea americana</i> Mill.	Introducida
Almendron	<i>Terminalia catappa</i> L.	Introducida
Árbol de la felicidad	<i>Dracaena fragrans</i> (L.) Ker Gawl.	Introducida
Árbol nim	<i>Azadirachta indica</i> A. Juss.	Introducida
Árbol paraíso	<i>Melia azedarach</i> L.	Introducida
Azuceno blanco	<i>Plumeria alba</i> L.	Introducida
Camajón	<i>Sterculia apetala</i> (Jacq.) H. Karst.	Nativa
Cañahuat	<i>Tabebuia chrysantha</i> G. Nicholson	Nativa
Caucho	<i>Ficus elastica</i> Roxb.	Introducida
Cedro caoba	<i>Cedrela odorata</i> Breteler, F. J.	Nativa
Ceiba	<i>Ceiba pentandra</i> (L.) Gaertn.	Nativa
Chaperno	<i>Lonchocarpus sericeus</i> (Poir.) Kunth ex DC.	Nativa
Chiminango	<i>Pithecellobium dulce</i> (Roxb.) Benth.	Nativa
Cobalongo	<i>Thevetia peruviana</i> (Pers.) K. Schum.	Introducida
Coralito	<i>Cordia sebestana</i> Linneo	Nativa
Cují negro	<i>Prosopis julliflora</i> (Sw.) De Candolle	Nativa
Ficus	<i>Ficus benjamina</i> L.	Introducida
Grosello	<i>Phyllanthus acidus</i> (L.) Skeels	Introducida
Guácimo	<i>Guazuma ulmifolia</i> Lam.	Nativa
Gualanday	<i>Jacaranda mimosifolia</i> D. Don	Introducida
Guanábana	<i>Annona muricata</i> L.	Nativa
Guayacán Carrapo	<i>Bulnesia carrapo</i> Killip & Dugand	Nativa
Jaboncillo	<i>Sapindus saponaria</i> L.	Nativa
Jero	<i>Acacia polyphylla</i> DC.	Nativa
Limón	<i>Citrus limón</i> (L.) Burm. f.	Introducida
Limon Swinglea	<i>Swinglea glutinosa</i> Merr.	Introducida
Lluvia de oro	<i>Cassia fistula</i> Dwyer, J. D.	Introducida
Mamón	<i>Melicoccus bijugatus</i> Jacq.	Nativa
Mandarina	<i>Citrus reticulata</i> Blanco	Introducida
Mango	<i>Mangifera indica</i> L.	Introducida
Marañón	<i>Anacardium occidentale</i> L.	Introducida
Matapalos	<i>Ficus pallida</i> Vahl	Nativa
Matarratón	<i>Gliricidia sepium</i> (Jacq.) Kunth ex Walp.	Nativa
Mirto	<i>Murraya paniculata</i> (L.) Jack	Introducida
Moral	<i>Maclura tinctoria</i> (L.) D. Don ex Steud.	Nativa
Moringa	<i>Moringa oleifera</i> Lam.	Introducida
Naranja	<i>Citrus sinensis</i> (L.) Osbeck	Introducida
Naranja agria	<i>Citrus aurantium</i> L.	Introducida
Níspero	<i>Manilkara zapota</i> (L.) P. Royen	Nativa

Nombre común	Nombre científico	Origen
Noni	<i>Morinda citrifolia</i> L.	Nativa
Oithi	<i>Licania tomentosa</i> (Benth.) Fritsch	Introducida
Palma abanico	<i>Washingtonia robusta</i> H. Wendl.	Introducida
Palma africana	<i>Elaeis guineensis</i> Jacq.	Introducida
Palma areca	<i>Dypsis lutescens</i> (H. Wendl.) Beentje & J.Dransf.	Introducida
Palma Bismarck plateada	<i>Bismarck nobilis</i> Hildebrandt & H.Wendl. <i>Beaucarnea recurvata</i> (K. Koch & Fintelm.) Lem.	Introducida
Palma cola de caballo	<i>Lem.</i>	Introducida
Palma cola de zorro	<i>Wodyetia bifurcata</i> A. K. Irvine	Introducida
Palma corozo	<i>Bactris guineensis</i> (L.) H.E. Moore	Nativa
Palma Cyca	<i>Cycas revoluta</i> Thunb.	Introducida
Palma paraíso	<i>Veitchia merilli</i> (Becc.) H.E. Moore	Introducida
Palma real	<i>Roystonea regia</i> (Kunth) O.F. Cook	Introducida
Palma yucca	<i>Yucca aloifolia</i> L.	Introducida
Palmiche	<i>Carludovica palmata</i> Ruiz & Pav.	Nativa
Pino araucaria	<i>Araucaria heterophylla</i> (Salisb.) Franco	Introducida
Pino ciprés	<i>Cupressus sempervirens</i> L.	Introducida
Pino libro	<i>Platyclusus orientalis</i> (L.) Franco	Introducida
Plátano	<i>Musa x paradisiaca</i> L.	Introducida
Samán	<i>Samanea samán</i> (Jacq.) Merr.	Nativa
Seso vegetal	<i>Blighia sapida</i> K.D. Koenig	Introducida
Tamarindo	<i>Tamarindus indica</i> L.	Introducida
Totumo	<i>Crescentia cujete</i> L.	Nativa
Tulipán africano	<i>Spathodea campanulata</i> P. Beauv.	Introducida
Urapo	<i>Tabebuia rosea</i> (Bertol.) A. DC.	Nativa

4.2.2 Correlación DAP - Altura total

De los 1229 árboles censados, 1169 corresponden a árboles y palmas, los 50 restantes se dividen en pinos y especies arbustivas. Para garantizar la precisión de los datos objeto del análisis de correlación, se organizó la información de manera que se considerara cada DAP de especies multitallos como individuos separados. En consecuencia, se analizaron un total de 1899 pares de datos de DAP y altura total, como se muestra en el [Anexo 6](#).

En la Figura 17 se puede observar que existe una relación lineal positiva entre el DAP y la altura total de los árboles, con presencia de valores atípicos que se encuentran por fuera del margen de error estándar (e) de la regresión lineal, donde $e = 3,30$, el rango de error estándar está representado por las funciones $\hat{Y}+e$ y $\hat{Y}-e$, donde \hat{Y} es la función de la regresión lineal, además, el análisis de la correlación de Pearson fue significativa con un coeficiente r de 0.728, indicando una relación fuerte entre estas dos variables. Sin embargo, es importante destacar que la distribución de la prueba *t-Student* para esta correlación no fue normal, con un valor de 46.204, es decir, las variables no responden a una distribución normal, lo que sugiere que existen otros factores o variables que están afectando esta relación de manera no convencional.

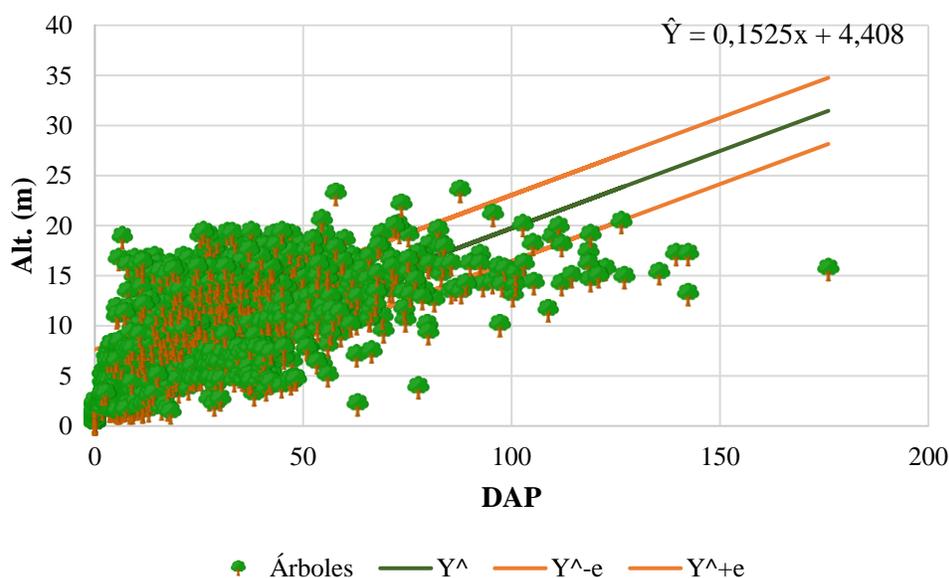


Figura 17. Relación DAP-Altura total de los árboles de la UFPS

Además, se realizó un análisis de correlaciones por especie para aquellas especies que tenían 10 o más individuos registrados. Se analizaron un total de 23 especies, donde los resultados de las correlaciones variaron ampliamente entre las especies, lo que resalta la complejidad de la

relación entre el DAP y la Altura Total en diferentes tipos de árboles. A continuación, se presenta una tabla que resume las correlaciones por especie, incluyendo el coeficiente de correlación (r), los valores de la prueba *t-Student* y sus interpretaciones:

Tabla 12. Análisis de correlación r y prueba t por especies

Especie	Individuos	r	Interpretación r	Prueba t Student	Interpretación t	Error estándar
Guácimo	18	-0,047	Muy baja	-0,19	Distribución no normal	4,36
Mirto	25	0,031	Muy baja	0,15	Distribución no normal	0,20
Chiminango	75	0,067	Muy baja	0,65	Distribución no normal	3,47
Camajón	26	0,123	Muy baja	0,61	Distribución no normal	1,85
Azuceno blanco	231	0,19	Muy baja	2,92	Distribución no normal	0,89
Coralito	40	0,201	Baja	1,27	Distribución no normal	0,40
Nim	137	0,272	Baja	3,28	Distribución no normal	2,93
Palma yucca	22	0,341	Baja	1,62	Distribución no normal	0,77
Palma areca	149	0,456	Moderada	6,21	Distribución no normal	1,62
Urapo	87	0,52	Moderada	5,62	Distribución no normal	3,27
Samán	28	0,512	Moderada	3,04	Distribución no normal	3,04
Oithi	397	0,528	Moderada	12,36	Distribución no normal	2,82
Palma paraíso	46	0,538	Moderada	4,24	Distribución no normal	2,01
Totumo	14	0,598	Moderada	2,59	Distribución no normal	1,47
Jero	143	0,605	Alta	9,22	Distribución no normal	3,92
Ficus	112	0,628	Alta	8,46	Distribución no normal	1,81
Mango	46	0,643	Alta	5,57	Distribución no normal	2,50
Palma abanico	13	0,749	Alta	3,75	Distribución no normal	3,24
Mamón	21	0,704	Alta	4,32	Distribución no normal	2,97
Cedro caoba	13	0,71	Alta	3,35	Distribución no normal	1,47
Moral	18	0,78	Alta	4,99	Distribución no normal	2,20
Tulipán africano	61	0,793	Alta	10,00	Distribución no normal	11,30
Palma real	75	0,942	Muy alta	24,83	Distribución no normal	2,29

En la Tabla 12 se puede observar que el guácimo fue la única especie con coeficiente de correlación negativo, es decir, que la relación entre el DAP y la altura total es inversamente proporcional. Además, el Guácimo, Mirto, Chiminango, Camajón y Azuceno blanco presentan un grado de correlación muy bajo; seguido por el coralito, árbol nim y palma yucca que cuentan con una correlación baja; luego la Palma areca, Urapo, Samán, Oithi, Palma paraíso y Totumo

con correlación moderada; después el Jero, Ficus, Mango, Palma Abanico, Mamón, Cedro Caoba, Moral y Tulipán africano con una fuerza de correlación alta y por último la palma real es la única con una correlación muy alta, casi perfecta. Por otro lado, la prueba *t Student* señala que las variables no responden una distribución normal, como se mencionó anteriormente, esto sugiere que existen otros factores que afectan la relación de las variables. También se observó que los errores estándar de las regresiones lineales varían entre 0,20 hasta 11,30, cabe señalar que estos valores no están relacionados con la cantidad de árboles por especie. La variabilidad de los coeficientes r sumado a la distribución no normal destaca la complejidad del estudio del crecimiento de los árboles de la universidad.

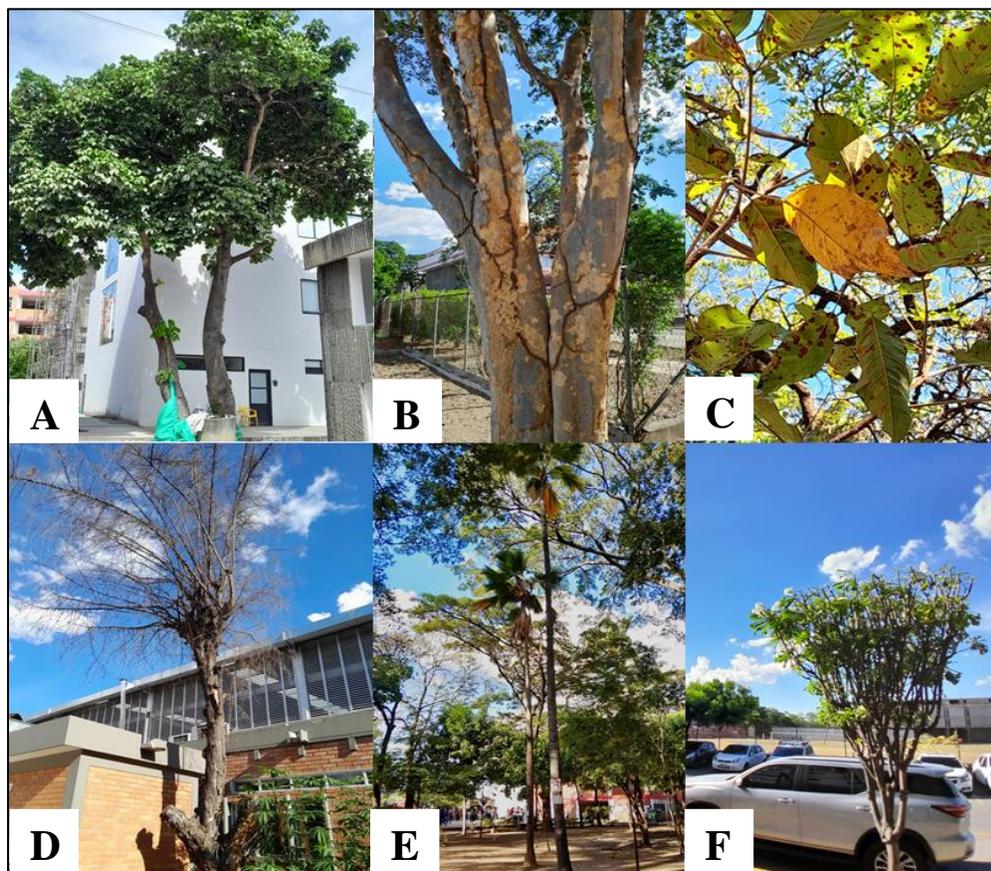


Figura 18. Factores que inciden en el crecimiento de los árboles

En la Figura 18 se pueden observar algunos de los factores que influyen en el crecimiento de los árboles, la imagen A y E muestran la supresión de árboles por el alto nivel de competencia, además en la imagen E es evidente el proceso de etiolación que sufrieron dos palmas abanico por la ausencia de luz. En la imagen B se observa un árbol con plagas, la imagen C muestra el cambio en la coloración de las hojas por clorosis, la D enseña un árbol muerto en pie, y la imagen F muestra un árbol con poda. Cabe señalar que, otra variable que afecta la relación entre el DAP y la altura de los árboles es el apareamiento de datos, es decir, el DAP de los árboles multitallos deben emparejarse con la altura de cada uno de estos tallos y no con la altura total del árbol.

4.2.3 Densidad de la Madera

En la Figura 19 se evidencia la toma y procesamiento de las muestras de madera obtenidas de los árboles en el campus universitario. En las imágenes A, B, D y E se observa el uso del barrenador del Pressler en la extracción del tarugo de madera para cada especie, seguido de la aplicación del cicatrizante fungicida como se ve en la imagen C. En cuanto a las imágenes F, G, H e I se visualiza el proceso de pesaje de la madera verde y seca.

Se tomaron muestras de madera de 52 individuos arbóreos, representando 35 especies de árboles, para calcular la densidad de la madera de cada especie, los árboles con maderas más densas son el Samán, Matarratón, Tamarindo y Limón swinglea, ya que presentaron valores en g/cm^3 de 0.881, 0.775, 0.749 y 0.732, respectivamente (véase [Anexo 7](#)). Entre los árboles menos densos encontramos la Moringa (0.254 g/cm^3), Ceiba (0.262 g/cm^3) y Caucho (0.347 g/cm^3). Sin embargo, aunque un individuo de samán obtuvo la densidad más alta, otros individuos

muestreados tuvieron valores de 0.570 g/cm^3 y 0.446 g/cm^3 los cuales tienden a ser valores bajos, lo que sugiere que hay una gran variación en la densidad de la madera según el individuo muestreado, es decir, se evidencia la variabilidad intraespecífica, tal como se muestra en la Tabla



Figura 19. Toma y análisis de muestras de madera

Tabla 13. Densidad de madera de los árboles

Nombre Común	Nombre científico	M seca (g)	V (cm ³)	ρ (g/cm ³)
Acacia amarilla	<i>Senna siamea</i> (Lam.) H.S. Irwin & Barneby	1,581	2,458	0,643
Acacia blanca	<i>Leucaena leucocephala</i> (Lam.) de Wit	0,933	2,073	0,45
Almendrón	<i>Terminalia catappa</i> L.	1,037	1,687	0,615
Árbol nim	<i>Azadirachta indica</i> A. Juss.	1,797	2,770	0,649
Árbol nim	<i>Azadirachta indica</i> A. Juss.	1,104	2,021	0,546
Árbol paraíso	<i>Melia azedarach</i> L.	0,717	1,639	0,438
Azuceno blanco	<i>Plumeria alba</i> L.	1,325	1,893	0,700
Camajón	<i>Sterculia apetala</i> (Jacq.) H. Karst.	1,387	3,833	0,362
Camajón	<i>Sterculia apetala</i> (Jacq.) H. Karst.	1,762	4,270	0,413
Cañahuate	<i>Tabebuia chrysantha</i> G. Nicholson	1,544	2,250	0,686
Caucho	<i>Ficus elastica</i> Roxb.	1,664	4,791	0,347
Cedro Caoba	<i>Cedrela odorata</i> Breteler, F. J.	1,817	4,041	0,450
Ceiba	<i>Ceiba pentandra</i> (L.) Gaertn.	1,335	5,104	0,262
	<i>Lonchocarpus sericeus</i> (Poir.) Kunth ex DC.	1,786	2,552	0,700
Chaperno	DC.	1,786	2,552	0,700
Chiminango	<i>Pithecellobium dulce</i> (Roxb.) Benth.	1,167	1,823	0,640
Coralito	<i>Cordia sebestana</i> Linneo	0,547	1,094	0,500
Cují negro	<i>Prosopis julliflora</i> (Sw.) De Candolle	1,535	2,187	0,702
Ficus	<i>Ficus benjamina</i> L.	2,524	5,937	0,425
Ficus	<i>Ficus benjamina</i> L.	0,792	2,187	0,362
Grosello	<i>Phyllanthus acidus</i> (L.) Skeels	1,063	1,625	0,654
Guácimo	<i>Guazuma ulmifolia</i> Lam.	1,726	3,312	0,521
Guácimo	<i>Guazuma ulmifolia</i> Lam.	2,292	4,166	0,550
Guayacán carrapo	<i>Bulnesia carrapo</i> Killip & Dugand	2,559	4,479	0,571
Jaboncillo	<i>Sapindus saponaria</i> L.	2,732	4,249	0,643
Jero	<i>Acacia polyphylla</i> DC.	3,17	5,208	0,609
Jero	<i>Acacia polyphylla</i> DC.	3,19	5,437	0,587
Limón	<i>Citrus limón</i> (L.) Burm. f.	0,745	1,146	0,650
Limón				
Swinglea	<i>Swinglea glutinosa</i> Merr.	1,067	1,458	0,732
Lluvia de oro	<i>Cassia fistula</i> Dwyer, J. D.	1,224	1,833	0,668
Mamón	<i>Melicoccus bijugatus</i> Jacq.	1,303	1,979	0,658
Mango	<i>Mangifera indica</i> L.	2,987	5,208	0,574
Mango	<i>Mangifera indica</i> L.	1,524	3,020	0,505
Marañón	<i>Anacardium occidentale</i> L.	0,919	2,062	0,446
Matarratón	<i>Gliricidia sepium</i> (Jacq.) Kunth ex Walp.	1,695	2,187	0,775
Moral	<i>Maclura tinctoria</i> (L.) D. Don ex Steud.	1,193	1,833	0,651
Moringa	<i>Moringa oleifera</i> Lam.	0,318	1,250	0,254
Samán	<i>Samanea samán</i> (Jacq.) Merr.	2,28	4,000	0,570

Nombre Común	Nombre científico	M seca (g)	V (cm³)	ρ (g/cm³)
Naranja	<i>Citrus sinensis (L.) Osbeck</i>	1,59	2,604	0,611
Naranja agria	<i>Citrus aurantium L.</i>	1,054	1,479	0,713
Níspero	<i>Manilkara zapota (L.) P. Royen</i>	1,62	2,291	0,707
Noni	<i>Morinda citrifolia L.</i>	0,808	1,771	0,456
Ohiti	<i>Licania tomentosa (Benth.) Fritsch</i>	0,854	1,354	0,631
Ohiti	<i>Licania tomentosa (Benth.) Fritsch</i>	2,026	3,083	0,657
Samán	<i>Samanea samán (Jacq.) Merr.</i>	4,553	5,166	0,881
Samán	<i>Samanea samán (Jacq.) Merr.</i>	2,092	4,687	0,446
Seso Vegetal	<i>Blighia sapida K.D. Koenig</i>	1,172	2,354	0,498
Tamarindo	<i>Tamarindus indica L.</i>	2,34	3,125	0,749
Totumo	<i>Crescentia cujete L.</i>	1,632	3,479	0,469
Tulipán africano	<i>Spathodea campanulata P. Beauv.</i>	1,708	3,437	0,497
Urapo	<i>Tabebuia rosea (Bertol.) A. DC.</i>	0,616	1,250	0,493
Urapo	<i>Tabebuia rosea (Bertol.) A. DC.</i>	1,469	3,208	0,458
Urapo	<i>Tabebuia rosea (Bertol.) A. DC.</i>	1,657	3,208	0,517

Esta variación intraespecífica es relevante desde una perspectiva de manejo forestal y conservación, ya que sugiere que, incluso dentro de una misma especie, pueden existir diferencias notables en las propiedades de la madera, como es el caso de las diferencias de densidades como se muestra en la Figura 20. Además, resalta la importancia de considerar la variabilidad intraespecífica al evaluar el potencial de estas especies arbóreas para el secuestro de carbono, producción de oxígeno y otros aspectos ecológicos relacionados con los árboles en el campus. Lo anterior, resalta la complejidad de los ecosistemas arbóreos y subraya la importancia de considerar esta variabilidad en futuros estudios y prácticas de manejo forestal.

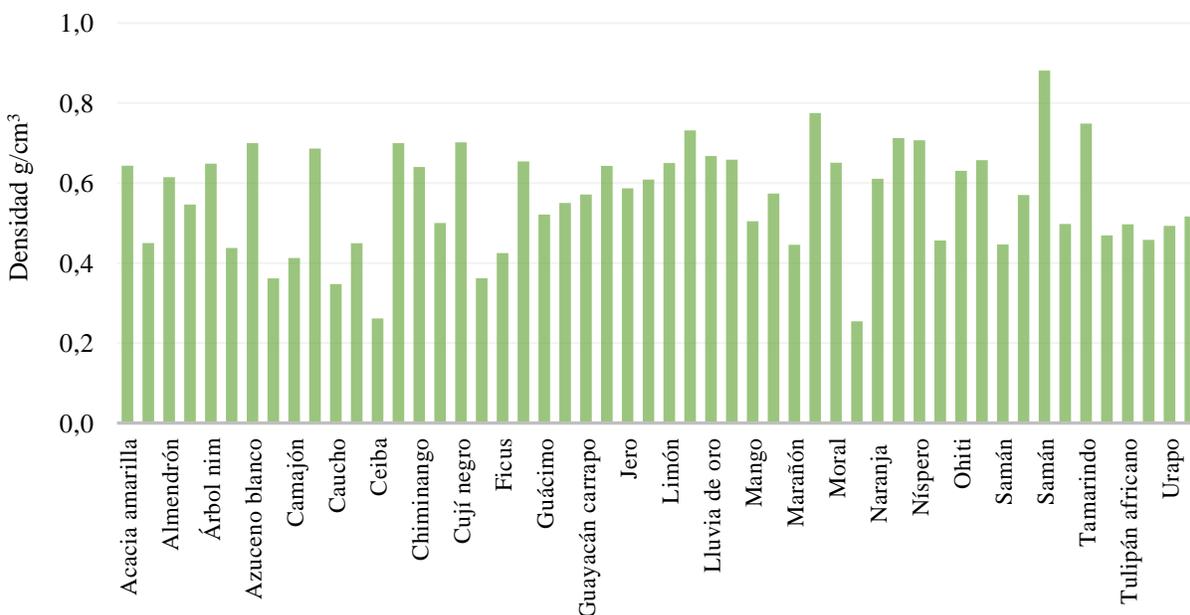


Figura 20. Variación de la densidad de madera

Para evitar sesgos de subestimación o sobreestimación en el cálculo de la biomasa aérea de los árboles, se optó por emplear la densidad (ρ) promedio de la madera de las especies de árboles objeto de estudio. En la Tabla 14, se detallan los valores de densidades empleados en la estimación de la biomasa aérea de los árboles presentes en la Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta.

Tabla 14. Densidades promedio de la madera

Nombre común	ρ promedio (g/cm ³)	Nombre común	ρ promedio (g/cm ³)
Acacia amarilla	0,643	Mamón	0,658
Almendrón	0,615	Mango	0,539
Árbol nim	0,598	Marañón	0,446
Camajón	0,387	Matarratón	0,775
Cañahuate	0,686	Moral	0,651
Caucho	0,347	Moringa	0,254
Cedro Caoba	0,450	Naranja	0,611
Ceiba	0,262	Naranja agria	0,713
Cují	0,702	Níspero	0,707

Nombre común	ρ promedio (g/cm ³)	Nombre común	ρ promedio (g/cm ³)
Ficus	0,394	Noni	0,456
Grosello	0,654	Ohiti	0,644
Guácimo	0,536	Samán	0,633
Guayacán carrapo	0,571	Seso Vegetal	0,498
Jaboncillo	0,643	Tamarindo	0,749
Jero	0,598	Totumo	0,469
Limón	0,650	Tulipán africano	0,497
Limón Swinglea	0,732	Urapo	0,489
Lluvia de oro	0,668		

4.2.4 Estimación de la Biomasa Aérea, Carbono y Productividad

La estimación de la biomasa aérea, el carbono total almacenado, el CO₂ secuestrado y el O₂ liberado por los árboles de la UFPS, Cúcuta, proporciona información necesaria para evaluar el papel de estos árboles en el servicio ecosistémico de regulación y la mitigación del cambio climático. Estos datos representan un aspecto fundamental del estudio y son esenciales para comprender la contribución de los árboles al equilibrio ambiental del entorno universitario dentro del área urbana. Para propósitos de este análisis, se excluyeron los árboles muertos en pie que se mencionan en el [Anexo 8](#), además, se incluyeron solo aquellos árboles con 10 cm de DAP o más. En total, se consideraron 833 árboles de 38 especies diferentes, como se muestra en la Tabla 15. Los árboles, en total contienen 10.113,45 toneladas (ton) de biomasa aérea, de las cuales, 5.056,72 ton corresponden al carbono almacenado en dicha biomasa, lo que indica que el CO₂ secuestrado corresponde a 18.520,55 ton y el O₂ producido es 13.463,83 ton. Cabe señalar que, las especies con mayor cantidad de biomasa aérea son el Oithi (2.726,27 ton), Chiminango (2.034,46 ton), Samán (1.279,31 ton) y Jero (1.064,14 ton); a su vez, son las especies que contienen más carbono almacenado con 1.363,12 ton, 1.017,23 ton, 639,66 ton y 532,07 ton, respectivamente; además, capturan mayor cantidad de CO₂ y liberan O₂ de forma equivalente,

con valores de 4.992,56 ton CO₂ – 3.629,42 ton O₂, 3.725,67 ton CO₂ – 2.708,44 ton O₂, 2.342,78 ton CO₂ – 1.703,12 ton O₂ y, 1.948,74 ton CO₂ – 1.416,67 ton O₂, en el mismo orden previamente mencionado. Por otro lado, el chiminango y samán que son dos de las especies que encabezan el contenido de biomasa aérea, carbono almacenado, CO₂ secuestrado y O₂ liberado, son especies que no presentan grandes cantidades de individuos, es decir, 37 y 26 individuos, respectivamente; contrario al Oithi y Jero que presentan 277 y 102 individuos.

Tabla 15. Productividad total por especie de árboles

Nombre común	Individuos	BA total	C _{alm} total	CO ₂ total	O ₂ total
Oithi	277	2726,27	1363,13	4992,56	3629,42
Chiminango	37	2034,46	1017,23	3725,67	2708,44
Samán	26	1279,31	639,66	2342,78	1703,12
Jero	102	1064,14	532,07	1948,74	1416,67
Urapo	82	1017,18	508,59	1862,74	1354,15
Camajón	22	453,86	226,93	831,15	604,22
Árbol nim	108	343,80	171,90	629,60	457,70
Moral	12	239,02	119,51	437,72	318,21
Mango	30	176,37	88,18	322,98	234,80
Ficus	26	156,00	78,00	285,69	207,69
Mamón	14	151,22	75,61	276,92	201,31
Cují negro	3	78,85	39,43	144,40	104,98
Guácimo	12	77,87	38,93	142,59	103,66
Níspero	5	65,33	32,66	119,63	86,97
Cedro caoba	13	64,76	32,38	118,60	86,22
Guayacán					
Carrapo	3	36,95	18,48	67,67	49,19
Matarratón	2	32,58	16,29	59,66	43,37
Totumo	7	24,99	12,49	45,76	33,27
Tulipán africano	25	17,81	8,91	32,62	23,71
Acacia amarilla	4	13,73	6,86	25,14	18,28
Chaperno	1	12,31	6,15	22,54	16,38
Árbol paraíso	2	8,44	4,22	15,45	11,23
Jaboncillo	1	7,68	3,84	14,06	10,22
Tamarindo	1	5,64	2,82	10,33	7,51
Lluvia de oro	2	4,92	2,46	9,01	6,55
Cañahuate	1	3,96	1,98	7,25	5,27
Ceiba	1	3,41	1,70	6,24	4,54

Nombre común	Individuos	BA total	C_{alm} total	CO₂ total	O₂ total
Grosello	1	2,53	1,27	4,64	3,37
Moringa	4	2,05	1,02	3,75	2,73
Naranja	1	2,03	1,01	3,72	2,70
Seso vegetal	1	1,42	0,71	2,61	1,90
Marañón	1	1,18	0,59	2,17	1,58
Caucho	1	1,17	0,59	2,15	1,56
Limon Swinglea	1	0,75	0,38	1,38	1,00
Acacia blanca	1	0,75	0,37	1,36	0,99
Noni	1	0,38	0,19	0,70	0,51
Azuceno blanco	1	0,20	0,10	0,36	0,26
Coralito	1	0,11	0,06	0,20	0,15
Total	833	10113,44	5056,72	18520,55	13463,82

Nota. BA se refiere a biomasa aérea, C_{alm} es el carbono almacenado, CO₂ es el dióxido de carbono secuestrado y O₂ es el oxígeno liberado; todo en toneladas.

En cuanto a las 151 palmas evaluadas, la Tabla 16 expone sus resultados, donde la biomasa aérea total es 30,67 ton, el carbono almacenado es 15,33 ton, el CO₂ secuestrado y el O₂ producido son 56,16 ton y 40,83 ton, respectivamente. Además, se puede observar que la palma real se presenta como la más productiva, con valores de 24,05 ton de biomasa aérea, 12,02 ton de C_{alm}, 44,04 ton de CO₂ secuestrado y 32,02 ton de O₂ producido, mientras que la palma cola de zorro se muestra como la menos productiva con menos de 0,1 ton de biomasa aérea, 0,03 ton de C_{alm}, 0,14 ton de CO₂ y 0,10 ton de O₂. Conviene resaltar que, mientras que los árboles mostraron que la productividad no estuvo sujeta a la cantidad de individuos por especies, los resultados de las palmas presentaron productividades de acuerdo con el número de individuos, en otras palabras, entre más individuos, mayor es la biomasa aérea, carbono almacenado, CO₂ secuestrado y O₂ liberado.

Tabla 16. Productividad total por especie de palmas

Nombre común	Individuos	BA total	C _{alm} total	CO ₂ total	O ₂ total
Africana	1	0,89	0,44	1,63	1,18
Real	59	24,05	12,03	44,04	32,02
Corozo	1	0,27	0,14	0,50	0,36
Bismarck plateada	2	0,40	0,20	0,73	0,53
Cola de zorro	1	0,08	0,04	0,14	0,10
Abanico	7	0,53	0,27	0,98	0,71
Paraíso	45	2,56	1,28	4,70	3,41
Areca	35	1,88	0,94	3,45	2,51
Total	151	30,67	15,33	56,16	40,83

Nota. BA se refiere a biomasa aérea, C_{alm} es el carbono almacenado, CO₂ es el dióxido de carbono secuestrado y O₂ es el oxígeno liberado; todo en toneladas.

La información presente en la Tabla 17 refleja el aporte de cada especie en la mitigación de las concentraciones de CO₂ atmosférico, lo cual es relevante en la gestión y conservación de los ecosistemas urbanos, especialmente, en una zona de bosque seco tropical. Por ese motivo y con el fin de conocer la especie de árbol que contribuye en mayor medida al servicio ecosistémico de regulación (secuestro de CO₂ y producción de O₂), se estimó la biomasa aérea, Carbono almacenado, CO₂ secuestrado y O₂ producido, todo en promedio. De esa forma, se determinó que es la especie que en promedio tiene mayor productividad, además de ser nativa para bosque seco tropical, corresponden al Chiminango, dado que, contiene 54,99 ton de biomasa aérea, 27,49 ton de carbono almacenado, 100,69 ton de CO₂ secuestrado y 73,20 ton de O₂ liberado, seguido por el Samán, Cují negro, Camajón, Moral, Matarratón, Níspero, Urapo, Guayacán Carrapo, Chaperno, Mamón y Jero las cuales también son especies nativas. Por otro lado, las especies con menor productividad son el Coralito, Azuceno blanco, Noni, Moringa, Tulipán africano, Acacia blanca y Limón Swinglea de los cuales el Coralito y Noni es una especie nativa y las cinco especies restantes son introducidas.

Tabla 17. Productividad promedio por especie de árboles

Nombre común	BA prom	C _{alm} prom	CO ₂ prom	O ₂ prom
Oithi	9,84	4,92	18,02	13,10
Chiminango	54,99	27,49	100,69	73,20
Samán	49,20	24,60	90,11	65,50
Jero	10,43	5,22	19,11	13,89
Urapo	12,40	6,20	22,72	16,51
Camajón	20,63	10,32	37,78	27,46
Árbol nim	3,18	1,59	5,83	4,24
Moral	19,92	9,96	36,48	26,52
Mango	5,88	2,94	10,77	7,83
Ficus	6,00	3,00	10,99	7,99
Mamón	10,80	5,40	19,78	14,38
Cují negro	26,28	13,14	48,13	34,99
Guácimo	6,49	3,24	11,88	8,64
Níspero	13,07	6,53	23,93	17,39
Cedro caoba	4,98	2,49	9,12	6,63
Guayacán Carrapo	12,32	6,16	22,56	16,40
Matarratón	16,29	8,14	29,83	21,68
Totumo	3,57	1,78	6,54	4,75
Tulipán africano	0,71	0,36	1,30	0,95
Acacia amarilla	3,43	1,72	6,29	4,57
Chaperno	12,31	6,15	22,54	16,38
Árbol paraíso	4,22	2,11	7,72	5,62
Jaboncillo	7,68	3,84	14,06	10,22
Tamarindo	5,64	2,82	10,33	7,51
Lluvia de oro	2,46	1,23	4,50	3,27
Cañahuate	3,96	1,98	7,25	5,27
Ceiba	3,41	1,70	6,24	4,54
Grosello	2,53	1,27	4,64	3,37
Moringa	0,51	0,26	0,94	0,68
Naranja	2,03	1,01	3,72	2,70
Seso vegetal	1,42	0,71	2,61	1,90
Marañón	1,18	0,59	2,17	1,58
Caucho	1,17	0,59	2,15	1,56
Limon Swinglea	0,75	0,38	1,38	1,00
Acacia blanca	0,75	0,37	1,36	0,99
Noni	0,38	0,19	0,70	0,51
Azuceno blanco	0,20	0,10	0,36	0,26
Coralito	0,11	0,06	0,20	0,15

Nota. BA se refiere a biomasa aérea, C_{alm} es el carbono almacenado, CO₂ es el dióxido de carbono secuestrado y O₂ es el oxígeno liberado; todo en toneladas.

Comparando los valores de productividad promedio de árboles con los de palmas que se muestran en la Tabla 18, se observa que hay una clara distinción en la productividad, puesto que los árboles presentan valores notables de biomasa aérea, carbono almacenado, CO₂ secuestrado y O₂ producido mientras que las palmas muestran cifras considerablemente más bajas. Aunque las palmas no contribuyan de manera significativa en la captara de CO₂, cumplen otras funciones ecosistémicas, por tal motivo, estos hallazgos subrayan la necesidad de investigaciones futuras que exploren a profundidad el rol de las palmas en los entornos urbanos.

Tabla 18. Productividad promedio de las especies de palmas

Nombre común	BA prom	C _{alm} prom	CO ₂ prom	O ₂ prom
Africana	0,89	0,44	1,63	1,18
Real	0,41	0,20	0,75	0,54
Corozo	0,27	0,14	0,50	0,36
Bismarck plateada	0,20	0,10	0,37	0,27
Cola de zorro	0,08	0,04	0,14	0,10
Abanico	0,08	0,04	0,14	0,10
Paraíso	0,06	0,03	0,10	0,08
Areca	0,05	0,03	0,10	0,07

Nota. BA se refiere a biomasa aérea, C_{alm} es el carbono almacenado, CO₂ es el dióxido de carbono secuestrado y O₂ es el oxígeno liberado; todo en toneladas.

La Universidad Francisco de Paula Santander sede Cúcuta se extiende en 13,922 hectáreas (ha). Dentro de este terreno, la biomasa aérea total compuesta por palmas y árboles, mantiene un notable promedio de 728,64 ton/ha, lo que se traduce a una reserva de 364,32 ton/ha, 1.334,34 ton/ha de CO₂ secuestrado y 970,02 ton/ha de O₂ liberado. Estos datos subrayan la importancia de la universidad en su contribución a la sostenibilidad ambiental y su influencia positiva en la atenuación del cambio climático.

La Tabla 19 contiene la información sobre la productividad total de cada familia botánica objeto de este estudio. Lo cual, demuestra que la familia Fabaceae es la más influyente no solo en términos de diversidad de especies sino también en el contenido de biomasa aérea (4.526,69 ton), carbono almacenado (2.263,34 ton), CO₂ secuestrado (8.289,63 ton) y O₂ liberado (6.026,29 ton), seguido por las familias Chrysobalanceae y Bignoniaceae. La familia con menor productividad es la Boraginaceae, dado que solo cuenta con 0,11 ton de biomasa aérea, 0,06 ton de carbono almacenado, 0,2 ton de CO₂ secuestrado y 0,15 ton de O₂ producido, otras familias con baja productividad son Apocynaceae y Rubiaceae, estas familias corresponden a especies que pueden ser árboles pequeños o arbustos, específicamente, el Coralito, Azuceno blanco y Noni.

Tabla 19. Productividad total por familias

Familia	BA total	C_{alm} total	CO₂ total	O₂ total
Anacardiaceae	177,55	88,78	325,15	236,37
Apocynaceae	0,20	0,10	0,36	0,26
Arecaceae	30,67	15,33	56,16	40,83
Bignoniaceae	1063,94	531,97	1948,38	1416,41
Boraginaceae	0,11	0,06	0,20	0,15
Chrysobalanceae	2726,27	1363,13	4992,56	3629,42
Fabaceae	4526,69	2263,34	8289,63	6026,29
Malvaceae	535,13	267,57	979,98	712,41
Meliaceae	417,00	208,50	763,65	555,15
Moraceae	396,20	198,10	725,56	527,46
Moringaceae	2,05	3,05	4,05	5,05
Phyllanthaceae	2,53	1,27	4,64	3,37
Rubiaceae	0,38	0,19	0,70	0,51
Rutaceae	2,78	1,39	5,09	3,70
Sapindaceae	225,65	112,83	413,23	300,40
Zygophyllaceae	36,95	37,95	38,95	39,95

Nota. BA se refiere a biomasa aérea, C_{alm} es el carbono almacenado, CO₂ es el dióxido de carbono secuestrado y O₂ es el oxígeno liberado; todo en toneladas.

4.3 Establecimiento de la nemotecnia para la comprensión de sostenibilidad ambiental

En el contexto del estudio, se ha reconocido la necesidad de establecer una nemotecnia efectiva para facilitar la comprensión de la sostenibilidad ambiental y los servicios ecosistémicos proporcionados por las especies arbóreas en el campus universitario (consultar nemotecnia en [Anexo 9](#)). Dado que la diversidad y el papel ecológico de estas especies son fundamentales para el bienestar del entorno natural, es esencial que la comunidad académica en general pueda comprender de manera clara y accesible cómo contribuyen a la sostenibilidad. De ahí, que el desarrollo de la nemotecnia se basó en la recopilación de datos científicos sólidos, como los índices de valor de importancia, la estimación del secuestro de carbono y la evaluación de servicios ecosistémicos (información detallada [Anexo 10](#)).

4.3.1 *Importancia ecológica y diversidad del campus*

Se presenta el análisis de la estructura horizontal del campus universitario, donde se destacó la presencia de diez especies con mayor importancia ecológica (Figura 21). Entre ellas, el Oithi sobresale significativamente, representando el 16,7% de la comunidad arbórea. Le siguen en importancia el Chiminango con un 7,2%, el Jero con un 6,6%, el Urapo con un 6,3% y el Árbol nim con un 5,2%. Es importante señalar que la abundancia, frecuencia y dominancia de una especie están directamente relacionadas con su influencia ecológica en la comunidad arbórea, lo que se refleja en la Tabla 20. Además, se observa que aproximadamente el 50% de las diez especies más representativas, son introducidas, mientras que el otro 50% son especies nativas. Un hallazgo interesante es que las especies con una mayor área basal ocuparon los primeros lugares en términos de importancia ecológica, lo que sugiere una relación entre la densidad y el

grado de influencia de estas especies en la comunidad. En resumen, estos resultados destacan la importancia de entender la composición y estructura del arbolado en el campus universitario, donde ciertas especies, tanto introducidas como nativas, desempeñan un papel significativo en el ecosistema.

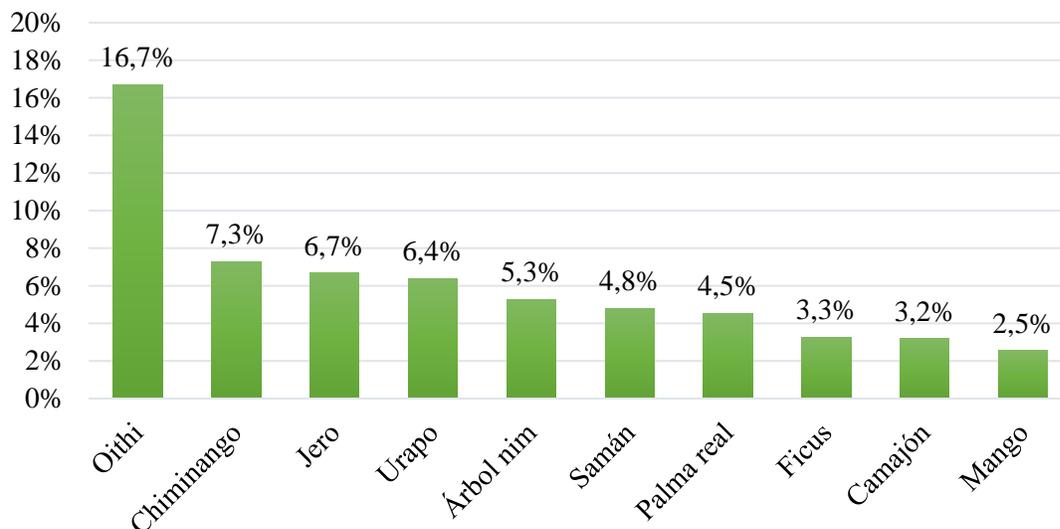


Figura 21. Especies con mayor importancia ecológica

Tabla 20. Valores del índice de importancia por especies

Nombre Común	Individuos	Área Basal	Nº sitios	Ar (%)	Fr (%)	Dr (%)	IVI
Oithi	282	57,63	4	22,945%	2,878%	24,277%	16,700%
Chiminango	38	39,31	3	3,092%	2,158%	16,562%	7,271%
Jero	113	18,84	4	9,194%	2,878%	7,937%	6,670%
Urapo	84	22,35	4	6,835%	2,878%	9,416%	6,376%
Árbol nim	115	10,10	3	9,357%	2,158%	4,256%	5,257%
Samán	26	22,19	4	2,116%	2,878%	9,346%	4,780%
Palma real	76	10,70	4	6,184%	2,878%	4,507%	4,523%
Ficus	32	10,14	4	2,604%	2,878%	4,273%	3,251%
Camajón	24	11,19	4	1,953%	2,878%	4,715%	3,182%
Mango	33	4,88	4	2,685%	2,878%	2,054%	2,539%

Nombre Común	Individuos	Área Basal	Nº sitios	Ar (%)	Fr (%)	Dr (%)	IVI
Azuceno blanco	39	3,18	4	3,173%	2,878%	1,339%	2,463%
Palma paraíso	46	0,97	4	3,743%	2,878%	0,410%	2,343%
Mamón	17	2,77	4	1,383%	2,878%	1,165%	1,809%
Guácimo	16	2,57	4	1,302%	2,878%	1,085%	1,755%
Tulipán africano	40	0,92	2	3,255%	1,439%	0,388%	1,694%
Moral	13	4,18	2	1,058%	1,439%	1,760%	1,419%
Árbol de la felicidad	26	0,52	2	2,116%	1,439%	0,220%	1,258%
Palma abanico	13	0,20	3	1,058%	2,158%	0,084%	1,100%
Totumo	7	1,14	3	0,570%	2,158%	0,479%	1,069%
Coralito	20	0,32	2	1,627%	1,439%	0,136%	1,067%
Palma Yucca	12	0,15	3	0,976%	2,158%	0,064%	1,066%
Pino libro	12	0,00	3	0,976%	2,158%	0,000%	1,045%
Níspero	5	1,29	3	0,407%	2,158%	0,542%	1,036%
Cedro caoba	13	1,34	2	1,058%	1,439%	0,565%	1,020%
Moringa	9	0,13	3	0,732%	2,158%	0,055%	0,982%
Guayacán	3	0,69	3	0,244%	2,158%	0,291%	0,898%
Carrapo							
Acacia amarilla	4	0,45	3	0,325%	2,158%	0,191%	0,891%
Limón	6	0,02	3	0,488%	2,158%	0,009%	0,885%
Cují negro	3	1,56	2	0,244%	1,439%	0,656%	0,780%
Mirto	7	0,24	2	0,570%	1,439%	0,100%	0,703%
Tamarindo	5	0,16	2	0,407%	1,439%	0,068%	0,638%
Pino araucaria	4	0,23	2	0,325%	1,439%	0,095%	0,620%
Acacia blanca	3	0,05	2	0,244%	1,439%	0,021%	0,568%
Palma Bismarck	2	0,09	2	0,163%	1,439%	0,037%	0,546%
plateada							
Limón Swinglea	2	0,08	2	0,163%	1,439%	0,034%	0,545%
Aguacate	2	0,00	2	0,163%	1,439%	0,001%	0,534%
Matarratón	3	0,75	1	0,244%	0,719%	0,317%	0,427%
Plátano	3	0,52	1	0,244%	0,719%	0,219%	0,394%
Guanábana	4	0,01	1	0,325%	0,719%	0,003%	0,349%

Nombre Común	Individuos	Área Basal	Nº sitios	Ar (%)	Fr (%)	Dr (%)	IVI
Árbol paraíso	2	0,39	1	0,163%	0,719%	0,163%	0,348%
Cobalongo	3	0,02	1	0,244%	0,719%	0,008%	0,324%
Chaperno	1	0,29	1	0,081%	0,719%	0,123%	0,308%
Lluvia de oro	2	0,10	1	0,163%	0,719%	0,041%	0,308%
Palma Cyca	2	0,00	1	0,163%	0,719%	0,000%	0,294%
Ceiba	1	0,14	1	0,081%	0,719%	0,060%	0,287%
Jaboncillo	1	0,14	1	0,081%	0,719%	0,058%	0,286%
Grosello	1	0,12	1	0,081%	0,719%	0,052%	0,284%
Palma corozo	1	0,11	1	0,081%	0,719%	0,047%	0,283%
Matapalos	1	0,10	1	0,081%	0,719%	0,044%	0,282%
Cañahuate	1	0,08	1	0,081%	0,719%	0,032%	0,278%
Naranja	1	0,06	1	0,081%	0,719%	0,026%	0,276%
Seso vegetal	1	0,05	1	0,081%	0,719%	0,022%	0,274%
Caucho	1	0,05	1	0,081%	0,719%	0,021%	0,274%
Marañón	1	0,05	1	0,081%	0,719%	0,021%	0,274%
Naranja agria	1	0,04	1	0,081%	0,719%	0,018%	0,273%
Palma cola de zorro	1	0,03	1	0,081%	0,719%	0,012%	0,271%
Noni	1	0,01	1	0,081%	0,719%	0,005%	0,269%
Palma cola de caballo	1	0,01	1	0,081%	0,719%	0,003%	0,268%
Gualanday	1	0,00	1	0,081%	0,719%	0,000%	0,267%
Almendrón	1	0,00	1	0,081%	0,719%	0,000%	0,267%
Mandarina	1	0,00	1	0,081%	0,719%	0,000%	0,267%
Palma africana	1	0,00	1	0,081%	0,719%	0,000%	0,267%
Palmiche	1	0,00	1	0,081%	0,719%	0,000%	0,267%
Pino ciprés	1	0,00	1	0,081%	0,719%	0,000%	0,267%
Total	1229	237,368883	139	1	1	1	1

Nota. Donde Fr% es frecuencia relativa, Ar% es abundancia relativa y Dr% es dominancia relativa, expresado en porcentajes.

En particular, la familia Fabaceae sobresale con una significativa importancia ecológica del 18.7%, le siguen en importancia la familia Chrysobalanceae con un 10.4% y la familia Arecaceae con un 8.1%. Además, las familias Bignoniaceae y Moraceae contribuyen con un

7.8% y un 5.9%, respectivamente, como se ilustra en la Figura 22. La familia Fabaceae engloba un total de 10 especies, entre las cuales se encuentran el Chiminango y el Jero, que ocupan el segundo y tercer lugar en términos de influencia ecológica, como se demostró previamente. Por otro lado, la familia Chrysobalanaceae está compuesta únicamente por la especie Oithi, lo que la convierte en una de las familias más representativas cuando se comparan los resultados de familia con los de especie (ver Tabla 21). Es importante destacar que estas familias botánicas no solo aportan significativamente a la importancia ecológica en términos de especies individuales, sino que también desempeñan un papel crucial en la estructura general del ecosistema arbóreo del campus universitario.

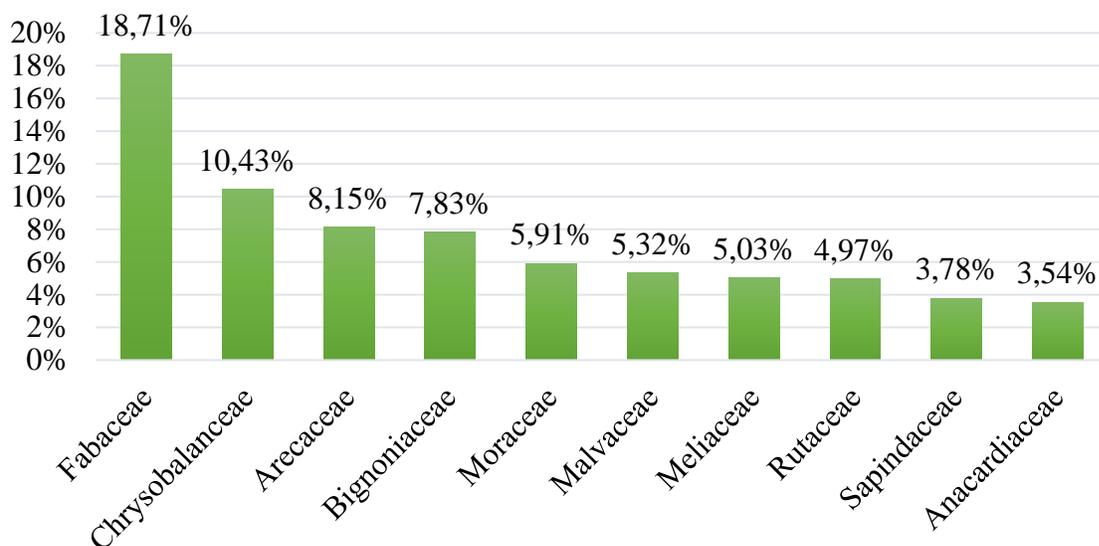


Figura 22. Familias botánicas de mayor importancia ecológica

Tabla 21. Valores del índice de importancia por familias botánicas

Nombre Común	Nº Especies	Área Basal	Nº sitios	Ar (%)	Fr (%)	Dr (%)	IVI
Fabaceae	10	83,7	4	15,38%	5,48%	35,26%	18,71%
Chrysobalanaceae	1	57,6	4	1,54%	5,48%	24,28%	10,43%
Arecaceae	8	15,8	4	12,31%	5,48%	6,66%	8,15%
Bignoniaceae	5	24,5	4	7,69%	5,48%	10,31%	7,83%
Moraceae	4	14,5	4	6,15%	5,48%	6,10%	5,91%
Malvaceae	3	13,9	4	4,62%	5,48%	5,86%	5,32%
Meliaceae	3	11,8	4	4,62%	5,48%	4,98%	5,03%
Rutaceae	6	0,4	4	9,23%	5,48%	0,19%	4,97%
Sapindaceae	3	3,0	4	4,62%	5,48%	1,24%	3,78%
Anacardiaceae	2	4,9	4	3,08%	5,48%	2,07%	3,54%
Asparagaceae	3	0,7	4	4,62%	5,48%	0,29%	3,46%
Apocynaceae	2	3,2	4	3,08%	5,48%	1,35%	3,30%
Cupressaceae	2	0,0	3	3,08%	4,11%	0,00%	2,40%
Sapotaceae	1	1,3	3	1,54%	4,11%	0,54%	2,06%
Zygophyllaceae	1	0,7	3	1,54%	4,11%	0,29%	1,98%
Moringaceae	1	0,1	3	1,54%	4,11%	0,05%	1,90%
Boraginaceae	1	0,3	2	1,54%	2,74%	0,14%	1,47%
Araucariaceae	1	0,2	2	1,54%	2,74%	0,10%	1,46%
Lauraceae	1	0,0	2	1,54%	2,74%	0,00%	1,43%
Musaceae	1	0,5	1	1,54%	1,37%	0,22%	1,04%
Phyllanthaceae	1	0,1	1	1,54%	1,37%	0,05%	0,99%
Rubiaceae	1	0,0	1	1,54%	1,37%	0,00%	0,97%
Annonaceae	1	0,0	1	1,54%	1,37%	0,00%	0,97%
Combretaceae	1	0,0	1	1,54%	1,37%	0,00%	0,97%
Cycadaceae	1	0,0	1	1,54%	1,37%	0,00%	0,97%
Cyclanthaceae	1	0,0	1	1,54%	1,37%	0,00%	0,97%
Total	65	237,4	73	1	1	1	1

Nota. Donde Fr% es frecuencia relativa, Ar% es abundancia relativa y Dr% es dominancia relativa, expresado en porcentajes.

A su vez, el Índice de Shannon arrojó una diversidad biológica de 3.05, lo que se clasifica como una diversidad media presente en el arbolado universitario (Tabla 22), y se halló una riqueza uniforme del 0,73 según el índice de Pielou. Además, se aplicó el Índice de Shannon a los cuatro cuadrantes de muestreo, de los cuales A, C y D exhibieron una diversidad media Sin

embargo, el cuadrante B se distinguió al mostrar una diversidad alta, que podría asociarse con brindar amplios servicios ecosistémicos (ver Figura 23)..

Tabla 22. Cálculo del índice de Shannon

Nombre Común	Pi	$-(Pi * \ln Pi)$
Acacia amarilla	0,0033	0,0186
Acacia blanca	0,0024	0,0147
Aguacate	0,0016	0,0104
Almendrón	0,0008	0,0058
Árbol de la felicidad	0,0212	0,0816
Árbol nim	0,0936	0,2217
Árbol paraíso	0,0016	0,0104
Azuceno blanco	0,0317	0,1095
Camajón	0,0195	0,0769
Cañahuate	0,0008	0,0058
Caucho	0,0008	0,0058
Cedro caoba	0,0106	0,0481
Ceiba	0,0008	0,0058
Chaperno	0,0008	0,0058
Chiminango	0,0309	0,1075
Cobalongo	0,0024	0,0147
Coralito	0,0163	0,0670
Cují negro	0,0024	0,0147
Ficus	0,0260	0,0950
Grosello	0,0008	0,0058
Guácimo	0,0130	0,0565
Gualanday	0,0008	0,0058
Guanábana	0,0033	0,0186
Guayacán Carrapo	0,0024	0,0147
Jaboncillo	0,0008	0,0058
Jero	0,0919	0,2194
Limón	0,0049	0,0260
Limon Swinglea	0,0016	0,0104
Lluvia de oro	0,0016	0,0104
Mamón	0,0138	0,0592
Mandarina	0,0008	0,0058
Mango	0,0269	0,0971

Nombre Común	Pi	$-(Pi \cdot \ln Pi)$
Marañón	0,0008	0,0058
Matapalos	0,0008	0,0058
Matarratón	0,0024	0,0147
Mirto	0,0057	0,0294
Moral	0,0106	0,0481
Moringa	0,0073	0,0360
Naranja	0,0008	0,0058
Naranja agria	0,0008	0,0058
Níspero	0,0041	0,0224
Noni	0,0008	0,0058
Oithi	0,2295	0,3378
Palma abanico	0,0106	0,0481
Palma africana	0,0008	0,0058
Palma areca	0,0301	0,1055
Palma Bismarck plateada	0,0016	0,0104
Palma cola de caballo	0,0008	0,0058
Palma cola de zorro	0,0008	0,0058
Palma corozo	0,0008	0,0058
Palma Cyca	0,0016	0,0104
Palma paraíso	0,0374	0,1230
Palma real	0,0618	0,1721
Palma Yucca	0,0098	0,0452
Palmiche	0,0008	0,0058
Pino araucaria	0,0033	0,0186
Pino ciprés	0,0008	0,0058
Pino libro	0,0098	0,0452
Plátano	0,0024	0,0147
Samán	0,0212	0,0816
Seso vegetal	0,0008	0,0058
Tamarindo	0,0041	0,0224
Totumo	0,0057	0,0294
Tulipán africano	0,0325	0,1115
Urapo	0,0683	0,1834
Total	1	3,034

Nota. Donde Pi es porción de individuos

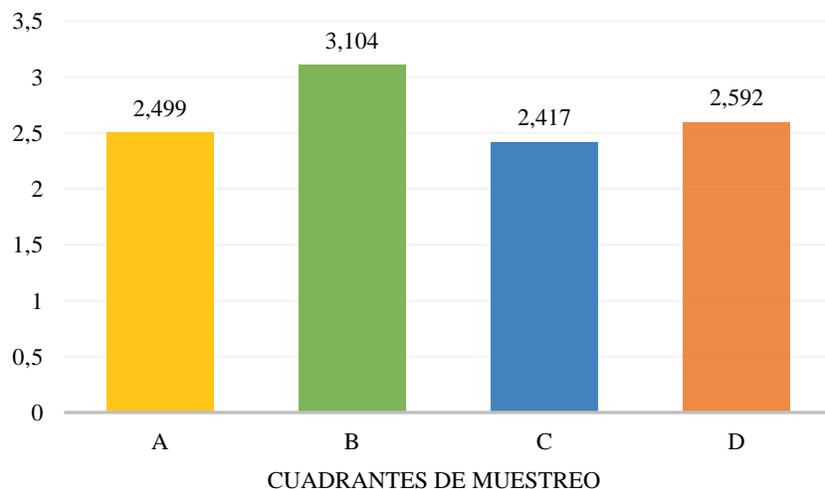


Figura 23. Diversidad de Shannon por cuadrante

Seguidamente, se procedió a verificar la exactitud del valor de biodiversidad general y por cuadrante obtenidos, mediante la programación en Excel utilizando PAST (Paquete de Software de Estadísticas Paleontológicas para Educación y Análisis de Datos). En la Tabla 23 se evidencia los datos por cuadrante introducidos en el programa estadístico.

Tabla 23. Número de especies por cuadrante

Nombre común	A	B	C	D	Total
Acacia amarilla		1	2	1	4
Acacia blanca			1	2	3
Aguacate		1	1		2
Almendron		1			1
Árbol de la felicidad	18	8			26
Árbol nim	2	19		94	115
Árbol paraíso				2	2
Azuceno blanco	6	3	14	16	39
Camajón	3	5	3	13	24
Cañahuate				1	1
Caucho		1			1
Cedro caoba	10	3			13

Nombre común	A	B	C	D	Total
Ceiba				1	1
Chaperno				1	1
Chiminango	3		27	8	38
Cobalongo		3			3
Coralito			9	11	20
Cují negro	1			2	3
Ficus	11	11	3	7	32
Grosello		1			1
Guácimo	6	4	2	4	16
Gualanday		1			1
Guanábana		4			4
Guayacán Carrapo	1	1	1		3
Jaboncillo		3			1
Jero	7	1	20	85	113
Limón	2	3	1		6
Limon Swinglea		1		1	2
Lluvia de oro		2			2
Mamón	5	6	1	5	17
Mandarina		1			1
Mango	12	6	2	13	33
Marañón	1				1
Matapalos				1	1
Matarratón	3				3
Mirto	1			6	7
Moral			10	3	13
Moringa	1		3	5	9
Naranja		1			1
Naranja agria	1				1
Níspero	3		1	1	5
Noni		1			1
Oithi	136	25	73	48	282
Palma abanico	1	11		1	13
Palma africana		1			1
Palma areca	11	14	1	11	37
Palma Bismarck plateada	1	1			2
Palma cola de caballo	1				1
Palma cola de zorro	1				1
Palma corozo		1			1
Palma Cyca		2			2

Nombre común	A	B	C	D	Total
Palma paraíso	17	16	8	5	46
Palma real	10	59	2	5	76
Palma yucca	3	4		5	12
Palmicha	1				1
Pino araucaria	3	1			4
Pino ciprés		1			1
Pino libro	6	5		1	12
Plátano		3			3
Samán	4	13	1	8	26
Seso vegetal	1				1
Tamarindo		4		1	5
Totumo	3		3	1	7
Tulipán africano			39	1	40
Urapo	42	9	24	9	84

El análisis de los 13 índices de diversidad arrojados por el programa reveló aspectos significativos sobre la distribución de especies en los cuatro cuadrantes estudiados. En primer lugar, el cuadrante B se destacó por presentar una dominancia ligeramente más baja, lo que indica una distribución equitativa de especies en comparación con las otras zonas. Además, todos los cuadrantes demostraron una biodiversidad equitativa, ya que los índices de equidad (J) mostraron valores cercanos a 1, lo que sugiere una uniformidad en la distribución de especies en cada cuadrante, de ahí que Taxa S enseñó que el cuadrante con mayor número de especies es el B y el menor correspondió al C tal como se ilustra en la Figura 24. En cuanto a distribución de la diversidad biológica en los cuadrantes se observó que el cuadrante B es el de mayor diversidad, seguido del D, A y C análisis que es soportado por el índice de Simpson (1-D), Brillouin, Menhinick, Margalef y Chao, que reportaron el valor más alto en términos de riqueza para ese cuadrante, sin embargo, hubo una discrepancia entre algunos de los índices de diversidad al determinar cuál de los cuadrantes, A o D, era el segundo más diverso. Mientras que los índices de Shannon y Brillouin indicaron que el cuadrante D era el segundo más diverso, los índices de

Simpson, Menhinick, Margalef y Chao numéricamente señalaron al cuadrante A como el segundo más diverso. Este análisis resalta la complejidad de la distribución de especies en los diferentes cuadrantes y la importancia de considerar múltiples índices de diversidad para obtener una imagen completa de la biodiversidad en cada área del campus universitario. Con lo anterior, se corrobora los resultados de diversidad de Shannon en los cuatro cuadrantes, asegurando que la programación de fórmulas fue correcta.

Tabla 24. Índices generados por PAST.

Índices diversidad	A	B	C	D
Taxa_S	36	43	25	35
Individuals	338	260	252	379
Dominance_D	0,1903	0,08479	0,1426	0,1369
Simpson_1-D	0,8097	0,9152	0,8574	0,8631
Shannon_H	2,453	3,023	2,369	2,547
Evenness_e^H/S	0,3227	0,4779	0,4276	0,3649
Brillouin	2,294	2,788	2,222	2,405
Menhinick	1,958	2,667	1,575	1,798
Margalef	6,011	7,553	4,34	5,726
Equitability_J	0,6844	0,8037	0,736	0,7164
Fisher_alpha	10,2	14,68	6,895	9,407
Berger-Parker	0,4024	0,2269	0,2897	0,248
Chao-1	58	94	30,6	51,5

ota o ado del programa

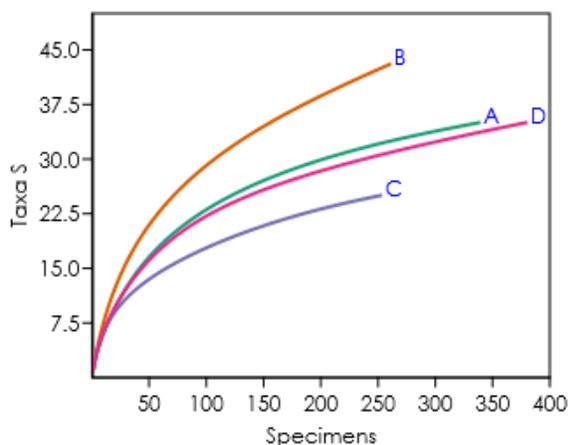


Figura 24. Taxa S. Nota. Elaborado en el programa PAST

Ahora, el análisis integral de la diversidad realizado mediante el programa PAST reveló dos perfiles complementarios. El primero corresponde a la gráfica de diversidad Alpha, que midió la riqueza de especies en los cuadrantes en función del esfuerzo de muestreo como se evidencia en la Figura 25. El segundo perfil generado correspondió a la Rarefacción, que calculó la riqueza estimada de especies que se esperaba encontrar en los cuadrantes si se hubieran muestreado el mismo número de individuos en todos ellos. Como resultado, se encontró que los cuadrantes A y D mostraron una similitud en diversidad e individuos, lo que sugiere una tendencia similar entre estos dos cuadrantes. Además, se observó que el cuadrante B presentó innegablemente una mayor diversidad (Figura 26).

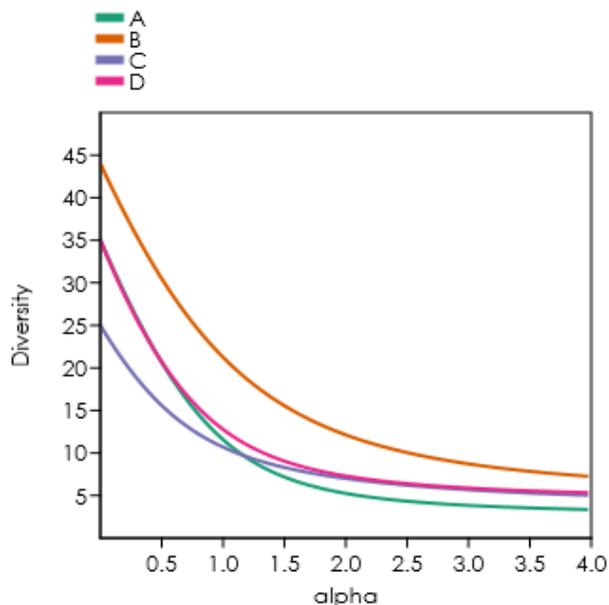


Figura 25. Diversidad de Alpha. Nota. Elaborado en el programa PAST

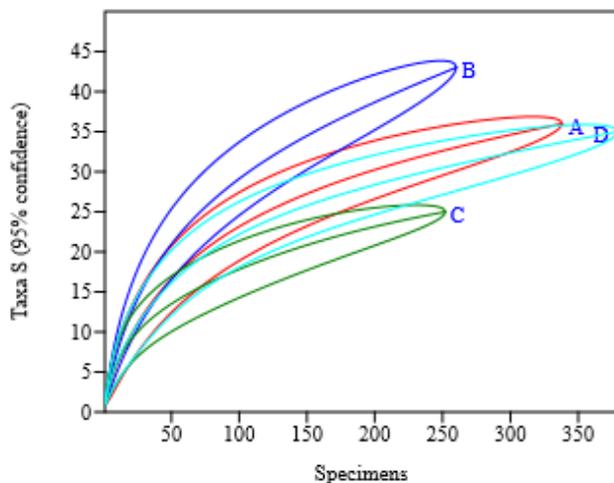


Figura 26. Rarefacción. *Nota.* Elaborado en el programa PAST

4.3.2 Funciones ecosistémicas

Con el propósito de evaluar la sostenibilidad del campus universitario, se elaboró una matriz que sintetizó la información sobre las funciones ecosistémicas proporcionadas por las especies arbóreas. Dicha matriz, presentada en la Tabla 25, se basó en la literatura científica consultada y resaltó un total de 17 funciones ecosistémicas, donde se observó que las funciones más representativas fueron el valor ornamental, identificado en 52 repeticiones, alimento para la fauna con 30 repeticiones, y la proporción de sombra con 28 repeticiones. También, se registró funciones como refugio para la fauna, restauración ecológica y producción de madera cada una brindada por 18 especies. En cuanto, a las funciones que son menos comunes entre las especies se encontró la regulación de la acidez del suelo (2 especies), fijación de nitrógeno (3 especies), vallado de árboles (4 especies), barrera contra el ruido (5 especies), estabilización de márgenes hídricos y recuperación de suelo (6 especies para cada función) y conservación del suelo (7 especies).

Es importante señalar que algunas especies sobresalen en ciertas funciones como el grupo de especies que contribuyen significativamente a la restauración ecológica, incluyendo al Jero (nativa), el Oithi (introducida), Guácimo (nativa), la Palma Corozo (introducida), el Urapo (nativa), el Matarratón (nativa) y el Jaboncillo (introducido) lo que resulta importante en la recuperación de áreas verdes. Con relación a la función de barrera contra el ruido, se observó que el Mango y el Ficus desempeñan un papel relevante en este aspecto. En el contexto de la conservación del suelo, se ha identificado que el Caucho contribuye a esta función, mientras que el Matapalos está relacionado con la recuperación de suelos.

En cuanto a las especies introducidas, varias de ellas, como el Pino Araucaria y el Árbol Nim, tienen un alto valor ornamental. También como la Moringa, Camajón y Chiminango, contribuyen al suministro de alimento para la fauna local. Por su parte, las especies nativas como el Jero, se destacó en la promoción de la restauración ecológica, el Marañón, también cumple funciones relacionadas con la alimentación y el refugio de la fauna. Por su parte, la Guanábana, otra especie nativa, desempeña un papel crucial como barrera rompevientos y cerca viva, además de proporcionar alimento para la fauna. Es importante destacar que la mayoría de las especies de palmas se encontraron categorizadas en la función ornamental.

Níspero	✓ e, h	✓ e, f, h	✓ e, f	✓ e		✓ f	5	
Noni	✓ h						1	
Oithi	✓ h	✓ h	✓ h	✓ h	✓ h	✓ h	6	
Palma abanico	✓ h						1	
Palma africana	✓ h	✓ f	✓ f, h				3	
Palma areca	✓ h						1	
Palma Bismarck plateada	✓ h						1	
Palma cola de caballo	✓ h						1	
Palma cola de zorro	✓ h						1	
Palma corozo	✓ h	✓ f	✓ f				3	
Palma Cyca	✓ h						1	
Palma paraíso	✓ f		✓ f				2	
Palma real	✓ d		✓ d, h		✓ d	✓ d	✓ d	6
Palma yucca	✓ h						1	
Palmiche	✓ h						1	
Pino araucaria	✓ h						1	
Pino ciprés	✓ h						1	
Pino libro	✓ h					✓ h	2	
Plátano			✓ h				1	
Samán	✓ f	✓ f	✓ e, g, h	✓ e, g	✓ e		✓ f, g	6
Seso vegetal	✓ h		✓ f, h	✓ f			✓ f	4
Tamarindo	✓ h	✓ e	✓ e, h	✓ e	✓ e			5
Totumo	✓ h	✓ d, e		✓ a	✓ e		✓ d	5
Tulipán africano	✓ h	✓ h	✓ h	✓ h				4

Urapo	✓ d, f, h	✓ d, f, h	✓ d, e		✓ a	✓ e	✓ d	✓ a, d, e, f	11									
Total general	1	52	28	21	8	10	30	18	5	7	6	6	4	5	3	2	18	17

Nota. Creado a partir del (a) Calle y Murgueitio (2020). (b) Calle (2022). (c) Mahecha et al. (2010). (d) Montiel et al. (2020). (e) Establecimiento Público Ambiental de Cartagena (2015). (f) Zea et al. (2015). (g) Morales y Sarmiento (2008). (h) Catálogo virtual de flora del Valle de Aburrá (<https://catalogofloravalleaburra.eia.edu.co/>).

Además, se observó que de las 65 especies 44 especies mostraron más de dos funciones ecosistémicas, mientras que las demás se limitaron a una sola función. Entre las 35 especies que exhibieron múltiples funciones, se destacaron el Urapo con 10 funciones, el Matarratón y Ceiba con 10, el Chiminango y Acacia amarilla con 8 y el Ficus, Camajón y Mamón con 6. Es importante señalar que la mayoría de estas especies con múltiples funciones son de origen nativo, como se detalla en la Tabla 26. Estos resultados revelaron la diversidad de funciones ecosistémicas proporcionadas por las especies arbóreas en el campus universitario, resaltando la importancia de su gestión y conservación para promover la sostenibilidad ambiental en esta área.

Tabla 26. Número de funciones por especie

Origen	Nombre común	N° Funciones	Origen	Nombre común	N° Funciones
Nativa	Urapo	11	Introducida	Palma africana	3
Nativa	Ceiba	10	Nativa	Palma corozo	3
Nativa	Matarratón	10	Introducida	Aguacate	2
Introducida	Acacia amarilla	8	Introducida	Azuceno blanco	2
Nativa	Chiminango	8	Introducida	Limón	2
Nativa	Camajón	6	Introducida	Lluvia de oro	2
Nativa	Cují negro	6	Introducida	Mandarina	2
Introducida	Ficus	6	Introducida	Moringa	2
Nativa	Mamón	6	Introducida	Naranja	2
Introducida	Mango	6	Introducida	Palma paraíso	2
Introducida	Oithi	6	Introducida	Pino libro	2
Introducida	Palma real	6	Introducida	Árbol de la felicidad	1

Nativa	Samán	6	Introducida	Árbol paraíso	1
Introducida	Acacia blanca	5	Nativa	Cedro caoba	1
Introducida	Almendrón	5	Nativa	Chaperno	1
Nativa	Cañahuate	5	Introducida	Cobalongo	1
Nativa	Guanábana	5	Introducida	Grosello	1
Introducida	Marañón	5	Nativa	Jero	1
Nativa	Níspero	5	Introducida	Limon Swinglea	1
Introducida	Tamarindo	5	Introducida	Naranja agria	1
Nativa	Totumo	5	Nativa	Noni	1
Introducida	Caucho	4	Introducida	Palma abanico	1
Nativa	Coralito	4	Introducida	Palma areca	1
Nativa	Guácimo	4	Introducida	Palma Bismarck plateada	1
Introducida	Gualanday	4	Introducida	Palma cola de caballo	1
Nativa	Guayacán Carrapo	4	Introducida	Palma cola de zorro	1
Introducida	Seso vegetal	4	Introducida	Palma Cyca	1
Introducida	Tulipán africano	4	Introducida	Palma yucca	1
Introducida	Árbol nim	3	Introducida	Palmiche	1
Nativa	Jaboncillo	3	Introducida	Pino araucaria	1
Nativa	Matapalos	3	Introducida	Pino ciprés	1
Introducida	Mirto	3	Introducida	Plátano	1
Nativa	Moral	3			

4.3.3 Áreas verdes por estudiante

En la Figura 27 se muestran los ortomosaicos que desempeñaron un papel fundamental al permitir el cálculo de las áreas de formación vegetal abordadas en el proyecto. Estos mapas también facilitaron la visualización de los cambios experimentados por la institución en sus ocho diferentes categorías de cobertura de nivel 3 y 4, de acuerdo con la clasificación de Corine Land Cover (Cooperation in Europe for the Reporting of the International Nature of Europe). Estas categorías incluyeron tejido urbano continuo y discontinuo, zonas verdes urbanas, instalaciones

recreativas, pastos arbolados, arbustal abierto, tierras desnudas y degradadas, red vial y territorios asociados. El análisis reveló que, para el año 2023, se registraron cambios significativos en la infraestructura gris de la universidad debido a la construcción de un nuevo edificio para el programa de ingeniería civil, un parqueadero de motos y la remodelación de la división de sistemas. También se evidenció una reducción en el tamaño de las zonas verdes en comparación con el año 2017, principalmente debido a la integración de estas áreas en el tejido urbano discontinuo y la remoción de árboles que presentaban riesgos de caída debido a su estado de deterioro. Cabe mencionar que no se consideró la cancha abierta de microfútbol como zona verde en el análisis, ya que su uso difiere del de otras áreas de vegetación en la universidad.

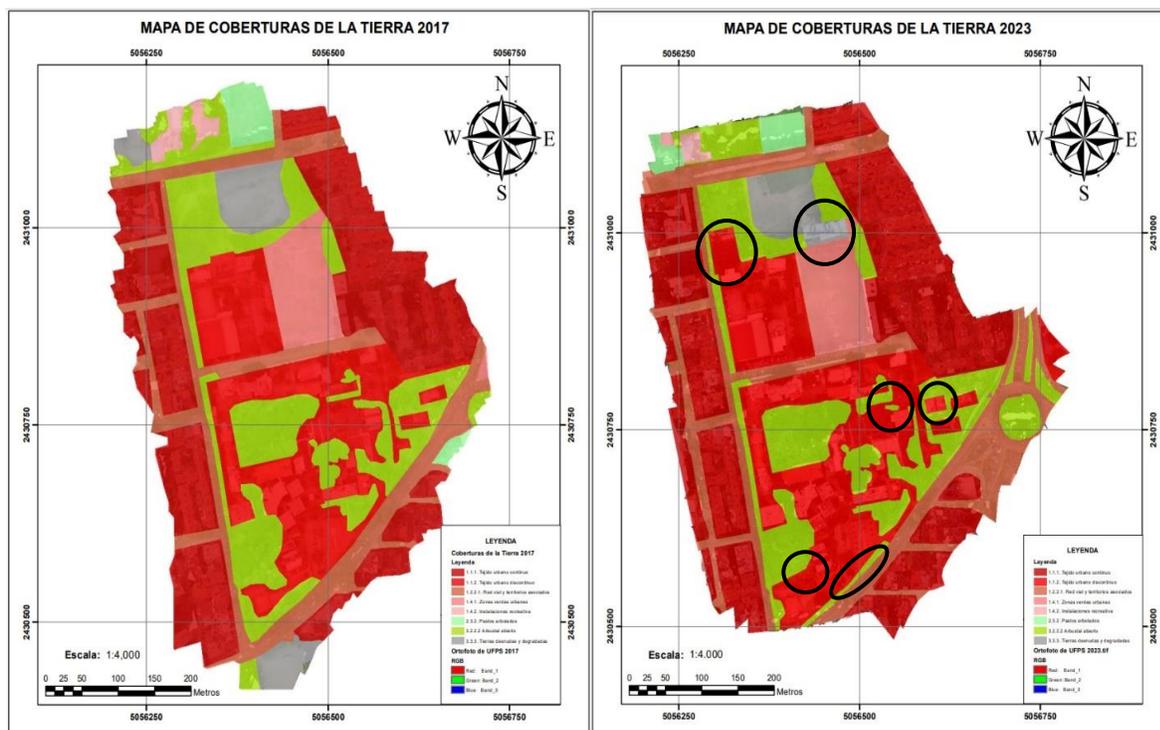


Figura 27. Mapa de coberturas 2017 - 2023

Tanto la cartografía de coberturas entre 2017 y 2023, generada a partir de la clasificación (consultar Anexo 11), como el mapeo de la ubicación de los individuos arbóreos utilizando datos de puntos GPS (ver Anexo 12), junto con el análisis de las áreas verdes en el campus universitario, proporcionaron una valiosa visión del estado ambiental de la Universidad. Se observó inicialmente que cuatro de las coberturas experimentaron un aumento en su área entre 2017 y 2023, estas fueron el tejido urbano continuo, el tejido urbano discontinuo, las zonas verdes urbanas y la red vial y territorios asociados. Por otro lado, las otras cuatro coberturas evidenciaron una disminución en sus áreas, tal como se detalla en la Tabla 27. Es relevante mencionar que una de estas coberturas, el "arbustal abierto," experimentó una reducción de 3,857 m².

Tabla 27. Áreas de coberturas en metros cuadrados

Coberturas de la tierra	Área 2017 (m²)	Área 2023 (m²)	Estado	Diferencia (m²)
1.1.1. Tejido urbano continuo	80.140	83.170	Aumentó	3.031
1.1.2. Tejido urbano discontinuo	58.296	63.332	Aumentó	5.035
1.4.1. Zonas verdes urbanas	12.934	13.021	Aumentó	87,7
1.4.2. Instalaciones recreativas	3.119	1.426	Disminuyó	1.693
2.3.2. Pastos arbolados	5.556	4.257	Disminuyó	1.299
3.2.2.2 Arbustal abierto	54.706	50.849	Disminuyó	3.857
3.3.3. Tierras desnudas y degradadas	12.895	8.856	Disminuyó	4.039
1.2.2.1. Red vial y territorios asociados	36.792	45.258	Aumentó	8.466

Ahora, con la información obtenida del mapeo de coberturas de la tierra en el campus universitario, se calculó que la extensión total de zonas verdes de la cobertura "arbustal abierto" en la universidad comprende los 50,848 metros cuadrados (m²). Este dato se contextualizó

considerando la matrícula estudiantil registrada en el primer semestre de 2023, que ascendió a un total de 15,396 estudiantes, incluyendo modalidades presenciales y a distancia. Como resultado, se estableció que la institución en el presente año proporciona 3.30 m² de área verde por estudiante, el cálculo se basó en la adición de metros cuadrados de áreas verdes y la matrícula total, y se constató, que la institución cumple con las directrices estipuladas en la Norma Técnica Colombiana NTC 4595:2020 significativamente considerando que la normativa sugiere como mínimo brindar 1.5 m² de área verde por estudiante.

5. Discusión

5.1 Evaluación de los registros de información secundaria

La necesidad de mitigar el cambio climático ha impulsado la investigación continua en la estimación de biomasa forestal, debido a que los bosques tienen la capacidad de secuestrar y almacenar el dióxido de carbono (CO₂) en forma de biomasa. Sin embargo, se enfrentan desafíos en el desarrollo de técnicas confiables y precisas para realizar un seguimiento sistemático de los contenidos de carbono en distintos bosques (Cihlar et al., 2002). Según Moukomla et al. (2018), Moeckel et al. (2018), Han et al. (2019) y Poley & McDermid (2020), el método destructivo es preciso pero ineficiente en costos y tiempo, mientras que Issa et al. en 2020 y Torre et al. en 2022, indican que las ecuaciones alométricas son útiles pero costosas a grandes escalas. En consecuencia, las tendencias alternativas han surgido como la opción preferida para la estimación no destructiva, ya que se adaptan eficazmente tanto a los entornos forestales como urbanos. Su capacidad para brindar resultados precisos y reducir el impacto ambiental ha impulsado su crecimiento y aplicación en la investigación científica y la gestión sostenible de los ecosistemas. Estas técnicas no destructivas consideran factores específicos de cada entorno, asegurando una aproximación más precisa y confiable en la cuantificación de este importante parámetro ecológico. A su vez, Torre et al. (2022) asegura que la metodología LiDAR surge como una alternativa eficiente para la estimación de la biomasa aérea, ofreciendo ventajas en costos y evaluación de áreas extensas.

Esta investigación ha dejado claro que no existe una metodología estandarizada para realizar mediciones de biomasa aérea debido a las diversas variables que influyen en el proceso de

estimación (factores bióticos, abióticos y antropológicos), lo que respalda los resultados obtenidos por Stovall et al. (2018); Vittucci et al. (2019) y Mngadi et al. (2021). Por otra parte, hay avances en las técnicas para la estimación de biomasa, no obstante, es necesario investigar más sobre modelos alométricos adaptados a entornos urbanos y el uso de fotogrametría para calcular las métricas de los árboles (DAP y altura) de forma eficaz, de manera similar Burt et al. (2020) y Torre et al. (2022) sugieren la combinación de tecnologías para mejorar la precisión y confiabilidad de las estimaciones. Por lo tanto, para avanzar en la comprensión de la biomasa forestal y su contribución en la mitigación del cambio climático, es necesario adoptar un enfoque multidisciplinario que abarque aspectos ambientales, tecnológicos y metodológicos, lo que permitirá una evaluación más completa y armoniosa de la importancia de los servicios ecosistémicos en la regulación del carbono.

5.2 Estimación del secuestro de carbono de las especies arbóreas y palmas

Los resultados del censo florístico en el campus universitario indican una significativa biodiversidad de árboles, con un total de 1229 individuos distribuidos en 65 especies y 26 familias botánicas. Estos hallazgos reflejan una riqueza de especies arbóreas que es consistente con la diversidad encontrada en otras áreas urbanas y campus universitarios a nivel nacional e internacional, por ejemplo, en la Universidad de Sucre, sede Puerta Roja, se registraron 601 árboles distribuidos en 61 especies (Angulo, 2019). Asimismo, en la Universidad Ecuador Laica Eloy Alfaro de Manabí, ubicada en la ciudad de Manta, Ecuador, se identificaron 68 especies y 1200 individuos (Castillo et al., 2022). En contraste, en la Universidad de California, se contabilizaron 191 árboles pertenecientes a 111 especies (Wu, 2019). Siguiendo el contexto internacional, los autores Murtala et al. (2019), llevaron a cabo su investigación y encontraron

722 árboles, 30 especies y 14 familias arbóreas en un área urbana de Nigeria. De forma similar, en la Universidad Autónoma de Occidente en Cali, en Colombia, se encontraron 260 individuos de 36 especies (Largo, 2017). Lo anterior subraya la variabilidad en la biodiversidad de árboles en diferentes regiones.

En el análisis de la composición de especies arbóreas en el campus universitario se identificaron 42 especies introducidas y 23 especies nativas, en otras palabras, predominan las especies introducidas. Este hallazgo se asemeja con la Universidad Autónoma de Occidente en Cali, donde las especies de origen introducido priman sobre las de origen nativo en su campus (Largo, 2017). También, guarda similitudes con la situación encontrada en la Universidad Ecuador Laica Eloy Alfaro de Manabí, donde se identificaron 38 especies introducidas y 30 especies nativas (Castillo et al., 2022), y, Namood et al. en el 2021 registraron 56 especies nativas y 59 especies introducidas en un área urbana de la ciudad de Lahore, Pakistán.

La presencia de 41 especies introducidas en la Universidad Francisco de Paula Santander (UFPS) supone la necesidad de una elección apropiada de especies donde primen las nativas de acuerdo con el Programa Nacional para la Conservación y Restauración del Bosque Seco Tropical (PNCBST) del 2020, donde se señala la obligación de promover la siembra y plantación de especies nativas en zonas urbanas de bosque seco tropical, dado a que esta elección influye directamente en la capacidad de los árboles para proporcionar servicios ecosistémicos valiosos en entornos urbanos, los cuales están sometidos a procesos urbanísticos y cambios en el paisaje que alteran y disminuyen la prestación de servicios ecosistémicos como lo mencionan en la Política Nacional para la Gestión Integral de la Biodiversidad y sus Servicios Ecosistémicos - PNGIBSE (2012), Vásquez (2016), Quispe (2022) y Valderrama et al. (2023).

Por otro lado, algunas especies sobresalen en términos de abundancia en el campus universitario, como el Oithi, con 282 individuos, seguido por el Árbol Nim con 115 y el Jero con 113. Estos hallazgos son comparables con los resultados de Hernández y Patiño (2017), quienes encontraron que el Oithi y el Árbol Nim también eran las especies más abundantes en su censo de la misma universidad. La realización de estos inventarios permite dar seguimiento a la abundancia y diversidad de especies en la universidad, además están alineados con el Objetivo de Desarrollo Sostenible número 15, la primera línea estratégica del PNCBST de 2020 y el documento del Consejo Nacional de Política Económica y Social - CONPES 4021 de 2020, que enfatizan el compromiso de generar información que sirva de insumo para el establecimiento de acciones de conservación y restauración de bosques a nivel nacional y local, puesto que, los servicios ecosistémicos urbanos se derivan de los procesos y funciones de la biodiversidad.

En cuanto a, la correlación general entre el DAP y la altura de todos los árboles y palmas de la UFPS fue 0,728 lo que se interpretó como una correlación alta positiva, coincidiendo con investigaciones previas, como Jäger (2020) que encontró una correlación lineal alta y positiva no sólo entre el DAP y la altura total de los árboles, sino también, entre el DAP y la edad de los mismos. Además, Wang et al. (2023) informaron correlaciones altas y muy altas entre el DAP y la altura total en diferentes ubicaciones de la provincia de Yunnan, lo que respalda la solidez de esta relación en diversas áreas geográficas.

Sin embargo, un aspecto destacado en este estudio es la falta de normalidad en la distribución de las variables analizadas, lo que respalda los hallazgos de Caselli (2020). Esto sugiere que existen otros factores o variables que afectan la relación entre el DAP y la altura total de los árboles. Algunos de estos factores son propios de las zonas urbanas como lo mencionan

McHale et al. (2017), Magarik et al. (2020) y Jaramillo (2020) quienes indicaron que los árboles urbanos pueden experimentar condiciones diferentes a los árboles rurales, incluyendo podas regulares, menor densidad, estrés ambiental y disponibilidad variable de nutrientes y agua, lo que podría explicar esta falta de normalidad. Lo que supone que, el crecimiento de los árboles en las ciudades es diferente en zonas rurales debido a que estas se encuentran sometidas a menor intervención humana. No obstante, Parra & Hernández (2023) encontraron una correlación significativa entre la altura dominante y las variables edafoclimáticas en una zona poco intervenida, es decir, las condiciones del suelo y el clima también influyen en el crecimiento de los árboles de forma natural. Lo anterior, sugiere que existen variables naturales que influyen en el crecimiento de los árboles y, en entornos urbanos se presentan presiones antropogénicas.

A raíz de la regresión lineal, se encontraron valores atípicos que reflejan condiciones anormales de algunos árboles, como clorosis, pudrición, tumoración, plagas, alta competencia (árboles suprimidos), etiolación, podas y árboles muertos en pie, coincidiendo con los hallazgos de Hernández y Patiño en el 2017. Estos factores influyen significativamente en el crecimiento y el estado de salud de los árboles como se mencionó anteriormente; por ejemplo, las podas hacen que los árboles presenten alturas similares, la etiolación causa que el árbol varíe su estructura vertical en busca de luz, y, la supresión de árboles, pudrición, y plagas pueden ocasionar la muerte del árbol.

Al momento de examinar la relación entre el DAP y la altura total de los árboles por especie, los coeficientes de Pearson presentaron correlaciones que varían desde -0,047 a 0,942, destacando la complejidad de los ecosistemas urbanos, y, la comprensión de este contribuye al campo de la biometría forestal, aportando datos puntuales para la gestión y conservación de los

árboles urbanos de la UFPS en la sede Cúcuta. Es necesario destacar, que algunas especies presentan correlaciones muy bajas o incluso negativas, como el guácimo, lo cual, coincide con los resultados de Castañeda et al. (2021), quienes encontraron una baja correlación entre el DAP y la altura total. Mientras que otras especies como la palma real y el Tulipán africano obtuvieron una correlación alta positiva que respalda lo expuesto por Jäger (2020) y Wang et al., (2023).

Cabe señalar que, los resultados del estudio respaldan los hallazgos de investigaciones previas y resaltan la importancia de considerar múltiples variables y condiciones fitosanitarias al analizar la relación entre el DAP y la altura total de los árboles urbanos, así como las alturas de los diferentes DAP de un mismo árbol. Estos hallazgos ofrecen una base sólida para futuras investigaciones y estrategias de manejo que promuevan la salud y el bienestar de los árboles en entornos urbanos, contribuyendo así a la sostenibilidad de los ecosistemas urbanos y al mejoramiento de la calidad de vida de la comunidad de la UFPS.

Por otra parte, la evaluación precisa de la biomasa aérea también contribuye en la gestión de ecosistemas urbanos, debido a que está directamente relacionada con el secuestro de carbono que es uno de los servicios ecosistémicos de regulación que brindan los árboles. Por ello, se estimó la biomasa aérea empleando una ecuación alométrica propia del ecosistema de bosque seco tropical, que integra la densidad de la madera como una variable significativa, dado que investigaciones previas sugieren que la inclusión de la densidad de la madera, junto con otras variables como la altura, puede mejorar la precisión de las estimaciones (Terán, 2022; Herrera, 2022; Burt et al., 2020; Puc et al., 2020; Marroquín, 2019).

Se tomaron 52 muestras distribuidas en 35 especies de árboles, a partir de ello, se calculó la densidad de la madera promedio por especie para evitar subestimaciones o sobreestimaciones, puesto que los resultados de las especies con más de un individuo muestreado, reveló la variabilidad intraespecífica en las densidades de la madera de los árboles. No obstante, es importante señalar que este enfoque no estuvo exento de limitaciones, ya que se presentaron restricciones en la disponibilidad de laboratorios y se compartió el uso del horno para el secado de las muestras de madera, estas circunstancias podrían haber influido en algunas muestras, donde se observaron incrementos en la masa después de varios intervalos de tiempo de secado, a pesar de que inicialmente había disminuido. Para asegurarnos de que no haya ningún efecto no deseado en los resultados, se seleccionaron los valores de masa más bajos en el cálculo de las densidades de la madera. Estas consideraciones son cruciales para garantizar la robustez y fiabilidad de las estimaciones de biomasa aérea, dada la complejidad de los ecosistemas urbanos y la necesidad de obtener resultados precisos que respalden la toma de decisiones en la gestión y conservación de estos entornos.

En el contexto de la productividad de árboles y palmas, los resultados revelaron que la UFPS - Cúcuta, cuenta con valores significativos en términos de biomasa aérea, almacenamiento de carbono, secuestro de CO₂ y producción de oxígeno. A causa de que en la universidad la biomasa aérea es de 728,64 toneladas por hectárea (ton/ha), una importante reserva de carbono de 364,32 ton/ha que equivale a 1.334,34 ton/ha de CO₂ secuestrado y 970,02 ton/ha de O₂ liberado. Estos valores son comparables con los hallazgos de otros estudios; por ejemplo, en un área de bosque seco tropical, Largo (2017) identificó una reserva de carbono de 46,20 ton/ha, lo que es considerablemente menor a la encontrada en esta investigación. Diferente al estudio realizado en bosques tropicales de India, que almacenaron 336,8 ton/ha (Kothandaraman et al., 2020),

representando un valor similar al encontrado en esta investigación. Además, un bosque históricamente conservado, secuestra 143,9 ton/ha de carbono (Dhyani et al., 2021), una cifra menor a la estimada en un área urbana en Lahore, Pakistán, donde tienen un total de 588,5 ton de carbono secuestrado, señalando que las especies nativas son las que más contribuyen en esta reserva de carbono (Namood et al., 2021).

De manera semejante, en la UFPS - Cúcuta, del primer puesto al doceavo de la lista de mayor secuestro de dióxido de carbono lo ocupan especies nativas y en la cúspide de dicha lista se encuentra el Chiminango. Lo anterior apunta a que las especies nativas representan un mayor aporte en el secuestro de CO₂ a diferencia de las especies introducidas, por ese motivo, Largo (2017) encontró que la cantidad de CO₂ secuestrado en la Universidad Autónoma de Occidente en Cali fue baja, debido a que la mayoría de las especies presentes en el campus son introducidas, lo que concuerda con Namood et al. (2021). Por el contrario, Chamorro y Falconi (2019), encontraron que las especies introducidas destacan sobre las nativas debido a que pueden ser efectivos sumideros de carbono.

En cuanto a las especies que secuestraron mayor cantidad de carbono, el Chiminango, Samán, Cují negro, Camajón y Moral se destacan sobre las demás, lo que difiere al estudio realizado en Sokoto, Nigeria, donde los autores Murtala et al. (2019) destacaron al Árbol Nim y al Mango como las especies que capturan mayor cantidad de carbono en un entorno urbano. A su vez, en la Universidad Popular del Cesar, el Mango, Algarrobito y Urapo son las especies con mayor potencial para las reservas de carbono (Echávez, Pastran y Polo, 2015).

Los hallazgos obtenidos en la presente investigación resaltan la necesidad de continuar fomentando la conservación y restauración de áreas verdes urbanas y bosques secos tropicales como parte integral de la estrategia global para abordar el cambio climático y garantizar un ambiente más saludable (Mahmood et al., 2020; Cifuentes et. al., 2021). Sin embargo, un aspecto crítico por considerar es la limitación relacionada con la estimación de la biomasa aérea. Aunque hemos proporcionado estimaciones de la biomasa basadas en ecuaciones alométricas ampliamente utilizadas, es fundamental reconocer que estas ecuaciones suelen estar diseñadas principalmente para bosques rurales o naturales, es decir, áreas con baja intervención humana. La falta de ecuaciones específicas para zonas urbanas podría haber introducido cierto grado de incertidumbre en los cálculos, ya que los árboles en entornos urbanos pueden experimentar condiciones diferentes, como se mencionó anteriormente. En consecuencia, es importante tener en cuenta que las estimaciones de biomasa aérea pueden no reflejar completamente la realidad en entornos urbanos y destacar la necesidad de desarrollar ecuaciones alométricas adaptadas específicamente a estas áreas en futuras investigaciones.

5.3 Establecimiento de la nemotecnia para la comprensión de sostenibilidad ambiental

Los Bosques Secos Tropicales (Bs-T), a pesar de ser uno de los ecosistemas más amenazados a nivel mundial, aún enfrenta un déficit de conocimiento (Zuluaga & Castro, 2018). En este contexto, la investigación tiene el potencial de abordar y subsanar esa carencia de información desde una perspectiva urbana. Dada la creciente importancia de las áreas urbanas en la conservación de la biodiversidad y la prestación de servicios ecosistémicos, es crucial monitorear la vegetación en las ciudades especialmente en zonas de alta actividad socioeconómica. Es importante destacar que los procesos urbanísticos, independientemente de su

naturaleza, desencadenan cambios profundos en la biodiversidad de áreas específicas (Política Nacional para la Gestión Integral de la Biodiversidad y sus Servicios Ecosistémicos - PNGIBSE, 2012).

En ese sentido, se calculó el Índice de Valor de Importancia (IVI) para identificar las especies dominantes en la universidad y compararlo con las especies destacadas en el secuestro de carbono, puesto a que algunos autores como Zuluaga & Castro (2018) y Dhyani et al. (2021) mencionan que existe una relación directa entre las especies dominantes y su contribución a los servicios ecosistémicos. En la UFPS sede Cúcuta se encontró que las especies con un mayor IVI son el Oithi (16,7%), seguido por el Chiminango (7,3%) y el Jero (6,7%), siendo el Chiminango y Jero especies nativas para bosque seco tropical. Como también, en un ecosistema natural de bosque seco tropical en Sucre, Colombia, las especies que presentaron el IVI más alto fueron *Astronium graveolens* (Diomate) con 95%, *Guazuma ulmifolia* (Guácimo) con 26.3% y *Gliricidia sepium* (Matarratón) con 26.3%, las cuales todas corresponden a especies de origen nativo (Olascuaga, Mercado y Sánchez, 2016). Por otro lado, en un Bs-T de Ecuador, los autores Cabrera et al. (2020), identificaron que la *Azadirachta indica*, comúnmente conocida como el árbol Nim, presentó el índice de valor de importancia más alto, con un 52.22 %. Las diferencias entre los IVI sugieren que existen variaciones significativas en la composición del arbolado entre las áreas estudiadas (Hernández, 2018).

Los resultados del Índice de Valor de Importancia nos indican cuáles son las especies dominantes en nuestro entorno. Aunque los autores Zuluaga & Castro (2018) y Dhyani et al. (2021), destacan una relación directa entre la dominancia de especies y la prestación de servicios ecosistémicos, la presente investigación demuestra que esta afirmación no se cumple por

completo, puesto que, las especies de mayor importancia ecológica en la UFPS, mencionadas anteriormente, solo coinciden de manera parcial con las especies que se destacan en el secuestro de carbono (Chiminango, Samán y Cují negro). Estos hallazgos acentúan la necesidad de evaluar la estructura ecológica de manera holística, considerando tanto los servicios ecosistémicos como la dominancia de especies y otros índices de diversidad biológica.

También, es crucial resaltar la relevancia ecológica de ciertas familias en el estudio, entre ellas, la Fabaceae sobresalió con 18.7%, seguida por la Chrysobalanceae con 10.4% y la Arecaceae con 8.1%. La familia Fabaceae, no sólo destaca por su alto Índice de Valor de Importancia de Familias (IVIF) sino también por la gran cantidad de especies que presenta (10 especies) en comparación con las otras dos, quienes cuentan con 1 y 8 especies, respectivamente. Por lo anterior, se puede inferir que el IVIF no necesariamente está relacionado con la diversidad de especies. Es importante señalar que, el IVIF calculado en la presente investigación respalda los resultados obtenidos por López et al., (2015) en un ecosistema de bosque seco tropical natural en Panamá, donde la familia con mayor relevancia ecológica correspondió a la Fabaceae, representando el 29.7% de IVIF; esto implica que la familia Fabaceae es representativa en Bs-T.

En cuanto a la diversidad de especies, el índice de Shannon desempeña un papel relevante en ecología (Moreira, 2021; Jochner et al., 2018), donde una alta diversidad y una distribución uniforme pueden indicar un ecosistema más estable y saludable. Esto se debe a que diferentes especies pueden desempeñar varios roles y funciones en el ecosistema, haciéndolo más resiliente a los cambios ambientales y las perturbaciones. En la presente investigación, la diversidad de Shannon fue de 3,05 lo que se clasificó como diversidad media en el campus universitario, esto sugiere que hay una variedad significativa de especies, además, el índice de Pielou fue de 0,73,

indicando que se presenta una uniformidad y equidad en términos de diversidad de especies. De forma similar, López et al. (2015) obtuvieron una diversidad alta de 3,13 en el índice de Shannon de un bosque seco tropical no intervenido en Panamá. Asimismo, Ramírez et al. en 2022, registró un índice de diversidad de 3.83 en un Bs-T natural. Por el contrario, los hallazgos obtenidos por Jochner et al. (2018), registraron una diversidad de 1.81 en un entorno urbano de Alemania. Esto demuestra que la universidad, a pesar de estar ubicada en un área urbana, cuenta con una diversidad superior a otras áreas urbanas y similar a la obtenida en un Bs-T natural. Es relevante destacar que las referencias específicas a zonas urbanas son escasas en la literatura, lo cual limita la discusión bajo ese contexto.

Además, en la investigación, se aportó un enfoque adicional al medir la diversidad por sectores, obteniendo que el cuadrante B (aunque tiene una menor cantidad de individuos en comparación con otros cuadrantes) albergó una mayor diversidad de especies, lo que sugiere que la diversidad no depende de la abundancia. Lo anterior sumado a lo expuesto por Kowarik et al., (2020) que indica que la prestación de servicios ecosistémicos está directamente relacionada con la biodiversidad, resalta la necesidad de implementar herramientas estadísticas de diversidad en la planificación y gestión ambiental de la UFPS, y, de esta forma aumentar sostenibilidad del campus.

A su vez, se observó que la función principal función del campus universitario fue el valor ornamental, con 35 especies de origen introducido (como el Azuceno blanco, Árbol nim y Palma areca) y 17 de origen nativo (como Coralito, Urapo y Totumo); lo que se podría explicar con lo expuesto por Xie (2018) quien sugiere que el uso de especies introducidas en áreas verdes urbanas puede ser justificable cuando su principal aporte es su valor ornamental y paisajístico.

Sin embargo, existen estudios que aseguran que algunas especies introducidas, como el Árbol nim, demuestran ser inapropiadas para áreas verdes debido a su comportamiento agresivo y competitivo con otras especies locales (Cristancho, 2020; Castillo et al., 2022). Por ese motivo, la conservación de la biodiversidad no debe considerarse simplemente como un aspecto estético, sino que, debe estar relacionada con la promoción de servicios ecosistémicos para mantener el equilibrio de los mismos como lo asegura Kowarik et al., (2020).

Por otro lado, la función de alimento para la fauna registró 15 especies de origen introducido (entre esas el Mango, Acacia amarilla y Tamarindo) y 15 de origen nativo (Cañahuate, Guanábana, Guácimo, entre otros). Diferente a la tercera función ecosistémica más representativa (proporción de sombra), donde se notó que las especies nativas tenían una mayor presencia que las especies introducidas que corresponde a 16 especies nativas y 12 de origen introducido. Es importante destacar que esta función es especialmente valiosa en un entorno con altas temperaturas, como es el caso de la ciudad de Cúcuta, ya que la sombra ayuda a reducir el efecto de isla de calor causado por la infraestructura gris y, regular el microclima.

En cuanto a las especies que desempeñan múltiples funciones, se observó que las especies nativas cumplen con la mayor cantidad de funciones, como el Urapo con 11 funciones, además del Matarratón y la Ceiba con 10 funciones cada uno y el Chiminango con 8 funciones, los cuales superaron el número de funciones desempeñadas por las introducidas, entre esas la Acacia amarilla que registraron 8 funciones, además del Ficus, Mango y Oithi que contribuyen con 6 funciones cada uno. Es relevante señalar que, el Oithi es la especie más abundante en el campus, sin embargo, no supera la cantidad de funciones brindadas por el Matarratón, la Ceiba y el Urapo, a pesar de que la ceiba solamente cuenta con un individuo. Lo anterior, enfatiza la

importancia de incorporar especies nativas con múltiples funciones en el diseño y planificación de las áreas verdes urbanas, en especial las de la UFPS - Cúcuta.

En relación con el cálculo de área verde por estudiante, se demostró que la Universidad Francisco de Paula Santander sede Cúcuta cumple con los requisitos establecidos por la Norma Técnica Colombiana de ingeniería civil, NTC 4595:2020 para instituciones de educación básica, puesto a que se encuentra un vacío en el marco regulatorio de áreas verdes para instituciones de educación superior. Considerando que, en el año 2023 la institución proporcionó 3,30 metros cuadrados (m^2) de área verde por estudiante, superando el requisito mínimo de $1,5 m^2$ establecido por la norma. Este cumplimiento demuestra el compromiso de la universidad en la gestión y mantenimiento de un entorno universitario sostenible. No obstante, la extensión de áreas verdes disminuyó desde el año 2017 al año 2023, puesto a que en el 2017 se obtuvo una extensión de $54.706 m^2$ de áreas verdes y en el 2023 fue de $50.848 m^2$, esto sugiere, que la expansión de infraestructura al interior de la universidad ha reducido la cobertura vegetal.

Dado a que, el análisis del arbolado reveló su contribución activa en la sostenibilidad ambiental institucional, se infiere que existe una integración del tejido urbano con la flora del campus, facilitando la conectividad de la fauna y sus dinámicas biológicas, como se establece en la Ley 388 de 1997. Las áreas verdes también satisfacen el bienestar físico y espiritual de la comunidad alineándose con el Decreto 2811/1974, artículo 302, que enfatiza la importancia de las áreas verdes en zonas urbanas para promover el bienestar. Estos resultados sirven como base para futuras decisiones y acciones orientadas hacia la promoción de un entorno más sostenible y saludable en el campus universitario.

6. Conclusiones

En la evaluación de información secundaria se encontró que existen métodos destructivos y no destructivos en la estimación de biomasa aérea, actualmente demostró un incremento en el uso de técnicas de teledetección y vuelos aéreos no tripulados debido su eficacia en la estimación de biomasa aérea a gran escala, sin embargo, siguen habiendo vacíos de información, por ese motivo, se decidió que el método adecuado en el contexto de la Universidad Francisco de Paula Santander sede Cúcuta de estudio fueron las ecuaciones alométricas propias del ecosistema de bosque seco tropical, puesto que aportan mayor precisión de resultados y son prácticas para estudios de mediana escala.

Los resultados del secuestro de carbono indicaron que los árboles y palmas de la universidad secuestra 1.334,34 toneladas de dióxido de carbono (CO_2) por hectárea y producen 970,02 toneladas de oxígeno (O_2) por hectárea. Además, la especie arbórea con mayor contribución en el secuestro de carbono y atenuación del cambio climático es el Chiminango (73,2 ton CO_2), seguido por el Samán, Cují negro y Camajón, las cuales, todas corresponden a especies de origen nativo y en promedio secuestran 65,50 ton CO_2 , 39,99 ton CO_2 , 27,46 ton CO_2 , en el mismo orden mencionado.

Se estableció una nemotecnia (cartilla) como estrategia de divulgación de los hallazgos obtenidos en la investigación, los cuales destacan la importancia ecológica de los árboles y palmas de la universidad, además consolida el aporte de estos en la sostenibilidad ambiental desde el enfoque de los servicios ecosistémicos, específicamente, el secuestro de carbono y regulación del clima.

7. Recomendaciones

En este ecosistema de bosque seco tropical, se observó que ciertas especies, como el Chiminango, Samán, Cují negro, Camajón y Moral, son origen nativo y muestran ser las especies que secuestran carbono en mayor medida, por lo tanto, es conveniente la promoción de estas especies en la Universidad Francisco de Paula Santander, sede Cúcuta.

Las especies de árboles, palmas, pinos y arbustos desempeñan diversas funciones ecosistémicas. Es fundamental tener en cuenta las funciones descritas en este documento al momento de elegir las especies que van a satisfacer necesidades específicas, como embellecimiento, regulación climática, valor cultural, reducción de ruido, entre otras.

Las especies actualmente presentaron afectaciones fitosanitarias como clorosis, pudrición, tumoración y plagas por eso se aconseja realizar revisiones periódicas para determinar el estado fitosanitario de los árboles como estrategia de gestión, manejo y preservación de la biodiversidad del campus universitario, dado que es un factor que afecta el crecimiento de los árboles y su desempeño en la prestación de servicios ecosistémicos.

Los resultados de este estudio permitieron comprender la importancia de las especies florísticas en el entorno universitario, por ello, se sugiere continuar analizando los servicios ecosistémicos a nivel institucional tanto en la sede Cúcuta como en otras sedes de la institución.

Debido a que ya se cuenta con el inventario florístico de la universidad actualizado, se propone elaborar un herbario que permita fortalecer la base de investigación en el campo de la botánica y ecología

Referencias

- Abbas, S., Wong, M., Wu, J., Shahzad, N., & Irteza, S. (2020). Approaches of satellite remote sensing for the assessment of above-ground biomass across tropical forests: Pan-tropical to national scales. *Remote Sensing*, 12(20), 1-38. <https://doi.org/10.3390/rs12203351>
- Abich, A., Alemu, A., Gebremariam, Y., Mucheye, T., Gurebiyaw, K., & Kassie, M. (2021). Allometric models for predicting aboveground biomass of Combretum-Terminalia woodlands in Amhara, Northwest Ethiopia. *Trees, Forests and People*, 5, 100122. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2021.100122>
- Acuña, L., Andrade, H., Segura, M., Sierra, E., Canal, D., & Greñas, O. (2021). Mitigation of greenhouse gas emissions from households by urban woodland in Ibagué-Colombia. *Ambiente & Sociedade*, 24, e01911. <https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc20200191vu202113ao>
- Alcázar, c., Avella, E., Norden, N., García, N., Castellanos, C., Hernán, D., & González, R. (2021). *Programa nacional para la conservación y restauración del bosque seco tropical en Colombia. Plan de Acción 2020-2030* (Ospina, O.). Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. <http://hdl.handle.net/20.500.11761/36000>
- Angeoletto, F., Essy, C., Ruiz Sanz, J. P., Silva, F. F. D., Albertin, R. M., & Santos, J. W. M. C. (2015). Ecología Urbana: La Ciencia Interdisciplinaria del Planeta Ciudad. *Desenvolvimento em Questão*, 13(32), 6. <https://doi.org/10.21527/2237-6453.2015.32.6-20>

- Angulo, S. (2019). *Secuestro de carbono y confort térmico del arbolado en la universidad de sucre sede puerta roja, Sincelejo, Colombia*. [Tesis de pregrado, Universidad de Sucre].
<https://repositorio.unisucre.edu.co/bitstream/handle/001/1050/T581.542%20A594.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Arias, F. (2012). *El Proyecto De Investigación. Introducción a la metodología científica* (6a ed.). Episteme.
https://tauniversity.org/sites/default/files/libro_el_proyecto_de_investigacion_de_fidias_g_arias.pdf
- Attis, H. (2015). *Relaciones Entre La Estructura Forestal Y El Rendimiento Del Bosque De Nothofagus alpina Y Nothofagus obliqua En Gradientes De Edad Y Calidad De Sitio* [Tesis de doctorado, Universidad Nacional del Comahue].
<http://rdi.uncoma.edu.ar/handle/uncomaid/16144>
- Bastian, O., Haase, D., & Grunewald, K. (2012). Ecosystem properties, potentials and services – The EPPS conceptual framework and an urban application example. *Ecological Indicators*, 21, 7–16. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.03.014>
- Boa, E. (2008). *Guía Ilustrada sobre el estado de salud de los árboles*. Reconocimiento e interpretación de síntomas y daños.
- Bravo, B. S. (2022). *Estimación de la captura de CO2 en el bosque forestal de quinual (Polylepis sp), para mitigar el cambio climático en el Centro Poblado de la Quinua,*

Yanacancha, Pasco—2020 [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión]. <http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/2593>

Briones, Q. J. M. (2023). *Secuestro del dióxido de carbono (CO₂) y la producción de oxígeno (O₂) de las especies forestales en los parques públicos del Sector 1 del distrito de Santa Anita* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Federico Villarreal].
<https://repositorio.unfv.edu.pe/handle/20.500.13084/6633>

Burt, A., Calders, K., Cuni-Sanchez, A., Gómez-Dans, J., Lewis, P., Lewis, S. L., Malhi, Y., Phillips, O. L., & Disney, M. (2020). Assessment of Bias in Pan-Tropical Biomass Predictions. *Frontiers in Forests and Global Change*, 3, 12.
<https://doi.org/10.3389/ffgc.2020.00012>

Cabrera, C., Macías, C., Cevallos, C., Morán, J., & Verdezoto, R. (2020). Áreas verdes y arbolado en la zona urbana del cantón Jipijapa. *Ciencia y Tecnología*, 13(2), Article 2.
<https://doi.org/10.18779/cyt.v13i2.392>

Cabudivo, K. (2017). *Secuestro De CO₂ Y Producción De Oxígeno En Árboles Urbanos De La Av. Abelardo Quiñones - Distrito San Juan Bautista, Loreto – Perú*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de la Amazonia Peruana].
https://repositorio.unapiquitos.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12737/4694/Kelvin_Tesis_Titulo_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Calaza, P. (2019). *Guía de la Infraestructura Verde Municipal*.

https://redbiodiversidad.es/sites/default/files/GUIA_Biodiversidad_CAPITULOS1_5.pdf

Calle, A. (2022). *Servicios ecosistémicos del arbolado urbano de los espacios públicos del valle del río Aburrá en Medellín* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia].

<https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/84732/1037614000.2023.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

Calle, Z., & Murgueitio, E. (2020). *Árboles nativos para predios ganaderos. Especies focales del Proyecto Ganadería Colombiana Sostenible*. s.l.: CIPAV.

Casas, L. (2013). *Variación de Biomasa Aérea y Densidad de Madera en Bosques de Tierras Bajas con Planos de Inundación de Aguas Negras y Aguas Blancas*. [Tesis de maestría, Universidad de los Andes].

<https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/12047/u670543.pdf?sequence=1>

Caselli, M. (2020). *Crecimiento de Austrocedrus chilensis y Nothofagus dombeyi en bosques mixtos y condiciones ambientales para el desarrollo de sus renovales: Contribuciones al manejo de rodales afectados por el mal del ciprés* [Tesis de doctorado, Universidad Nacional de La Plata]. <https://doi.org/10.35537/10915/93076>

Castañeda, S., Argüelles, J., Zuluaga, J., Moreno, J., Castañeda, S., Argüelles, J., Zuluaga, J., & Moreno, J. (2021). Evaluación de la variabilidad fenotípica en *Simarouba amara* Aubl.,

mediante descriptores cualitativos y cuantitativos. *Orinoquia*, 25(1), 67–77.

<https://doi.org/10.22579/20112629.656>

Castillo, G., & Cabrera, C. (2023). *Análisis del arbolado y áreas verdes de la zona urbana del cantón Manta* [Tesis de pregrado, Universidad Estatal del Sur de Manabí].

<http://repositorio.unesum.edu.ec/handle/53000/4817>

Castillo, R., Bello, V., Loor, Y., & Ayón, C. (2022). Captura de carbono del arbolado de la

Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, Ecuador. *Iberoamericana Ambiente &*

Sustentabilidad, 5. <https://doi.org/10.46380/rias.vol5.e262>

Cedeño, L. (2022). Estudio Florístico en el Jardín Temático de Barriles, Volcán, Provincia de

Chiriquí, República de Panamá. *Nicaragüense de Biodiversidad*, 79, 34.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.7200052>

Chamorro, M., & Falconi, S. (2019). *Potencial de secuestro de carbono por los árboles en los*

parques urbanos de los Distritos de El Tambo, Huancayo y Chilca [Tesis de pregrado,

Universidad Nacional del Centro del Perú].

<https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/5140>

Chapin, F. S., Kofinas, G. P., & Berkes, F. (Eds.). (2009). Conservation, Community, and

Livelihoods: Sustaining, Renewing, and Adapting Cultural Connections to the Land. En

Principles of ecosystem stewardship: Resilience-based natural resource management in a

changing world (1st ed, p. 407). Springer.

Choudhury, M., Marcheggiani, E., Despini, F., Costanzini, S., Rossi, P., Galli, A., & Teggi, S.

(2020). Urban tree species identification and carbon stock mapping for urban green planning and management. *Forests*, 11(11), 1-22. <https://doi.org/10.3390/f11111226>

Choudhury, M., Marcheggiani, E., Galli, A., Modica, G., & Somers, B. (2021). Mapping the urban atmospheric carbon stock by LiDAR and worldview-3 data. *Forests*, 12(6).

<https://doi.org/10.3390/f12060692>

Cifuentes, M., Brenes, R., Pérez, C., Corrales, L., Vargas, M., Betbeder, J., Vargas, G., Guerrero,

A., & Fung McLeod, E. (2021). *Islas De Calor Y Regulación De La Temperatura En La Ciudad: Rol De Los Espacios Verdes*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.12832.51202>

Cihlar, J., Denning, S., Ahem, F., Arino, O., Belward, A., Bretherton, F., Cramer, W., Dedieu,

G., Field, C., Francey, R., Gommès, R., Gosz, J., Hibbard, K., Igarashi, T., Kabat, P., Olson,

D., Plummer, S., Rasool, I., Raupach, M., ... Wickland, D. (2002). Initiative to quantify terrestrial carbon sources and sinks. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 83(1),

1. <https://doi.org/10.1029/2002EO000002>

Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial Política de Gestión

ambiental Urbana. Bogotá, D.C. Colombia, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 2008. ISBN: 978-958-8491-14-1.

Comisión Nacional Forestal [CONAFOR], (s.f). *Innovación forestal*.

http://www.conafor.gob.mx/innovacion_forestal/?page_id=436

Congreso de Colombia. (1989). Ley 9 de 1989. Por la cual se dictan normas sobre planes de desarrollo municipal, compraventa y expropiación de bienes y se dictan otras disposiciones. 11 de enero de 1989.

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=1175>

Congreso de Colombia. (1997). Ley 388 de 1997. Por la cual se modifica la Ley 9 de 1989, y la Ley 2 de 1991 y se dictan otras disposiciones. 18 de julio de 1997.

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=339>

Congreso de Colombia. (2012) Ley 119 de 2012. Por medio de la cual se otorgan beneficios tributarios para las construcciones ambientalmente sostenibles y se dictan otras disposiciones. 6 de septiembre del 2012. <https://vlex.com.co/vid/proyecto-ley-2012-ca-mara-451032878>

Congreso de Colombia. (2021). Ley 2169 de 2021. Por medio de la cual se impulsa el desarrollo bajo en carbono del país mediante el establecimiento de metas y medidas mínimas en materia de carbono neutralidad y resiliencia climática y se dictan otras disposiciones. 22 de diciembre de 2021. Edición 51.896. <https://acmineria.com.co/acm/wp-content/uploads/2022/01/Ley-N0002169-de-2021-1.pdf>

CONPES 3918 [Departamento Nacional de Planeación]. Estrategia para la implementación de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) en Colombia. 15 de marzo de 2018. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3918.pdf>

CONPES 4021 del 2020. *Consejo nacional de política económica y social* - República de Colombia, Departamento nacional de planeación. 21 de diciembre de 2020.

<https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/4021.pdf>

Cortes, A., & Varón, C. (2018). *Efecto de borde sobre la vegetación emergente en áreas fragmentadas de piedemonte en la reserva forestal protectora caño vanguardia y quebrada vanguardiano, Villavicencio – Meta*. [Tesis de pregrado, Universidad Santo Tomás].

<https://repository.usta.edu.co/handle/11634/13673>

Crippa, M., Guizzardi, D., Pisoni, E., Solazzo, E., Guion, A., Muntean, M., Florczyk, A., Schiavina, M., Melchiorri, M., & Hutfilter, A. F. (2021). Global anthropogenic emissions in urban areas: Patterns, trends, and challenges. *Environmental Research Letters*, 16(7),

074033. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac00e2>

Cristancho, F. (2020). *Propiedades y cualidades del árbol de Neem (Azadiractha indica a. Juss) como especie promisorio en arreglos agroforestales* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia].

<https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/36562/Facristanchov.pdf?sequence=3&isAllowed=y>

Dai, Z., Johnson, K., Birdsey, R., Hernández, J., & Dupuy, J. (2015). Assessing the effect of Climate change on carbon sequestration in a Mexican dry forest in the Yucatan Peninsula. *Ecological Complexity*, 24, 46-56. <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2015.09.004>

Decreto 1076 2015. Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible.

25 de agosto de 2023. D. O. No. 49.523.

Decreto 2811 de 1974. Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales

Renovables y de Protección al Medio Ambiente. 18 de diciembre de 1974.

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=1551>

Dhyani, S., Singh, A., Gujre, N., & Joshi, R. (2021). Quantifying tree carbon stock in historically

conserved Seminary Hills urban forest of Nagpur, India. *Acta Ecologica Sinica*, 41(3), 193-

203. <https://doi.org/10.1016/J.CHNAES.2021.01.006>

Diéguez Aranda, U. (2005). *Prácticas de dasometría*. Unicopia.

Duval, V., Benedetti, G., & Baudis, K. (2022). Confort térmico producido por la vegetación

arbórea en el macrocentro de Bahía Blanca (Argentina). *Ecología Austral*, 32(2), 502–515.

<https://doi.org/10.25260/EA.22.32.2.0.1814>

Echávez, K., Pastran, Y., & Polo, Á. (2015). Estimación Del Co2 Emitido Y Capturado En La

Sede Sabanas Y El Campus Deportivo De La Universidad Popular Del Cesar. *Ambiental*

Agua, Aire y Suelo, 6(2). <https://doi.org/10.24054/aaas.v6i2.805>

Establecimiento Público Ambiental de Cartagena. (2015). Guía Ilustrada De Árboles Para

Cartagena De Indias. [https://observatorio.epacartagena.gov.co/guia-ilustrada-de-arboles-](https://observatorio.epacartagena.gov.co/guia-ilustrada-de-arboles-para-cartagena-de-indias/)

[para-cartagena-de-indias/](https://observatorio.epacartagena.gov.co/guia-ilustrada-de-arboles-para-cartagena-de-indias/)

- Fassina, V. (2015). *ASTM D2395—Density and Specific Gravity (Relative Density) of Wood / PDF / Density / Wood*. Scribd. <https://www.scribd.com/document/261628389/ASTM-D2395-Density-and-Specific-Gravity-Relative-Density-of-Wood>
- Feliciano J. (2021). Guía para la consolidación y documentación de los levantamientos fotogramétricos a través del programa Agisoft-Metashape.
<http://repositorio.unimagdalena.edu.co/handle/123456789/5611>
- Fong, C., Manavvi, S., Priya, R., Ramakreshnan, L., Sulaiman, N., & Aghamohammadi, N. (2023). Traits of Adaptive Outdoor Thermal Comfort in a Tropical Urban Microclimate. *Atmosphere*, 14(5), 852. <https://doi.org/10.3390/atmos14050852>
- G. Poley, L., & J. McDermid, G. (2020). A Systematic Review of the Factors Influencing the Estimation of Vegetation Aboveground Biomass Using Unmanned Aerial Systems. *Remote Sensing*, 12(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/rs12071052>
- Galindo, L. (2018). *Variación intraespecífica de rasgos funcionales de Cedrela odorata sobre un gradiente climático en la Península de Nicoya, Costa Rica* [Tesis de maestría, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza].
<https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/8762>
- Genesis, G. (2017). *Valoración económica del secuestro de co2 en dos tipos de bosque en el distrito de urarinas, loreto-perú-2016*. [Tesis de pregrado, Escuela de Formación Profesional de Ecología de Bosques Tropicales].

https://repositorio.unapiquitos.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12737/4606/Grimilda_Tesis_T%c3%adtulo_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Gobierno de Colombia. (2021). Estrategia Climática de Largo Plazo de Colombia para Cumplir con el Acuerdo de París (E2050). MinAmbiente, DNP, CANCELLEERÍA, AFD, Expertise France, WRI. Proyecto elaborado con recursos de la Facilidad 2050, Francia. Bogotá D.C., Colombia.

Gómez, A. (2017). Tecnicas para el proceso de busqueda, acceso y seleccion de informacion digital: Los operadores. *Publicaciones Didacticas*.

Gómez, E., Fernando, D., Aponte, G., & Betancourt, L. (2014). Metodología para la revisión bibliográfica y la gestión de información de temas científicos, a través de su estructuración y sistematización. *DYNA: revista de la Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín*, 81(184), 158-163.

Gómez, N., & Velázquez, G. (2018). Asociación entre los espacios verdes públicos y la calidad de vida en el municipio de Santa Fe, Argentina. Cuadernos de Geografía. *Colombiana de Geografía*, 27(1), 164-179. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v27n1.58740>

Grimm, N. B., Faeth, S. H., Golubiewski, N. E., Redman, C. L., Wu, J., Bai, X., & Briggs, J. M. (2008). Global Change and the Ecology of Cities. *Science*, 319(5864), 756–760. <https://doi.org/10.1126/science.1150195>

- Groenendijk, P., Bongers, F., & Zuidema, P. (2017). Using tree-ring data to improve timber-yield projections for African wet tropical forest tree species. *Forest Ecology and Management*, 400, 396-407.
- Guerrero, N. (2020). *Alternativas Para La Reducción De Contaminantes Atmosféricos Emitidos Por El Sistema Vehicular En Bogotá D.C.* [Tesis de pregrado, Universidad Católica de Colombia]. <https://hdl.handle.net/10983/24784>
- Gutiérrez, G., & Ricker, M. (2014). *Manual para tomar virutas de madera con el barreno de Pressler en el Inventario Nacional Forestal y de Suelos.*
<http://rgdoi.net/10.13140/RG.2.1.2730.9925>
- Han, L., Yang, G., Dai, H., Xu, B., Yang, H., Feng, H., Li, Z., & Yang, X. (2019). Modeling maize above-ground biomass based on machine learning approaches using UAV remote-sensing data. *Plant Methods*, 15(1), 10. <https://doi.org/10.1186/s13007-019-0394-z>
- Hernandez, J., Gómez, M., Rodewald, A., Rueda, X., Anunu, C., Bennett, R., & van Es, H. (2018). Quality as a Driver of Sustainable Agricultural Value Chains: The Case of the Relationship Coffee Model. *Business Strategy and the Environment*, 27(2), 179-198.
<https://doi.org/10.1002/bse.2009>
- Hernández, M. (2018). *Diversidad, estructura y captura de CO2 de la flora urbana del municipio de Galeras, Departamento de Sucre, Colombia* [Tesis de pregrado, Universidad de Sucre]. <http://repositorio.unisucre.edu.co/handle/001/614>

- Hernández, M., y Patiño, P. (2017). *Plan de manejo del arbolado ornamental de la Universidad Francisco de Paula Santander, sede Cúcuta 2018*. [Tesis de pregrado no publicada, Universidad Francisco de Paula Santander].
- Herrera, J. (2022). *Ecuaciones alométricas para estimar biomasa aérea y carbono en *Polylepis racemosa* en un bosque relicto ubicado en la comunidad de Bella Andina, Chota, Cajamarca* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Autónoma de Chota].
<https://repositorio.unach.edu.pe/handle/20.500.14142/348>
- Huera, T., Salas, A., Changoluisa, D., & Bravo, C. (2020). Towards sustainable urban planning for puyo (Ecuador): Amazon forest landscape as potential green infrastructure. *Sustainability (Switzerland)*, 12(11). <https://doi.org/10.3390/su12114768>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2020). *NTC 4595: Requisitos para la planificación, diseño, establecimiento y mantenimiento de áreas verdes urbanas*. Bogotá, Colombia: ICONTEC.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Departamento Nacional de Planeación, & Cancillería. (2016). *Inventario Nacional Y Departamental De Gases Efecto Invernadero – Colombia*. (Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático). IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA, FMAM.

Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. (s. f.). La biodiversidad y los servicios ecosistémicos. Recuperado 7 de junio de 2022, de <http://www.humboldt.org.co/es/biodiversidad/que-es-la-biodiversidad>

Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. (2014). *Bosques secos tropicales en Colombia*. <http://www.humboldt.org.co/en/research/projects/developing-projects/item/158-bosques-secos-tropicales-en-colombia>

IPCC, 2018: *Anexo I: Glosario* [Matthews J.B.R. (ed.)]. En: Calentamiento global de 1,5 °C, Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias correspondientes que deberían seguir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, en el contexto del reforzamiento de la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, el desarrollo sostenible y los esfuerzos por erradicar la pobreza [Masson-Delmotte V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor y T. Waterfield (eds.)].

Issa, S., Dahy, B., Ksiksi, T., & Saleous, N. (2020). A Review of Terrestrial Carbon Assessment Methods Using Geo-Spatial Technologies with Emphasis on Arid Lands. *Remote Sensing*, 12(12), 2008. <https://doi.org/10.3390/rs12122008>

Jäger, S. (2020). Stand Structure in a Heterogeneous Old-growth Norway Spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) Forest in Northern Sweden. <https://gupea.ub.gu.se/handle/2077/67002>

Jaramillo, L. (2020). *Analisis Cualitativo Del Crecimiento Diametrico Del Arbolado Del Tdea En Relacion Con Parametros De Copa* [Tesis de pregrado, Tecnológico de Antioquia, Institución Universitaria]. <https://dspace.tdea.edu.co/handle/tdea/1492>

Jiang, Z., Owens, P., Ashworth, A., Fuentes, B., Thomas, A., Sauer, T., & Wang, Q. (2022). Evaluating tree growth factors into species-specific functional soil maps for improved agroforestry system efficiency. *Agroforestry Systems*, 96(3), 479–490. <https://doi.org/10.1007/s10457-021-00693-9>

Jochner, S., Stitz, T., Jetschni, J., & Cariñanos, P. (2018). The Influence of Individual-Specific Plant Parameters and Species Composition on the Allergenic Potential of Urban Green Spaces. *Forests*, 9(6), Article 6. <https://doi.org/10.3390/f9060284>

Jones, I. L., DeWalt, S. J., Lopez, O. R., Bunnefeld, L., Pattison, Z., & Dent, D. H. (2019). Above- and belowground carbon stocks are decoupled in secondary tropical forests and are positively related to forest age and soil nutrients respectively. *Science of The Total Environment*, 697, 133987. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133987>

Joshi, V., Negi, V., Bisht, D., Sundriyal, R., & Arya, D. (2021). Allometric models for estimating aboveground biomass of selected homestead tree species in the plain land Narsingdi district of Bangladesh temperate forests in the Central Himalaya, India. *Trees, Forests and People*, 6. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2021.100147>

- Jucker, T., Asner, G., Dalponte, M., Brodrick, P., Philipson, C., Vaughn, N., Arn Teh, Y., Brelsford, C., Burslem, D., Deere, N., Ewers, R., Kvasnica, J., Lewis, S., Malhi, Y., Milne, S., Nilus, R., Pfeifer, M., Phillips, O. L., Qie, L., ... Coomes, D. A. (2018). Estimating aboveground carbon density and its uncertainty in Borneo's structurally complex tropical forests using airborne laser scanning. *Biogeosciences*, 15(12), 3811-3830.
<https://doi.org/10.5194/bg-15-3811-2018>
- Khan, I. A., Khan, W. R., Ali, A., & Nazre, M. (2021). Assessment of Above-Ground Biomass in Pakistan Forest Ecosystem's Carbon Pool: A Review. *Forests*, 12(5), 586.
<https://doi.org/10.3390/f12050586>
- Kothandaraman, S., Dar, J. A., Sundarapandian, S., Dayanandan, S., & Khan, M. L. (2020). Ecosystem-level carbon storage and its links to diversity, structural and environmental drivers in tropical forests of Western Ghats, India. *Scientific Reports*, 10(1), 13444.
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-70313-6>
- Kowarik, I., Fischer, L., & Kendal, D. (2020). Biodiversity Conservation and Sustainable Urban Development. *Sustainability*, 12(12), Article 12. <https://doi.org/10.3390/su12124964>
- Lahoti, S., Lahoti, A., Joshi, R. K., & Saito, O. (2020). Vegetation Structure, Species Composition, and Carbon Sink Potential of Urban Green Spaces in Nagpur City, India. *Land*, 9(4), 107. <https://doi.org/10.3390/land9040107>

Largo, B. (2017). *Biomasa Y Fijación De Carbono En El Campus De La Universidad Autónoma De Occidente* [Tesis de pregrado, Universidad Autónoma de Occidente].

<https://red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/10389/T08050.pdf?sequence=4&isAllowed=y>

Lind, D. A., Wathen, S. A., & Marchal, W. G. (2012). Regresión lineal y correlación. En J.

Mares & M. Zapata (Eds.), *Estadística Aplicada A Los Negocios Y La Economía*. (15a ed.).

McGraw-Hill.

Lobo Mateos, M. (2020). *Modelo de regresión lineal y tablas de contingencias aplicados a jugadores de pádel* [Tesis de pregrado, Universidad de Sevilla]

<https://idus.us.es/handle/11441/107231>

Lomelí, R. (2023). Un Análisis de valuación hedónica sobre departamentos en el área metropolitana de Monterrey. *Vinculatégica EFAN*, 9(1), 84–100.

<https://doi.org/10.29105/vtga9.1-220>

López, O., Pérez, R. & Mariscal, E. (2015). Diversidad de árboles y arbustos en fragmentos de bosque seco tropical en Rio Hato, Panamá. *Colombia Forestal*, 18(1), 105-115

Magarik, Y., Roman, L., & Henning, J. (2020). How should we measure the DBH of multi-stemmed urban trees?. *Urban Forestry & Urban Greening*, 47, 126481.

<https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.126481>

Mahecha, G., Sánchez, F., Chaparro, J., Cadena, H., Tovar, G., Villota, L., Morales, G., Castro, J., Bocanegra, F., & Quintero, M. (2010). Arbolado urbano de Bogotá: Identificación, descripción y bases para su manejo (1. ed). Alcaldía Mayor de Bogotá.

Mahmood, H., Siddique, M., Abdullah, S., Islam, S., Matieu, H., Iqbal, M., & Akhter, M. (2020). Semi-Destructive Method to Derive Allometric Aboveground Biomass Model for A Village Forest in Bangladesh: Comparison of Regional and Pantropical Models. *Journal Of Tropical Forest Science*, 32(3), 246–256. <https://doi.org/10.26525/jtfs2020.32.3.246>

Marroquín, P. (2019). *Ajuste De Ecuaciones Alométricas Para Estimar Biomasa Aérea En Una Plantación De Teca (Tectona Grandis L. F.) En Yucatán, México*. [Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León]. <https://eprints.uanl.mx/18026/>

Maturana, D., Andrade, V., Maturana, D., & Andrade, V. (2019). La relación entre la formalización de las prácticas de gestión humana y la productividad de las mipymes. Un artículo de revisión. *Innovar*, 29(74), 101-113. <https://doi.org/10.15446/innovar.v29n74.82091>

McHale, M., Hall, S., Majumdar, A., & Grimm, N. (2017). Carbon lost and carbon gained: A study of vegetation and carbon trade-offs among diverse land uses in Phoenix, Arizona: A. *Ecological Applications*, 27(2), 644–661. <https://doi.org/10.1002/eap.1472>

Mercado, J., & Coronado, J. (2021). El muestreo y su relación con el diseño metodológico de la investigación. En *Manual De Temas Nodales De La Investigación Cuantitativa. Un Abordaje Didáctico*. (Primera, pp. 95–96). Universidad Pedagógica de Durango.

Miah, Md. D., Islam, K. N., Kabir, Md. H., & Koike, M. (2020). Allometric models for estimating aboveground biomass of selected homestead tree species in the plain land Narsingdi district of Bangladesh. *Trees, Forests and People*, 2, 100035.
<https://doi.org/10.1016/j.tfp.2020.100035>

Miles, L., Newton, A. C., DeFries, R. S., Ravilious, C., May, I., Blyth, S., Kapos, V., & Gordon, J. E. (2006). A global overview of the conservation status of tropical dry forests. *Journal of Biogeography*, 33(3), 491–505. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2005.01424.x>

Millennium Ecosystem Assessment [MEA]. (2005). *Ecosystems and human well-being: Synthesis*. Island Press.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible e Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. (2017). *Biodiversidad y Servicios Ecosistémicos en la Planificación y Gestión Ambiental Urbana*. https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/BIODIVERSIDAD_Y_SERVICIOS_ECOSISTEMICOS_EN_LA_PLANIFICACION_Y_GESTION_AMBIENTAL_URBANA.pdf

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2012). Política Nacional Para La Gestión Integral De La Biodiversidad Y Sus Servicios Ecosistémicos (PNGIBSE). 958-8343-71-6

- Mngadi, M., Odindi, J., & Mutanga, O. (2021). The utility of sentinel-2 spectral data in quantifying above-ground carbon stock in an urban reforested landscape. *Remote Sensing*, 13(21). <https://doi.org/10.3390/rs13214281>
- Moeckel, T., Dayananda, S., Nidamanuri, R., Nautiyal, S., Hanumaiah, N., Buerkert, A., & Wachendorf, M. (2018). Estimation of Vegetable Crop Parameter by Multi-temporal UAV-Borne Images. *Remote Sensing*, 10(5), 805. <https://doi.org/10.3390/rs10050805>
- Montes, M., y Pérez, D. (2018). *Valoración Socioeconómica De Los Servicios Ecosistémicos Provisos Por El Ecosistema De Bosque Seco Tropical Presente En El Distrito Regional De Manejo Integrado (DMI) Luriza, Departamento Del Atlántico* [Tesis de pregrado, Universidad De La Costa Cuc]. <https://repositorio.cuc.edu.co/bitstream/handle/11323/211/1051361917%20-%201140891135.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Montiel, K., Detlefsen, G., & Ureña, C. (2020). Árboles y palmas emblemáticos de las Américas (M. Otero & M. Ibrahim, Eds.). Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.
- Morales, A., & Sarmiento, D. (2008). Árboles del Bosque Seco Tropical en el área del Parque Recreativo y Zoológico Piscilago- Nilo Cundinamarca (primera edición). Universidad Autónoma de Colombia.
- Moreira, G & Vélez, J. (2023). *Índice verde urbano para la elaboración de un plan de manejo de áreas verdes en la Parroquia Ángel Pedro Giler, Tosagua—Manabí* [Tesis de pregrado,

Escuela superior politécnica agropecuaria de Manabí].

<http://repositorio.espam.edu.ec/handle/42000/2126>

Moreira, M. (2021). *Evaluación de la Composición y estructura del bosque seco tropical del sector Membrillal del valle Sancán* [Tesis de pregrado, Universidad Estatal del Sur de Manabí]. <http://repositorio.unesum.edu.ec/handle/53000/2942>

Moukomla, S., Siripon, S., Wasuhiranyrith, R., Kooha, P., & Srestasathiern, P. (2018).

Estimating above ground biomass for eucalyptus plantation using data from unmanned aerial vehicle imagery. *Remote Sensing*, 13. <https://doi.org/10.1117/12.2323963>

Murtala, D., Manaf, L. A., Ramli, M. F., Yacob, M. R., & Makmom, A. A. (2019). Quantifying the aboveground biomass and carbon storage of urban tree species in sokoto metropolis, north-western Nigeria. *Planning Malaysia*, 17(2), 179-190.

<https://doi.org/10.21837/pmjournal.v17.i10.639>

Namood-e-Sahar, Kishwar, F., Tahir, A., & Ullah, M. (2021). Capitalizing Trees for Carbon Sequestration as a Co-Benefit of Biophilic Urbanism. *Proceedings of the Pakistan Academy of Sciences: Part B*, 58(4), 5-15. [https://doi.org/10.53560/PPASB\(58-4\)671](https://doi.org/10.53560/PPASB(58-4)671)

Nava, A., Santiago, W., Rodríguez, G., Santos, H., Ruiz, F., Santiago, E., Suárez, M. (2020).

Ecuaciones dinámicas de crecimiento en altura dominante e índice de sitio para *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. *Revista fitotecnica mexicana*, 43(4), 461–470.

<https://doi.org/10.35196/rfm.2020.4.470>

Objetivos de Desarrollo Sostenible. Son el plan maestro para conseguir un futuro sostenible para todos al 2030. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-development-goals/>

Olascuaga, D., Mercado, J. & Sánchez, L. (2016). Análisis de la vegetación sucesional en un fragmento de bosque seco tropical en Toluviejo-Sucre (Colombia). *Colombia Forestal*, 19(1), 23-40.

Ortiz, H., Escobar, C., y Sepulveda, S. (2018). Análisis estadístico de variables climatológicas en la ciudad de Cúcuta. *Respuestas*, 23(1), 39–44. <https://doi.org/10.22463/issn.0122-820X>

Oviantari, M. V., Gunamantha, I. M., Ristiati, N. P., Santiasa, I. M. P. A., & Astariani, P. P. Y. (2018). Carbon sequestration by above-ground biomass in urban green spaces in Singaraja city. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 200. doi:10.1088/1755-1315/200/1/012030

Palacio Ortega, M. T. (2018). *Evaluación Del Crecimiento Del Arbolado Urbano Del Tdea, Período 2018—2020* [Tesis de pregrado, Tecnológico de Antioquia, Institución Universitaria]. <https://dspace.tdea.edu.co/bitstream/handle/tdea/1497/Informa%20Trinidad%20Palacio.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Pan, Y., Birdsey, R. A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P. E., Kurz, W. A., Phillips, O. L., Shvidenko, A., Lewis, S. L., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Pacala, S. W.,

McGuire, A. D., Piao, S., Rautiainen, A., Sitch, S., & Hayes, D. (2011). A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests. *Science*, 333(6045), 988–993.

<https://doi.org/10.1126/science.1201609>

Parra, A., & Hernández, C. (2023). *Calidad de sitio e influencia de las condiciones edafoclimáticas en plantaciones de Hevea brasiliensis. En tres municipios de Casanare* [Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander].

<https://noesis.uis.edu.co/server/api/core/bitstreams/580a42a4-5aad-49be-a009-f029ad8eeaf2/content>

Pasantes, J., & Bonifaz, C. (2022). Caracterización del bosque húmedo primario de la Estación Biológica Pedro Franco Dávila, Provincia Los Ríos, Ecuador. *Revista Científica Ciencias Naturales y Ambientales*, 16(1), Article 1. <https://doi.org/10.53591/cna.v16i1.1597>

Paz, M., & AVECILLAS, M. (2021). Indicadores bibliométricos: Origen, definición y aplicaciones científicas en el Ecuador. *Espí-ritu Emprendedor TES*, 5(1), Article 1.

<https://doi.org/10.33970/eetes.v5.n1.2021.253>

Plan de Desarrollo Municipal. Cúcuta 2050, estrategia de todos (2020-2023) [Gabinete Municipal]. https://www.asocapitales.co/nueva/wp-content/uploads/2020/11/Cucuta_Plan-de-Desarrollo-Municipal_2020-2023.pdf

Plan Nacional de Desarrollo. (03 de mayo de 2023). Colombia Potencia Mundial de la Vida. Bogotá.

- Polania, K. (2019). *Biomasa Aérea En Estados Sucesionales Del Bosque Seco Tropical En El Norte Del Tolima, Colombia* [Tesis de pregrado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas].
<https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/15488/PolaniaClevesKarenAstrid2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Puc, R., Ángeles, G., Valdéz, J., Reyes, V., Dupuy, J., Schneider, L., Pérez, P., & García, X. (2020). Allometric equations to estimate above-ground biomass of small-diameter mixed tree species in secondary tropical forests. *iForest - Biogeosciences and Forestry*, 13(1), 165–174. <https://doi.org/10.3832/ifor3167-013>
- Quispe, A. N. (2022). *Reserva De Carbono Y Retención De Material Particulado En Árboles Del Campus De La Pontificia Universidad Católica Del Perú* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Agraria La Molina].
<https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/5425>
- Ramírez, W., Ayoví, N. E. (2022). Estructura y composición arbórea del bosque seco tropical en el valle Sancán, Manabí, Ecuador. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, 10(2), 169-181.
- Rangel, J. y Martínez, N. (2017). Comparación de los ensamblajes de escarabajos copronecrófagos (Scarabaeidae: Scarabaeinae) entre fragmentos de bosque seco tropical y la matriz adyacente en el departamento del Atlántico-Colombia. *Revista Mexicana. Biodiversidad*, 88 (2), 389-401.

- Reino, D. (2019). *Estimación De Los Servicios Ecosistémicos De Regulación (Secuestro De Carbono) En Los Parques De La Ciudad De Latacunga*. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica De Cotopaxi]. <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/5944>
- Rendon, M. (2017). *Introducción a la teoría de conjuntos, los operadores booleanos y la teoría del concepto para profesionales de la información documental*. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Investigaciones Bibliotecológicas y de la Información. <https://doi.org/10.22201/iibi.9786070294853e.2017>
- Requena, B. (2014). *Muestreo no probabilístico*. Universo Formulas. <https://www.universoformulas.com/estadistica/inferencia/muestreo-no-probabilistico/>
- Resolución 1447 del 2018 [Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible]. Por la cual se reglamenta el sistema de monitoreo, reporte y verificación de las acciones de mitigación a nivel nacional de que trata el artículo 175 de la Ley 1753 de 2015, y se dictan otras disposiciones. 01 de agosto del 2018. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/01/15.-Resolucion-1447-de-2018.pdf>
- Rodríguez, L. (2022). *Capacidad De Retención De Partículas Sedimentables En La Especie Codiaeum Sp Y Terminalia Catappa, En Cuatro Parques De La Ciudad De San Ramon, Provincia De Chanchamayo, 2020* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria De La Selva]. <https://repositorio.unas.edu.pe/handle/20.500.14292/2287>

- Samson, R. (2017). Introduction: Urban Trees as Environmental Engineers. En D. Pearlmutter, C. Calfapietra, R. Samson, L. O'Brien, S. Krajter Ostoić, G. Sanesi, & R. Alonso Del Amo (Eds.), *The Urban Forest* (Vol. 7, pp. 3–5). Springer International Publishing.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-50280-9_1
- Sánchez, L. (2023). *Estimación de la biomasa aérea y carbono almacenado de los árboles de la zona urbana del Parque Nacional Enrique Olaya Herrera a partir del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)* [Tesis de especialista, Universidad Antonio Nariño].
https://repositorio.uan.edu.co/bitstream/123456789/8309/1/2023_LuisAntonioSanchezNovoa.pdf
- Santiago, W., Ángeles, G., Quiñonez, G., De Los Santos, H., & Rodríguez, G. (2020). Avances y perspectivas en la modelación aplicada a la planeación forestal en México [Advances and perspectives in modeling applied to forest planning in Mexico]. *Madera Bosques*, 26, 1–16.
<https://doi.org/10.21829/myb.2020.2622004>
- Schafer, L., Lysák, M., & Henriksen, C. (2019). Tree layer carbon stock quantification in a temperate food forest: A peri-urban polyculture case study. *Urban Forestry and Urban Greening*, 45. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.126466>
- Sepúlveda, Y. L., Díez, M. C., Osorio, N. W., Moreno, F. H., & León, J. D. (2014). Caracterización de los síntomas visuales de deficiencias nutricionales de plántulas del roble andino en invernadero. *Agronomía Costarricense*. <https://doi.org/10.15517/rac.v38i1.15164>

Smaliychuk, A., & Latocha-Wites, A. (2023). Climate change adaptation policy and practice: Case study of the major cities in Poland. *Cities*, *141*, 104474.

<https://doi.org/10.1016/j.cities.2023.104474>

Sociedad Española de Ciencias Forestales [SECF]. (s.f). Diccionario Forestal.

https://secforestales.org/diccionario_forestal_secf?title=diversidad

Souza, A., & Longhi, S. J. (2019). Disturbance history mediates climate change effects on subtropical forest biomass and dynamics. *Ecology and Evolution*, *9*(12), 7184-7199.

<https://doi.org/10.1002/ece3.5289>

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

Su, H., Shen, W., Wang, J., Ali, A., & Li, M. (2020). Machine learning and geostatistical approaches for estimating aboveground biomass in Chinese subtropical forests. *Forest Ecosystems*, *7*(1). <https://doi.org/10.1186/s40663-020-00276-7>

Szumacher, I., & Malinowska, E. (2013). The Urban Ecosystem Services and the City of Warsaw as an Example. *Revista del CESLA*, (16), 81–108.

Terán, C. (2022). Estimación De Carbono Aéreo En Bosques Secos De Dos Parroquias Ubicadas En La Cuenca Media Del Río Mira. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica Del Norte].
<http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/12108>

Tetemke, B. A., Birhane, E., Rannestad, M. M., & Eid, T. (2019). Allometric Models for Predicting Aboveground Biomass of Trees in the Dry Afromontane Forests of Northern Ethiopia. *Forests*, *10*(12), 1114. <https://doi.org/10.3390/f10121114>

Torre, L., Bastarrika, A., Boyano, A., Lopez, J., & Graña, M. (2022). Above-ground biomass estimation from LiDAR data using random forest algorithms. *Journal of Computational Science*, *58*, 101517. <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2021.101517>

Ulloa-Delgado, Giovanni Andrés. (2016). *Aspectos ecológicos del bosque seco tropical en el Caribe colombiano*. <https://observatorio.epacartagena.gov.co/wp-content/uploads/2016/08/1-Aspectos-Ecologicos-BST.pdf>

Valderrama, C., Ceron, A., Herrera, J., & Diaz, L. (2023). Análisis de la agroforestería urbana: Una revisión sistemática y análisis bibliométrico. *Colombia forestal*, *26*(2), 77–91.
<https://doi.org/10.14483/2256201X.19981>

Vásquez, A. E. (2016). Infraestructura verde, servicios ecosistémicos y sus aportes para enfrentar el cambio climático en ciudades: El caso del corredor ribereño del río Mapocho en Santiago de Chile. *Revista de geografía Norte Grande*, *63*, 63–86. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022016000100005>

- Velasco, E., & Chen, K. W. (2019). Carbon storage estimation of tropical urban trees by an improved allometric model for aboveground biomass based on terrestrial laser scanning. *Urban Forestry and Urban Greening*, 44. <https://doi.org/SANESI>
- Visús, D. V. (2022). *Estimación de la biomasa forestal con imágenes de Sentinel-2 para la mejora de la gestión forestal en zonas mediterráneas* [Tesis de doctorado, Universidad Politécnica de Madrid]. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=316044>
- Vittucci, C., Vaglio Laurin, G., Tramontana, G., Ferrazzoli, P., Guerriero, L., & Papale, D. (2019). Vegetation optical depth at L-band and above ground biomass in the tropical range: Evaluating their relationships at continental and regional scales. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 77, 151-161. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.01.006>
- Wang, V., Gao, J., & Schwendenmann, L. (2020). Assessing changes of urban vegetation cover and aboveground carbon stocks using LiDAR and Landsat imagery data in Auckland, New Zealand. *International Journal of Remote Sensing*, 41(6), 2140–2158. <https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1685716>
- Wilkes, P., Disney, M., Vicari, M. B., Calders, K., & Burt, A. (2018). Estimating urban above ground biomass with multi-scale LiDAR. *Carbon Balance and Management*, 13(1). <https://doi.org/10.1186/s13021-018-0098-0>

- Wu, J. (2019). Developing general equations for urban tree biomass estimation with high-resolution satellite imagery. *Sustainability (Switzerland)*, 11(16).
<https://doi.org/10.3390/su11164347>
- Xie, C. (2018). Tree Diversity In Urban Parks Of Dublin, Ireland. *Fresenius Environmental Bulletin*, 27(12), 8695–8708.
https://www.researchgate.net/publication/329611447_TREE_DIVERSITY_IN_URBAN_PARKS_OF_DUBLIN_IRELAND
- Yang, M., Zhou, X., Liu, Z., Li, P., Tang, J., Xie, B., & Peng, C. (2022). A Review of General Methods for Quantifying and Estimating Urban Trees and Biomass. *Forests*, 13(4). Scopus.
<https://doi.org/10.3390/f13040616>
- Yepes, A., Pillhips, J., Duque, Á., Cabrera, K., García, M., Navarrete, D., Álvarez, E., & Ordoñez, M. (2011). *Protocolo para la estimación nacional y subnacional de biomasa-carbono en Colombia*. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
<http://koha.ideam.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=4471580>
- Zea, J., Fonseca, R., & Balseiro, E. (2015). *Manual de Silvicultura Urbana para Barranquilla*. Alcaldía de Barranquilla.
- Zhao, Li, Zhou, Qiu, & Wu. (2019). Site-Specific Allometric Models for Prediction of Above- and Belowground Biomass of Subtropical Forests in Guangzhou, Southern China. *Forests*, 10(10), 862. <https://doi.org/10.3390/f10100862>

Zuluaga, L. y Castro, E. (2018). Valoración De Servicios Ambientales Por Secuestro De CO₂ En Un Ecosistema De Bosque Seco Tropical En El Municipio De El Carmen De Bolívar, Colombia. *Revista Luna Azul*, 47: 01-20, ISSN 1909-2474. doi: 10.17151/luaz.2019.47.1

Anexos

Anexo 1. Análisis bibliométrico.

Anexo 2. Formato censo florístico.

Anexo 3. Formato laboratorio densidades.

Anexo 4. Matriz revisión literaria.

Anexo 5. Censo florístico

Anexo 6. Correlación 2023

Anexo 7. Laboratorio densidades de madera

Anexo 8. Biomasa aérea

Anexo 9. Nemotecnia secuestro de carbono del arbolado UFPS

Anexo 10. Índices y funciones ecosistémicas

Anexo 11. Mapa de coberturas 2017 y 2023

Anexo 12. Mapa individuos arbóreos UFPS

El presente documento incluye una serie de anexos que complementan y respaldan la investigación realizada en el marco de este proyecto de grado.

La información detallada, datos adicionales y material complementario se encuentran disponibles en carpeta adjunta, los cuales se han organizado sistemáticamente para facilitar la comprensión y verificación de los resultados obtenidos.