



**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)**

**Luis Antonio Sánchez Novoa**

11792222506

**Universidad Antonio Nariño**

Especialización en Sistemas de Información Geográfica

Facultad de Ingeniería Ambiental y Civil

Bogotá, Colombia

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)**

**Luis Antonio Sánchez Novoa**

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:  
**Especialista en Sistemas de Información Geográfica**

Director:

Ing. Wilmar Jair Gómez

**Universidad Antonio Nariño**

Especialización en Sistemas de Información Geográfica

Facultad de Ingeniería Ambiental y Civil

Bogotá, Colombia

2023



## NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado titulado  
Estimación de 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),  
Cumple con los requisitos para optar  
Al título de Especialista en Sistemas de Información Geográfica.

---

Firma del Tutor

---

Firma Jurado

---

Firma Jurado

Bogotá, 6 05 2023

**Contenido****Pág.**

<b>Resumen .....</b>	<b>7</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Planteamiento del Problema.....</b>	<b>10</b>
<b>Justificación .....</b>	<b>12</b>
<b>Objetivos.....</b>	<b>14</b>
<b>Antecedentes .....</b>	<b>15</b>
<b>Marco Teórico.....</b>	<b>18</b>
<b>Diseno Metodológico .....</b>	<b>23</b>
<b>Resultados .....</b>	<b>31</b>
<b>Conclusiones.....</b>	<b>38</b>
<b>Referencias Bibliográficas .....</b>	<b>39</b>

### Lista de Figuras

<b>Figura 1.</b> Área de estudio .....	23
<b>Figura 2.</b> Árboles del Parque Nacional Enrique Olaya Herrera .....	31
<b>Figura 3.</b> Árboles seleccionados para el muestreo aleatorio simple .....	32
<b>Figura 4.</b> Regresión lineal DAP vs Ht .....	34
<b>Figura 5.</b> Visualización del cálculo del NDVI.....	35
<b>Figura 6.</b> Regresión lineal NDVI vs BA.....	36

## Lista de Tablas

<b>Tabla 1.</b> Características de las imágenes Landsat 8 .....	27
<b>Tabla 2.</b> Clasificación del NDVI.....	30
<b>Tabla 3.</b> Información del muestreo .....	33
<b>Tabla 4.</b> Estimación de BA y carbono almacenado mediante modelo alométrico .....	34
<b>Tabla 5.</b> Estimación de BA y carbono almacenado mediante NDVI.....	37

## Lista de Símbolos y Abreviaturas

### Abreviatura Término

---

<i>3D</i>	Tres dimensiones
<i>BA</i>	Biomasa Aérea
<i>bh-MB</i>	Bosque Húmedo Montano Bajo
<i>CAP</i>	Circunferencia a la altura de pecho
<i>CO<sub>2</sub></i>	Dióxido de carbono
<i>DAP</i>	Diámetro del tronco a la altura del pecho
<i>DOS</i>	Dark Object Substraction
<i>EVI</i>	Índice de Vegetación Mejorado
<i>Ha</i>	Hectáreas
<i>Ht</i>	Altura total
<i>IDRD</i>	Instituto Distrital de Recreación y Deporte
<i>JBB</i>	Jardín Botánico de Bogotá
<i>Kg</i>	Kilogramos
<i>NDVI</i>	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada
<i>NIR</i>	Infrarrojo cercano
<i>PNMC</i>	Parque Nacional Montaña de Celaque
<i>Rc</i>	Reflectancia corregida
<i>Ro</i>	Reflectancia original
<i>SAVI</i>	Índice de Vegetación Ajustado al Suelo
<i>SCP</i>	Semi-Automatic Classification Plugin
<i>SFFI</i>	Santuario de Fauna y Flora de Iguaque
<i>Ton</i>	Toneladas
<i>UM</i>	Unidades muestrales
<i>USGS</i>	United States Geological Survey
<i>VMR</i>	Valor mínimo de reflectancia

## Resumen

Se llevó a cabo la estimación de la biomasa aérea y carbono almacenado de la zona urbana del Parque Nacional Enrique Olaya Herrera ubicado en la ciudad de Bogotá, Colombia. Para lograr esto, se utilizó un modelo generado mediante una regresión polinómica, usando como variable predictora el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), el cual arrojó un  $R^2$  de 0.0128. Esos resultados se evaluaron con respecto a los calculados mediante un modelo alométrico ajustado para la zona de vida de bosque húmedo montano bajo (bh-MB) que usa como variable predictora el diámetro a la altura de pecho (DAP). Los DAP de los árboles presentes en el parque se obtuvieron mediante un modelo que usa como variable predictora la altura total (Ht) de los árboles y fue ajustado a partir de un muestreo aleatorio simple que midió el DAP del 1.14% de la totalidad de los árboles y que tuvo un error de muestreo de 6.54% arrojando un  $R^2$  de 0.7756.

Palabras clave: biomasa aérea, carbono almacenado, NDVI, modelo alométrico, regresión.

### Abstract

The estimation of the aboveground biomass and stored carbon in the urban area of Enrique Olaya Herrera National Park located in Bogotá, Colombia was carried out. To achieve this, a model generated by polynomial regression was used, using the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) as the predictor variable, which yielded an  $R^2$  of 0.0128. These results were evaluated in relation to those calculated using an allometric model adjusted for the life zone of the low montane rainforest (bh-MB), which uses diameter at breast height (DAP) as the predictor variable. The DAP of the trees in the park was obtained using a model that uses total height (Ht) of the trees as the predictor variable and was adjusted from a simple random sampling the measured the DAP of 1.14\$ of all trees with a sampling error of 6.54%, yielding an  $R^2$  of 0.7756.

Keywords: aboveground biomass, stored carbon, NDVI, allometric model, regression.

## Planteamiento del Problema

En la actualidad, la humanidad se enfrenta a uno de los problemas más severos que ponen en riesgo su supervivencia en el planeta, debido a que han detectado cambios en el motor principal de su funcionamiento: el clima (Bautista & Torres, 2003). El calentamiento global es el aumento de la temperatura media de la superficie terrestre como resultado del incremento de concentraciones de gases de efecto invernadero. Es bien conocido que la liberación de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), lo fijan los árboles en sus estructuras vivas (Cardona et al., 2020). Según Streck & Scholz (2006), los bosques actúan como almacenes de carbono y así juegan un papel importante en la mitigación del cambio climático.

El aumento de la preocupación sobre el tema de cambio climático produjo investigaciones que buscan cuantificar los efectos del arbolado urbano en el  $\text{CO}_2$  atmosférico; la mayoría de estos estudios establecen que los bosques urbanos pueden ser importantes receptores de carbono, sin embargo, se observa una falta de información acerca de la biomasa del arbolado urbano (Aguaron & McPherson, 2012).

Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es estimar el carbono almacenado en la zona urbana del Parque Nacional Enrique Olaya Herrera mediante técnicas de teledetección. Hay varias metodologías que emplean la percepción remota en estudios locales dirigidos a la estimación de biomasa y carbono. Varias de ellas usan píxeles individuales, o grupos de ellos como unidad de análisis. Entre estos métodos están los paramétricos, como el ajuste de modelos matemáticos mediante regresión entre las variables de interés y los datos espectrales de las imágenes de satélite (Labrecque et al., 2006).

El estudio de la estimación de carbono almacenado en la zona urbana del Parque Nacional Enrique Olaya Herrera es relevante porque permitirá ampliar los conocimientos en cuanto a la capacidad de los ecosistemas urbanos de mitigar los efectos del cambio climático, teniendo en cuenta que de acuerdo a González Jurado (2022). la presión de la urbanización sobre las áreas verdes, así como la baja disponibilidad de espacio público de calidad para los habitantes de Bogotá, revela la importancia de evaluar los servicios ecosistémicos urbanos para la toma de decisiones en relación con la planificación ambiental de la ciudad.

## Justificación

El presente trabajo permitirá conocer la cantidad de biomasa aérea y carbono almacenado en los árboles de la zona urbana del Parque Nacional Enrique Olaya Herrera, lo que tiene un impacto directo en la calidad del aire, la mitigación del cambio climático y la sostenibilidad del ecosistema urbano, sobre todo, teniendo en cuenta que los principales proveedores de servicios ecosistémicos para las ciudades son los parques, el arbolado urbano y, las áreas seminaturales como cerros (Reyes, 2019).

Según Vashum & Jayakumar (2012), la biomasa aérea constituye la mayor parte de los depósitos de carbono en los ecosistemas forestales, razón por la cual, la obtención de resultados de este proyecto comprobará la viabilidad de usar técnicas de teledetección para estimar biomasa aérea y carbono, teniendo en cuenta que esta es una tarea difícil, especialmente en zonas con estructuras de condiciones ambientales complejas (Lu, 2006).

La investigación en servicios ecosistémicos urbanos ha incrementado considerablemente en los últimos años; sin embargo en el caso Latinoamericano y especialmente en el caso colombiano es bajo el número de publicaciones sobre este tema (Romero-Duque et al., 2020). Por tal razón, la estimación del carbono almacenado en el parque, podría contribuir a la generación de políticas públicas y programas de manejo de zonas verdes urbanas que promuevan la conservación y el aumento de la cobertura vegetal en Bogotá. Adicionalmente, los resultados del proyecto podrían ser utilizados por organizaciones que busquen compensar sus emisiones de gases de efecto invernadero y mejorar su huella de carbono.

Este proyecto permitirá adquirir conocimientos y habilidades en el manejo de técnicas de teledetección y análisis de datos geospaciales, además de desarrollar la capacidad de realizar

investigaciones en el campo de la ecología urbana y la mitigación del cambio climático. Los resultados de este trabajo podrían ser usados para tomar decisiones que beneficien a la población y al medio ambiente de la ciudad de Bogotá.

## Objetivos

### Objetivo General

Obtener la cantidad de biomasa aérea y carbono almacenado en los árboles de la zona urbana del Parque Nacional Enrique Olaya Herrera de Bogotá a partir del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).

### Objetivos Específicos

Obtener la biomasa aérea y carbono almacenado por hectárea, de los árboles presentes en la zona urbana del Parque Nacional Enrique Olaya Herrera de Bogotá a partir del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).

Obtener la biomasa aérea y carbono almacenado por hectárea, de los árboles presentes en la zona urbana del Parque Nacional Enrique Olaya Herrera de Bogotá mediante un modelo alométrico.

Obtener los diámetros del tronco a la altura de pecho de los árboles dentro del Parque Nacional Enrique Olaya Herrera mediante un modelo obtenido a través de una regresión.

Obtener el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) de cada uno de los árboles dentro del Parque Nacional Enrique Olaya Herrera.

Evaluar los resultados de la obtención de la cantidad de biomasa aérea y carbono almacenado mediante técnicas de teledetección con respecto a los obtenidos mediante un modelo alométrico.

### **Antecedentes**

En 2011, Deng et al., cuantificaron y mapearon los valores económicos del sumidero de carbono y las reservas del ecosistema forestal. Este caso de estudio se aplicó en la provincia de Zhejiang en el sureste de China, para cuantificar y mapear los valores del sumidero de carbono de la vegetación y el carbono del suelo del ecosistema forestal. Se empleó el método de fotosíntesis combinado con el método de biomasa forestal, el método de volumen del fuste y el tipo de suelo para calcular el secuestro de carbono en el suelo.

Orellana en 2012, estimó la biomasa y carbono almacenado en siete tipos de cobertura del suelo de la zona núcleo del Parque Nacional Montaña de Celaque (PNMC) ubicado entre los departamentos de Lempira, Copán, y Ocotepeque en Honduras siguiendo la metodología REDD-GIZ.

Martínez-Barrón en 2014, presentó las relaciones encontradas entre los datos espectrales obtenidos con el sensor Landsat y las variables forestales de biomasa y carbono en bosques del estado de Durango. Para realizar las estimaciones y relaciones se utilizó el método de regresión lineal múltiple. Los resultados obtenidos mostraron una alta correlación entre las variables forestales y los índices espectrales relacionados con la humedad de la vegetación.

En 2016 Liu et al., estimaron cuantitativamente la biomasa, el almacenamiento de carbono y la densidad de carbono de la vegetación forestal con base en el modelo de regresión de datos geocientífico de detección remota de biomasa con ayuda de técnicas de teledetección y sistemas de información geográfica. Los resultados mostraron la estimación de la biomasa aérea y la distribución de la biomasa en el noreste y sureste de Chingqing en China.

Tang et al. en 2016, estimaron la capacidad de almacenamiento y secuestro de carbono de los árboles de Beijing, China a partir de datos procedentes de levantamientos de terreno, mediciones de crecimiento de los árboles y anuarios estadísticos gubernamentales. Los resultados mostraron que la densidad de carbono y la tasa de secuestro de carbono en los árboles de las calles de Beijing posee una magnitud similar a la de los bosques no urbano de China. Sin embargo, el secuestro total de carbono de los árboles de las calles de Beijing fue equivalente a alrededor del 0.2% de sus emisiones anuales de CO<sub>2</sub>.

Cardona et al. (2020), realizaron la estimación de la captura de carbono de un relicto de bosque urbano de la Universidad del Quindío que recibe el nombre de “Jardín Botánico Cedro Rosado” a través de técnicas que integran mediciones in situ y teledetección (índices de vegetación diferencial normalizado, índices de vegetación diferencial mejorado, etc.).

Perea-Ardila et al. (2020), estimaron la biomasa aérea y el carbono con técnicas de teledetección en bosques del Santuario de Fauna y Flora de Iguaque (SFFI) en Boyacá, Colombia. Se correlacionaron los datos de campo de 9 parcelas temporales de muestreo con el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo y el Índice de Vegetación Mejorado (NDVI, SAVI, EVI) derivados de dos imágenes Landsat 8.

En 2020 Veneros, valoró económicamente el servicio ecosistémico de almacenamiento y secuestro de carbono según los usos y coberturas del suelo mediante el uso de fotogrametría, teledetección y sistemas de información geográfica en el Fundo Estancia – región de San Martín. Los resultados mostraron el valor de las posibles ganancias que podrían ser negociadas en los mercados de carbono.

Zhang & Shao en 2020, evaluaron la biomasa de la vegetación urbana en las islas de Hengqin, Macao combinando levantamientos LiDAR e imágenes Landsat y MODIS. Para esto utilizaron datos LiDAR para ampliar el tamaño de la muestra y junto a las imágenes de alta resolución clasificar las áreas de vegetación urbana y estimar cuantitativamente la biomasa. La variación espacial y temporal de la biomasa se analizó comparando la precisión de cinco modelos diferentes.

Raqeeb et al. en 2021, realizaron un estudio en el distrito de Diamer de Gilgit-Baltistan en Pakistán para investigar el cambio de las coberturas de uso del suelo, particularmente el uso del suelo forestal, así como el potencial de secuestro de carbono de los bosques del distrito durante los últimos 25 años, a partir de datos Landstat.

En 2022 Dang et al., realizaron un estudio en el que calcularon la biomasa de la vegetación de la selva tropical en la meseta de Kon Ha Nung en Vietnam, según cuatro modelos de regresión basados en datos de imágenes satelitales Sentinel-2, mapas de reservas forestales y datos de celdas estándar de estudios forestales, demostrando el modelo con mayor precisión, estimando la biomasa, desarrollando mapas de biomasa y analizando las fluctuaciones de biomasa para el período del 2016 al 2021.

Li et al. (2022), utilizaron el modelo de balance de carbono-oxígeno basado en tecnología SIG para analizar el balance carbono-oxígeno de los bosques urbanos en la zona montañosa del sur de Jinan, China. Los resultados arrojaron una tendencia decreciente del balance del oxígeno respecto al carbono, con la disminución del área forestal y el aumento en el consumo de energía fósil de 2000 a 2019 en la zona de estudio.

## Marco Teórico

### Biomasa

Según Newbould (1967), la biomasa se define como la suma total de materia orgánica que se encuentra en un ecosistema de un momento dado y se expresa en términos de unidades de peso por unidad de superficie. De acuerdo a Pedrasa (1989), la estimación de la biomasa de un bosque es de suma importancia pues permite estimar las cantidades potenciales de diversos productos y combustibles (carbono, saponinas, etc.). Esta determinación puede realizarse con métodos directos (tradicional o destructiva) o indirectos. Los primeros consisten en cortar, secar y pesar el material (Fernández, 2004). Los segundos se basan en estimaciones visuales, medidas de altura, volúmenes de los pastos, fotografías, uso de imágenes satelitales (Medina et al., 2009). Diversos estudios científicos han utilizado diferentes métodos indirectos para estimar la biomasa y la productividad de relictos naturales.

### Biomasa aérea

A través del proceso de fotosíntesis los bosques capturan  $\text{CO}_2$ , lo fijan en sus estructuras vivas, lo acumulan en su biomasa y lo transfieren al mantillo en descomposición, y así se constituyen reservas de carbono (Vásquez & Arellano, 2012). La mayor cantidad de carbono que se almacena en los árboles se fija a través del proceso de la fotosíntesis y se acumula en la biomasa aérea (BA) (Roy & Ravan, 1996). La biomasa aérea proporciona estimaciones del carbono en la vegetación forestal, ya que aproximadamente el 50% de la biomasa es carbono (Brown, 1997).

### Modelo alométrico

De acuerdo a Jauregui (2016), la alometría es una de las metodologías más usadas para la estimación de la BA. Esta metodología permite hacer estimaciones indirectas de la biomasa. El diámetro del árbol es una variable relativamente fácil de medir en campo, es decir el error es bajo en la toma de datos y estima muy bien la biomasa (Chave et al., 2005).

Los modelos alométricos son ecuaciones matemáticas que permiten estimar el volumen, biomasa o carbono de árboles, arbustos y palmas en función de unas pocas variables de fácil medición, tales como el diámetro del tronco a la altura del pecho (DAP) y/o la altura total (Parresol, 1999).

### Secuestro de carbono

El secuestro de carbono en el suelo se basa en el proceso de transformación del CO<sub>2</sub> atmosférico a carbono orgánico almacenado en el mismo (Mariscal, 2008). Según Snowdon et al. (2002), la acumulación de carbono corresponde a una estimación del contenido de carbono de cada componente muestreado de la masa vegetal en estudio. Los bosques naturales son de gran importancia para comprender las dinámicas ecológicas del planeta (Brown, 1997), considerando que la biomasa forestal es un importante reservorio de carbono juega un papel fundamental en la regulación de su ciclo global y en la mitigación del cambio climático (Main-knorn et al., 2013). Es así como el almacenamiento de CO<sub>2</sub> en la biomasa presente en el suelo, sobre él y de manera subterránea, influye directamente sobre el control de emisiones de gases de efecto invernadero (Veneros, 2020).

Por lo anterior, en diversos estudios se ha empleado la biomasa de los árboles para estimar su contenido de carbono, a través de la multiplicación de la cantidad disponible en una determinada

superficie por un factor que va de 0.4 hasta 0.55, valores que han sido reportados para la proporción de carbono contenido en cualquier especie vegetal (Díaz et al., 2007).

### Inventario forestal

El objetivo principal de un inventario forestal es obtener información sobre ciertos parámetros forestales (área basal, volumen, carbono, etc.) para fines de planificación y manejo forestal (Duaber, 1995). El inventario de biomasa, permite cuantificar el almacenamiento de carbono en diferentes compartimientos o reservorios, y coberturas de la tierra (IDEAM, 2011). En la actualidad, existe bastante información sobre la teoría de optimización del diseño de muestreo en inventarios forestales. Sin embargo, en la práctica no siempre se dispone de todos los datos necesarios para aplicar esta teoría y resulta más sencillo diseñar cada inventario basándose en las experiencias obtenidas en los inventarios realizados en otros bosques con condiciones similares. Cuando esta información no se encuentra disponible, los desarrolladores de proyecto tendrán que comenzar desde cero, lo cual implica realizar un pre-muestreo, luego definir el número de parcelas necesarias para alcanzar el error deseado en las estimaciones y realizar trabajo de campo. El número de parcelas necesarias en un inventario está relacionado con la precisión o error deseado, y con los recursos disponibles para alcanzar este objetivo. De acuerdo a Emmer et al. (2007), para proyectos forestales la precisión o error de muestreo deseado es de  $\pm 10\%$  del valor promedio de carbono estimado, con un nivel de confianza de 95%.

### Teledetección

Según Veneros (2020), la teledetección es el procedimiento, que consiste en recoger datos desde un punto situado a gran distancia del lugar muestreado. Una de las aportaciones más destacadas de la teledetección espacial al estudio del medio ambiente es su capacidad para seguir procesos

dinámicos, ya que las imágenes se captan por un sensor que observa a la Tierra desde una órbita estable y repetitiva (J. Chuvieco, 1998). De acuerdo a Martínez-Barrón (2014), la teledetección se puede dividir en detección pasiva y activa. La detección por sensores pasivos se basa en fuentes naturales de radiación, mientras que los sensores activos generan su propia radiación para iluminar su objetivo.

### Corrección atmosférica

La atmósfera puede afectar la naturaleza de las imágenes de sensores remotos de diferentes formas. Los efectos atmosféricos pueden ser sustanciales por lo que se ofrecen varios enfoques para la corrección atmosférica (Eastman, 2004). Según E. Chuvieco (1996), las correcciones que se deben realizar sobre las imágenes tienden a eliminar los ruidos causados a la señal que llega del satélite luego de haber atravesado la atmósfera, el efecto de la distorsión de la señal produce errores en la localización como en los niveles digitales de los píxeles.

### Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

El NDVI fue introducido con el objetivo de separar la vegetación del brillo que produce el suelo según su autor (Rouse, 1974). Según Huang et al. (2021), el NDVI es uno de los primeros productos analíticos de teledetección utilizado para simplificar las complejidades de las imágenes multispectrales, asimismo es ahora el índice más popular utilizado para la evaluación de la vegetación. Es un parámetro matemático obtenido a partir de los valores de la reflectancia a distintas longitudes de onda, y que es particularmente sensible a la cubierta vegetal (Gilbert et al., 1997).

## Regresión

Según Morales Vallejo (2012), la regresión es un método estadístico que permite explicar, estimar o predecir una variable dependiente (Y) por su relación con la variable X, que es la variable independiente, explicativa o predictora.

Uno de las regresiones más aplicadas es la regresión lineal, la cual consiste en calcular la suma de las distancias al cuadrado entre los puntos reales y los puntos definidos por la recta estimada a partir de las variables introducidas en el modelo, de forma que la mejor estimación será la que minimice estas distancias (Moral Peláez, 2006).

La recta que mejor se ajusta a los datos es la que minimiza las diferencias (elevadas al cuadrado) de los puntos con respecto a la recta. El símbolo R del coeficiente de correlación (desarrollado por Pearson) viene del concepto de regresión (Morales Vallejo, 2012). Según López-Roldán & Fachelli (2016), la correlación es una medida de asociación entre variables cuantitativas que expresa la fuerza o la intensidad de la relación entre dos variables así como la dirección de la misma. Asimismo, este coeficiente varía entre 0 y 1, en función de que la correlación sea menor o mayor y tendrá signo positivo o negativo que expresará la direccionalidad de la correlación.

Vale la pena resaltar que además de la regresión lineal existen otros tipos de regresiones como la polinómica, logarítmica, exponencial, entre otras.

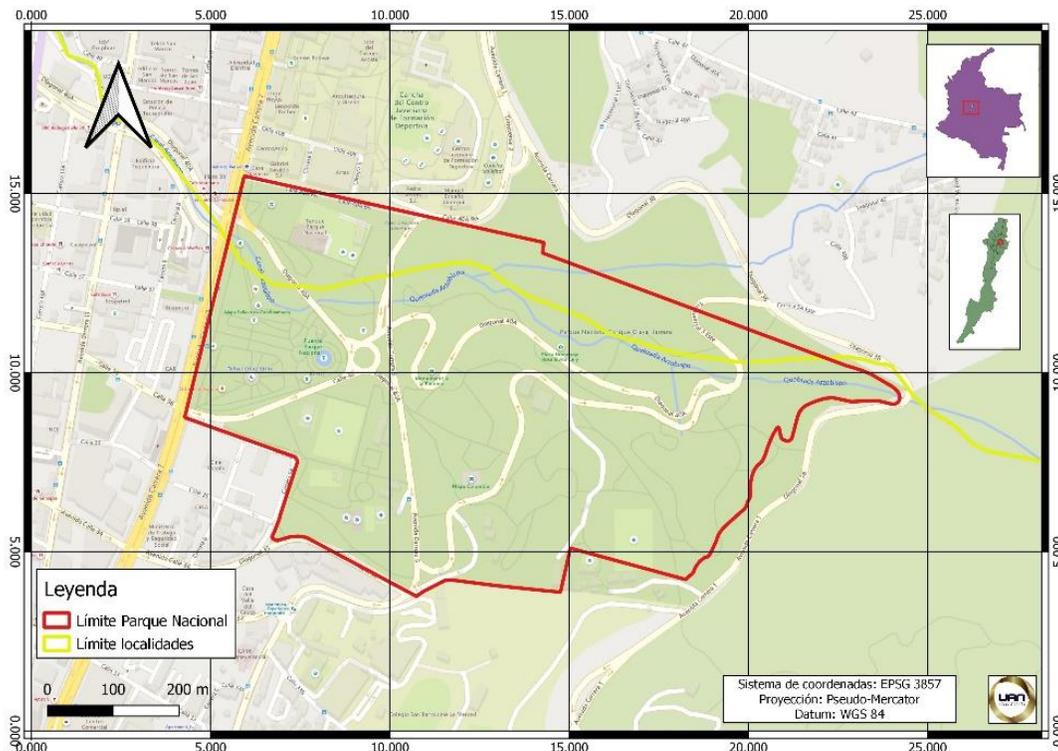
## Diseno Metodológico

### Área de estudio

De acuerdo al IDRD (s. f.), El Parque Nacional Enrique Olaya Herrera nació en 1931 y actualmente se encuentra dividido en cinco grandes zonas de las cuales para el presente trabajo nos ocupamos de las dos que se encuentran en la parte urbana: el sector histórico comprendido entre las calles 36 a 39 y carrera séptima y quinta; y el central que se ubica entre la carrera quinta y la avenida circunvalar, desde el colegio San Bartolomé hasta el río Arzobispo. La totalidad del área de estudio es de aproximadamente 40.92 ha (Figura 1).

### Figura 1.

#### Área de estudio



Nota: Autor 2023.

Adicionalmente, es importante resaltar que el Parque Nacional se encuentra en la zona de vida de bosque húmedo montano bajo (bh-MB) de acuerdo a la clasificación de Holdridge, ya que de acuerdo a Guzman (1996), esta zona de vida se encuentra rodeando la sabana de Bogotá en los piedemontes de influencia de las montañas.

#### Obtención de información base

Teniendo en cuenta que en la ciudad de Bogotá existe la plataforma SIGAU a cargo del Jardín Botánico de Bogotá (JBB), en la que se puede encontrar el inventario forestal del arbolado urbano de la ciudad, se obtuvo el Shape (shp) de todos los árboles de la ciudad de la página de datos abiertos de Bogotá del link <https://datosabiertos.bogota.gov.co/dataset/censo-arbolado-urbano>.

De igual manera se obtuvo el (shp) del sistema distrital de parques de la ciudad de Bogotá a cargo del Instituto Distrital de Recreación y Deporte (IDRD) de la página de datos abiertos de la ciudad del link <https://datosabiertos.bogota.gov.co/dataset/sistema-distrital-de-parques-y-escenarios-publicos-deportivos>.

Con estos archivos se realizó la selección de los árboles que se encuentran dentro de los límites de la zona urbana del Parque Nacional Enrique Olaya Herrera junto con los datos que proporciona el shp obtenido del JBB.

#### Inventario forestal

Teniendo en cuenta la información base del arbolado obtenida del JBB, para la realización del presente inventario forestal se tomaron como unidades muestrales (UM) cada uno de los árboles que encuentran dentro de los límites del Parque Nacional Enrique Olaya Herrera, debido a que permitía una más fácil y rápida contrastación de los datos levantados en campo. En cuanto al

inventario propiamente, en primer lugar, se realizó un pre-muestreo aleatorio simple de un pequeño porcentaje de la totalidad de los árboles que superen la altura de 3 m. Posteriormente, a partir del pre-muestreo se determinó la cantidad de UM necesarias para obtener un error de muestreo menor o igual al 10% con un nivel de confianza del 95%.

Para determinar la cantidad de UM (n) se utilizó la fórmula sugerida por Duaber (1995):

$$n = \frac{(t * 2)s\%^2}{E\%^2}$$

Donde: “n” es la cantidad de UM, “t” es el valor que define el nivel de confianza, “s%” es el coeficiente de variación de la población en porcentaje y “E%” es el error admisible.

Una vez obtenida la cantidad de árboles a inventariar se les atribuyó un ID a todos los árboles con una altura mayor a 3m y se realizó una selección aleatoria de la cantidad necesaria de individuos para completar la muestra teniendo en cuenta los árboles medidos en el pre-muestreo. Para esto se utilizó la herramienta de muestreo de ArcGIS Pro en su versión 2.9.0 y se exportó la entidad de puntos junto con toda su información base en formato KML para su visualización en campo a través de un dispositivo móvil mediante la aplicación de Google Earth.

#### Levantamiento de campo

Se realizó el levantamiento de campo tomando como unidades muestrales (UM) cada uno de los árboles que se encuentran dentro del Parque Nacional Olaya Herrera teniendo en cuenta la definición de árbol que estipula el Decreto 531 de 2010 de la Alcaldía Mayor de Bogotá, que afirma que un árbol es una planta leñosa con un tronco principal que sostiene un follaje

denominado copa, de arquitectura según la especie, cuya altura en estado adulto no sea inferior a tres (3) metros, medidos desde el nivel del suelo.

A los árboles inventariados se les verificó el nombre común obtenido de la base de datos del JBB, se les anotó el ID, y se les midió la circunferencia a la altura de pecho (CAP), es decir la circunferencia del tronco a los 1.3 m del suelo. A los árboles que contaban con bifurcaciones se les midieron cada una de ellas individualmente y para su procesamiento se tomó el promedio de las mismas. Para obtener el DAP se utilizó la siguiente fórmula:

$$DAP = \frac{CAP}{\pi}$$

#### Modelo alométrico

Teniendo en cuenta lo sugerido por el IDEAM (2011) para la estimación de la biomasa aérea de árboles individuales se seleccionó el modelo alométrico más afín a la zona de interés que en este caso es el bh-MB:

$$\ln(BA) = a + B1\ln(D)$$

Donde: “BA” es biomasa aérea en kg, “a” es un parámetro con valor de -1.663, “b1” es un parámetro con valor de 2.37 y “D” es el “DAP” del árbol.

#### Estimación de biomasa aérea y carbono

Luego de obtener la BA mediante el modelo alométrico de los árboles inventariados se procedió a realizar la estimación de la BA de la totalidad de los árboles presentes en el Parque Nacional Enrique Olaya Herrera. Para esto se realizó una regresión lineal tomando como variable independiente la altura total (Ht), obtenida de la información base del arbolado urbano del JBB, y

como variable dependiente el DAP medido de los árboles del muestreo. Con la ecuación de la recta generada se obtuvieron los DAP de la totalidad de los árboles presentes en el parque para posteriormente calcular la BA mediante el modelo alométrico previamente mencionado. Finalmente se procedió a calcular el carbono almacenado en los árboles el cual corresponde al 50% de la BA.

#### Obtención de imágenes satelitales

Para la obtención de las imágenes satelitales se recurrió al portal Earth Explorer del USGS (United States Geological Survey) en la página <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Se descargaron los productos Landsat 8 de nivel 1, colección 2, categoría 1 para la zona de interés (Path 8 y Row 57).

Es importante resaltar que de acuerdo a la USGS (2019) las imágenes Landsat 8 cuentan con 11 bandas con tamaños de pixel que varían entre los 15 y 100 m (Tabla 1)

**Tabla 1.**

#### Características de las imágenes Landsat 8

Banda	Tamaño de pixel	Descripción	Longitud de onda ( $\mu\text{m}$ )
1	30 m	Coastal/Aerosol	0,435-0,451
2	30 m	Blue	0,452-0,512
3	30 m	Green	0,533-0,590
4	30 m	Red	0,636-0,673
5	30 m	NIR	0,851-0,879
6	30 m	SWIR-1	1,566-1,651
7	30 m	SWIR-2	10,6-11,19
8	15 m	Pan	11,5-12,51
9	30 m	Cirrus	2,107-2,294
10	100 m	TIR-1	0,503-0,676
11	100 m	TIR-2	1,363-1,384

Nota: USGS 2019.

## Corrección atmosférica

El modelo Dark Object Substraction (DOS) propuesto por Chávez (1988) ha sido utilizado en numerosas aplicaciones probablemente por ser de aplicación simple. Postula que la bruma atmosférica incrementa los niveles digitales en áreas de las imágenes de agua limpia, profunda y calma, donde por las características físicas deben presentar reflectancia nula. El valor representativo de esa diferencia se sustrae, en cada banda, en todos los píxeles de la escena. La fórmula para la aplicación del DOS es la siguiente:

$$R_c = \frac{R_o - VMR}{1 - VMR}$$

Donde: “Rc” es reflectancia corregida, “Ro” es reflectancia original y “VMR” es valor mínimo de reflectancia.

El modelo DOS fue usado para realizar la corrección atmosférica de las imágenes Landsat 8 mediante el Plugin “Semi-Automatic Classification Plugin” (SCP) del software QGIS en su versión 3.22.10.

## NDVI

Para realizar el cálculo del NDVI es necesario realizar los siguientes pasos:

1. Recopilación de datos de satélite: Para calcular el NDVI, es necesario tener imágenes de satélite que contengan bandas de luz roja e infrarroja cercana.
2. Corrección radiométrica: Es importante corregir las imágenes para asegurarse de que estén en una resolución adecuada para el cálculo del NDVI.

3. Calibración atmosférica: La atmósfera puede afectar la calidad de las imágenes de satélite, por lo que es necesario eliminar estos efectos atmosféricos para obtener resultados precisos (Ustin et al., 2004).
4. Cálculo del NDVI: Para el cálculo del NDVI se utiliza la siguiente fórmula:

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{Rojo}}{\text{NIR} + \text{Rojo}}$$

Donde “NIR” es la reflectancia de la banda infrarroja cercana y “Rojo” es la reflectancia de la banda de luz roja. El resultado es un número que varía de -1 a 1, siendo que valores más altos indican una mayor densidad y salud vegetal (Cowell, 2007).

5. Interpretación del NDVI: Los valores de NDVI pueden ser utilizados para determinar la salud de las plantas, áreas de vegetación densa y áreas de deforestación. Valores negativos indican áreas con poca o ninguna vegetación, mientras que valores cercanos a 1 indican áreas con vegetación densa y saludable (Vogelmann et al., 2001).

Previo a la obtención de los valores de NDVI fue necesario re proyectar la resolución espacial de 30 a 15 m a través del software ERDAS 2014 en su versión 14.00.0000. Adicionalmente, se obtuvo una máscara de la imagen recortándola a la zona de interés con base en el shp del Parque Nacional obtenido del IDR. Una vez realizados estos procedimientos, se obtuvo el NDVI mediante el proceso previamente descrito a través del software ERDAS 2014 en su versión 14.00.0000. Los resultados generados se clasificaron visualmente de acuerdo a las categorías propuestas por E. Chuvieco (1999) (Tabla 2):

**Tabla 2.****Clasificación del NDVI**

<b>Valor de NDVI</b>	<b>Clase</b>	<b>Interpretación</b>
<0,2	1	Suelo sin vegetación
0,2-0,4	2	Poca vegetación
0,4-0,6	3	Vegetación media
0,6-0,8	4	Vegetación densa
>0,8	5	Vegetación muy densa

Nota: Chuvieco 1999.

Finalmente, se realizó la extracción de los valores de NDVI para cada uno de los árboles inventariados a través de la herramienta de extracción de valores por puntos de ArcGIS Pro en su versión 2.9.0.

### Regresión

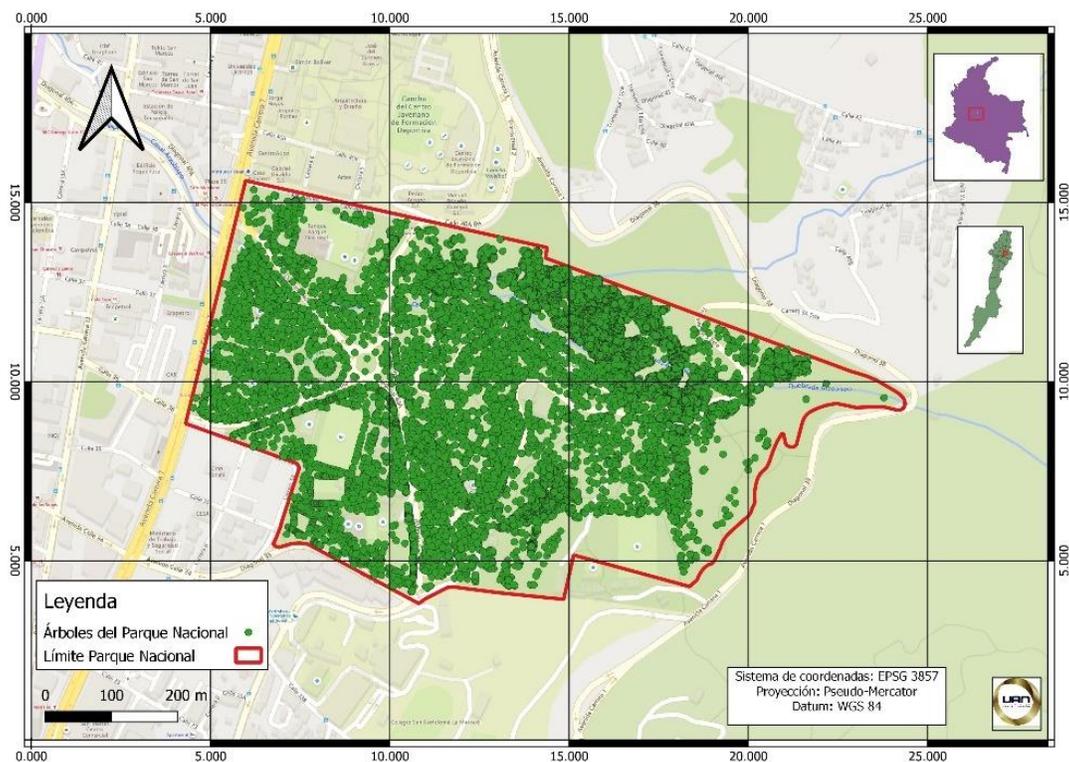
Una vez obtenidos los valores de BA y de NDVI de cada uno de los árboles inventariados se realizó una regresión a través del software Excel 2021, obteniendo el R y la ecuación de la recta que permite la estimación de la biomasa a partir del NDVI.

## Resultados

De acuerdo a la información base obtenida del shp de arbolado urbano del JBB, los árboles presentes en el Parque Nacional Enrique Olaya Herrera con una altura superior a 3 m son en total 10388 de 129 especies diferentes (Figura 2).

**Figura 2.**

### Árboles del Parque Nacional Enrique Olaya Herrera



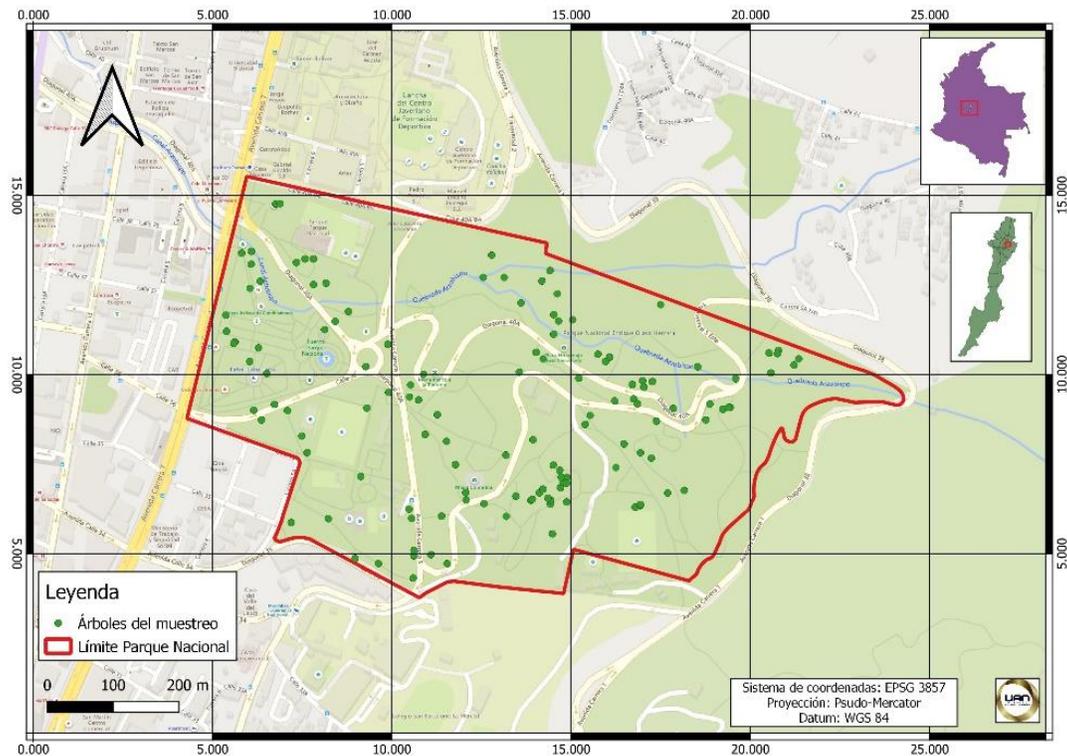
Nota: Autor 2023.

Del total de árboles presentes en el parque se seleccionaron aleatoriamente 129 (Figura 3), de 31 especies diferentes que corresponden al 1.24% de la totalidad de árboles. Vale la pena resaltar que de los árboles seleccionados para realizar el muestreo no fueron encontrados 10, por lo cual se

recolectaron datos de 119, de 27 especies diferentes que corresponden a 1.14% de la totalidad de árboles.

**Figura 3.**

**Árboles seleccionados para el muestreo aleatorio simple**



Nota: Autor 2023.

Con los datos recolectados se procedió a calcular la BA de los árboles inventariados para luego obtener el error de muestreo que en este caso fue de 6.54%, con un coeficiente de variación de 42.95%, una media de 25069.97 y una desviación estándar de 58372.62 (Tabla 3).

**Tabla 3.****Información del muestreo**

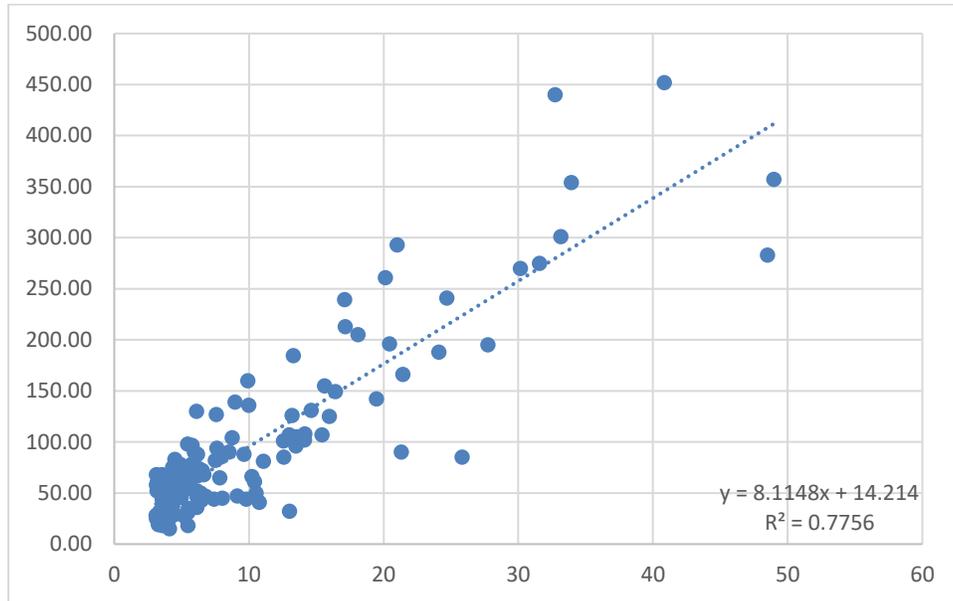
<b>BA</b>	
<b>t</b>	1,66
<b>n</b>	119
<b>Media</b>	25069,97
<b>S</b>	58372,62
<b>N</b>	10388
<b>CV</b>	42,95
<b>Error</b>	6,54

Nota: Autor 2023.

A continuación, se realizó la regresión lineal para estimar el DAP (variable dependiente) a partir de la Ht (variable independiente) y así poder calcular la BA mediante el modelo alométrico previamente mencionado (Figura 4). Los resultados de la regresión arrojaron un  $R^2$  de 0.7756 y el siguiente modelo predictivo:

$$y = 8.1148x + 14.214$$

Donde “y” es el DAP del árbol y “x” la Ht del árbol.

**Figura 4.****Regresión lineal DAP vs Ht**

Nota: Autor 2023.

Utilizando el modelo predictivo generado a partir de la regresión lineal, se procedió a calcular la BA de la totalidad de los árboles presentes en el parque obteniendo una BA total de 175166.21 ton y un carbono almacenado total de 87583.1 ton. Asimismo, se obtuvo una BA de 4280.8 ton/ha y un carbono almacenado de 2140.4 ton/ha (Tabla 4).

**Tabla 4.****Estimación de BA y carbono almacenado mediante modelo alométrico**

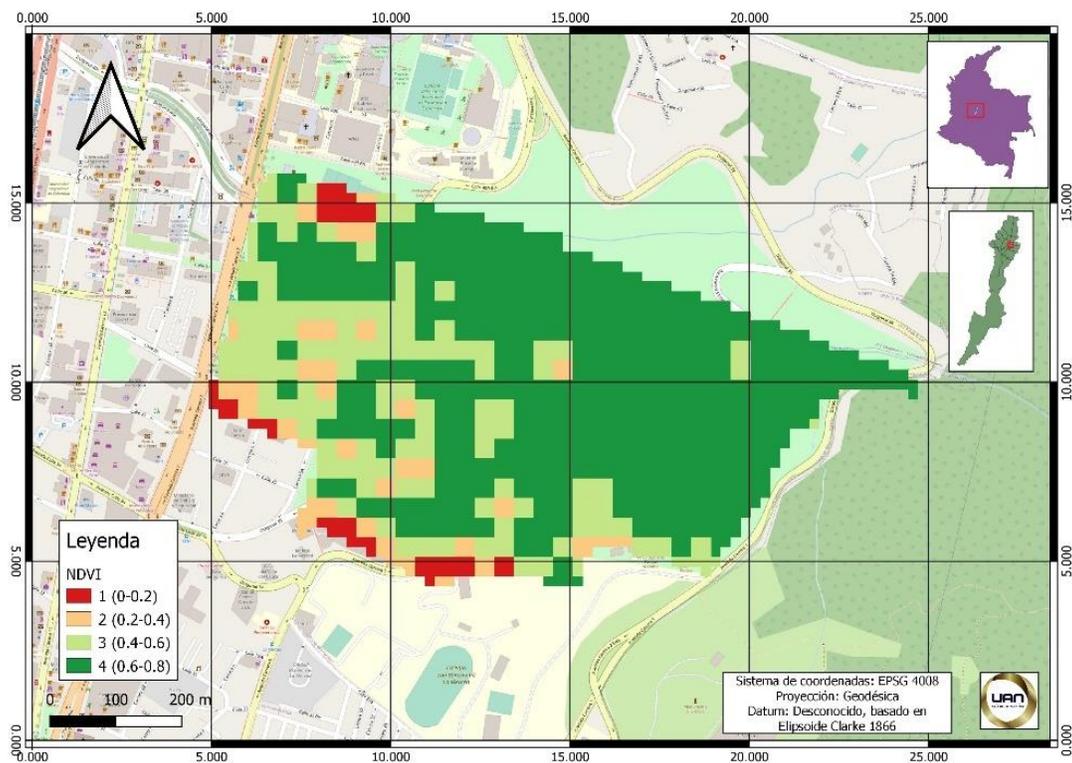
<b>Variable</b>	<b>Total (ton)</b>
<b>BA</b>	175166,21
<b>Carbono</b>	87583,10
<b>Variable</b>	<b>Total (ton/ha)</b>
<b>BA</b>	4280,80
<b>Carbono</b>	2140,40

Nota: Autor 2023.

Por otro lado, se obtuvo la imagen Landsat 8 de interés para el área de estudio con fecha del 19 de agosto de 2022. A esta imagen se le realizó una corrección atmosférica mediante el método DOS. Posteriormente fue re proyectada de 30 a 15 m para mejorar su resolución espacial y se obtuvo una máscara de la imagen del área de estudio. Finalmente se procedió a obtener el NDVI de la imagen utilizando la clasificación propuesta por E. Chuvieco (1999) para su visualización (Figura 5).

**Figura 5.**

### Visualización del cálculo del NDVI



Nota: Autor 2023.

Una vez generada la imagen con NDVI se extrajeron estos valores para cada uno de los árboles inventariados durante el muestreo. Con esta información se procedió a realizar la regresión, tomando como variable independiente el NDVI, y como variable dependiente la BA (Figura 6).

Vale la pena resaltar que para este caso la regresión calculada fue polinómica de segundo grado ya que se ajustó mejor que otro tipo de regresiones (lineal, exponencial, logarítmica y potencial).

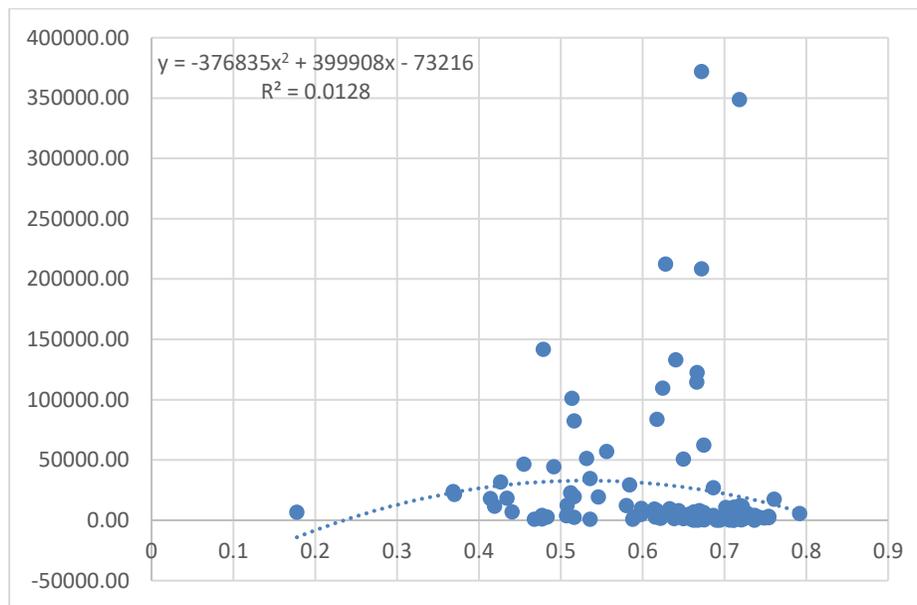
Los resultados arrojaron un  $R^2$  de 0.0128 y el siguiente modelo:

$$y = -376835x^2 + 399908x - 73216$$

Donde “y” es la BA y “x” el NDVI.

**Figura 6.**

### Regresión polinómica NDVI vs BA



Nota: Autor 2023.

Con el modelo generado por la regresión se obtuvo la BA de la totalidad de los árboles presentes en el parque obteniendo resultados negativos que distan significativamente de los resultados obtenidos mediante el modelo alométrico (Tabla 5).

**Tabla 5.****Estimación de BA y carbono almacenado mediante NDVI**

<b>Variable</b>	<b>Total (ton)</b>
<b>BA</b>	-7161578964995880
<b>Carbono</b>	-3580789482497940
<b>Variable</b>	<b>Total (ton/ha)</b>
<b>BA</b>	-175018425792319
<b>Carbono</b>	-87509212896159

Fuente: autor 2023.

## Conclusiones

Se obtuvo una cantidad de BA de -175018425792319 ton/ha y un carbono almacenado de -87509212896159 ton/ha de los árboles presentes en la zona urbana Parque Nacional Enrique Olaya Herrera de Bogotá, utilizando un modelo predictivo a partir del NDVI. El  $R^2$  Obtenido para la correlación entre el NDVI y la BA fue de 0.0128 lo que indica una débil relación entre las variables evaluadas, razón por la cual los resultados obtenidos no son de utilidad para el objetivo propuesto.

El resultado de la regresión lineal entre el DAP y la Ht arrojó un  $R^2$  de 0.7756 lo que permitió calcular el DAP de todos los árboles presentes en la zona urbana del Parque Nacional Enrique Olaya Herrera, para posteriormente calcular la BA de los mismos mediante un modelo alométrico. Con estos datos se obtuvo una cantidad de BA de 4280 ton/ha y de carbono almacenado de 2141.4 ton/ha de los árboles presentes en el parque.

Se obtuvo un Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) para cada uno de los árboles dentro del Parque Nacional Enrique Olaya Herrera, así como una visualización por categorías.

Los resultados obtenidos mediante la predicción de la BA a partir del NDVI arrojó resultados negativos e incoherentes en relación a los obtenidos mediante el modelo alométrico, lo que nos indica que este procedimiento no funciona para realizar una estimación confiable de BA y de carbono almacenado de árboles en zonas urbanas.

### Referencias Bibliográficas

- Aguaron, E., & McPherson, G. E. (2012). Carbon sequestration in urban ecosystems. En *Comparison of methods for estimating carbon dioxide storage by Sacramento's urban forest*. Springer Netherlands.
- Bautista, H. J., & Torres, J. A. P. (2003). Valoración económica del almacenamiento de carbono del bosque tropical del ejido Noh Bec, Quintana roo, México. *Revista Chapingo*, 9, 69-75.
- Brown, S. (1997). Estimating and Biomass Change of Tropical Forests: A Primer. *FAO Forest Paper*, 134.
- Cardona, C. M., Garzón, J., & Jiménez, G. (2020). Estimación de la captura de carbono en un relicto de bosque urbano mediante técnicas de teledetección. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 19(37), 13-34.
- Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M., Chambers, J., Eamus, D., & Fromard, F. (2005). Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecología*, 145, 87-99.
- Chávez, J. (1988). An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote Sensing of Environment*, 24, 459-479.
- Chuvieco, E. (1996). *Fundamentos de Teledetección* (3.<sup>a</sup> ed.). Ediciones RIALP.
- Chuvieco, E. (1999). Riesgo de incendio a corto plazo: Estimación del contenido de humedad del follaje a partir de datos satelitales. En *Teledetección de grandes incendios forestales* (pp. 17-34).
- Chuvieco, J. (1998). El factor temporal en teledetección: Evolución fenomenológica y análisis de cambios. *Revista de teledetección*, 10, 1-9.

- Cowell, R. N. (2007). Manual de Análisis de Datos de Sensores Remotos. *Universidad Nacional Agraria La Molina*.
- Dang, H. N., Ba, D. D., Trung, D. N., & Viet, H. N. H. (2022). A Novel Method for Estimating Biomass and Carbon Sequestration in Tropical Rainforest Areas Based on Remote Sensing Imagery: A Case Study in the Kon Ha Nung Plateau, Vietnam. *Sustainability*, 14.
- Deng, S., Shi, Y., Jin, Y., & Wang, L. (2011). A GIS-based approach for quantifying and mapping carbon sink and stock values of forest ecosystem: A case study. *Energy Procedia*, 5, 1535-1545.
- Díaz, F. R., Acosta, M. M., Carrillo, F. A., Buendía, E. R., Flores, E. A., & Etcheveres-Barra, J. D. (2007). Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus Patula* Schl. Et Cham. *Madera y Bosques*, 13(1), 25-34.
- Duaber, E. (1995). *GUIA PRACTICA Y TEORICA PARA EL DISEÑO DE UN INVENTARIO FORESTAL DE RECONOCIMIENTO*.
- Eastman. (2004). *IDRISI Kilimanjaro: Guía para SIG y Procesamiento de Imágenes*. Universidad de Clark.
- Emmer, I. M., Klaassen, J., & Mohren, G. M. (2007). Sampling errors in forest inventories: A comparison of six design-based methods. *Forest Ecology and Management*, 247(1-3), 129-136.
- Fernández, H. (2004). *Estimación de la Disponibilidad de Pasto*. INTA.
- Gilabert, M. A., González-Piqueras, J., & García-Haro, J. (1997). Acerca de los índices de vegetación. *Revista de teledetección*, 8, 1-10.

- González Jurado, J. A. (2022). *Valoración Biofísica y Sociocultural de Servicios Ecosistémicos de Tres Parques Urbanos de la ciudad de Bogotá (Colombia)*. Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales.
- Guzman, D. (1996). *Zonas de vida o formaciones vegetales area jurisdiccional CAR*.
- Huang, S., Tang, L., Hupy, J., Wang, Y., & Shao, G. (2021). A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *Journal of Forestry Research*, 32, 1-6.
- IDEAM. (2011). *Protocolo para la estimación nacional y subnacional de biomasa-carbono en Colombia*.
- IDRD. (s. f.). *Parque Nacional Enrique Olaya Herrera | IDRD - Instituto Distrital de Recreación y Deporte*. Recuperado 20 de abril de 2023, de <https://www.idrd.gov.co/parques/parques-metropolitanos/parque-nacional-enrique-olaya>
- Jauregui, K. (2016). *Ecuaciones alométricas para estimar volumen y biomasa aérea de Enterolobium cyclocarpum y Ceiba pentandra en la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras* [Tesis]. Escuela Agrícola Panamericana.
- Labrecque, S., Fournier, J., Luther, J., & Piercey, D. (2006). A comparison of four methods to map biomass from Landsat-TM and inventory data in western Newfoundland. *For. Ecol. Manage*, 226, 129-144.
- Li, D., Mu, H., Gao, Y., Lu, M., & Liu, C. (2022). A GIS-Based Analysis of the Carbon-Oxygen Balance of Urban Forests in the Southern Mountainous Area of Jinan, China. *Sustainability*, 14.

- Liu, Q., Ouyang, Z., Li, A., & Xu, W. (2016). Spatial Distribution Characteristics of Biomass and Carbon Storage in Forest Vegetation in Chongqing Based on RS and GIS. *Nature Environment and Pollution Technology*, 15(4), 1381-1388.
- López-Roldán, P., & Fachelli, S. (2016). Análisis de regresión. En *Metodología de la Investigación Social Cuantitativa* (1ª).
- Lu, D. (2006). The Potential and Challenge of Remote Sensing-based Biomass Estimation. *International Journal of Remote Sensing*, 27(7), 1297-1328.
- Main-knorn, M., Cohen, W. B., Kennedy, R. E., Grodzki, W., Dirk, P., Grif, P., & Hostert, P. (2013). Remote sensing of environment monitoring coniferous forest biomass change using a Landsat trajectory-based approach. *Remote Sensing of Environment*, 139, 277-290.
- Mariscal, I. (2008). *Recuperación de la calidad de Ultisoles mediterráneos degradados, mediante la aplicación de enmiendas y formas alternativas de uso* [Tesis Doctoral]. Universidad Politécnica de Madrid.
- Martínez-Barrón, R. A. (2014). *MODELACIÓN DE LA DINÁMICA DEL CARBONO EN BOSQUES DEL ESTADO DE DURANGO*. UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN.
- Medina, G., García, R., Gutiérrez, L., Echavarría Chaireza, R., Amador Ramírez, M., & Ruiz Corral, A. (2009). Estimación de la producción de forrajes con imágenes de satélite en los pastizales de Zacatecas. *Técnica Pecuaria*, 47(2), 135-144.
- Moral Peláez, I. (2006). Modelos de regresión: Lineal simple y regresión logística. En *Métodos estadísticos para enfermería nefrológica* (pp. 195-214).

- Morales Vallejo, P. (2012). Correlación y regresión, simple y múltiple. *Facultad de Ciencias Humanas y Sociales*.
- Newbould, P. (1967). Methods for estimating the primary production of forest. *Blackwell Scientific Publications*, 2, 59.
- Orellana, O. (2012). *ESTIMACIÓN DEL CARBONO ALMACENADO EN LA ZONA NÚCLEO DEL PARQUE NACIONAL MONTAÑA DE CELAQUE (PNMC) HONDURAS, UTILIZANDO LA TELEDETECCIÓN Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA*. ESCUELA NACIONAL DE CIENCIAS FORESTALES.
- Parresol, B. R. (1999). Assessing tree and stand biomass: A review with examples and critical comparisons. *Forest Science*, 45(4), 573-593.
- Pedrasa, M. (1989). *Producción de biomasa y circulación de nutrientes en un rodal de Nothofagus alessandrii Espinosa (Ruil) en la zona de Constitución*. Universidad de Chile.
- Perea-Ardila, M. A., Andrade-Castañeda, H. J., & Segura-Madrigal, M. A. (2020). Estimación de biomasa aérea y carbono con Teledetección en bosque alto-Andinos de Boyacá, Colombia. Estudio de caso: Santuario de Fauna y Flora Iguaque. *Revista Cartográfica*, 102, 99-123. <https://doi.org/10.35424/rcarto.i102.821>
- Raqeeb, A., Saleem, A., Ansari, L., Nazami, S. M., Muhammad, M. W., Malik, M., Naqash, M., & Khalid, F. (2021). Assessment of land use cover changes, carbon sequestration and carbon stock in dry temperate forests of Chilas watershed, Gilgit-Baltistan. *Brazilian Journal of Biology*, 84, 1-16.
- Reyes, S. (2019). *Planificación urbana orientada a los servicios ecosistémicos: ¿Un enfoque necesario para el cumplimiento de los ODS?*

- Romero-Duque, L. P., Trilleras, J. M., Castellarini, F., & Quijas, S. (2020). Ecosystem services in urban ecological infrastructure of Latin America and the Caribbean: How do they contribute to urban planning? *Science of The Total Environment*, 728, 138780.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138780>
- Rouse, J. J. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *NASA Technical Reports Server*, 317.
- Roy, P. S., & Ravan, S. A. (1996). Biomass estimation using satellite remote sensing data—An investigation on possible approaches for natural forest. *Journal of Biosciences*, 21(4), 535-561.
- Snowdon, P., Raison, J., Keith, H., & Ritson, P. (2002). Protocol for Sampling Tree and Stand Biomasa. *National Carbon Accounting System Technical Report*, 31-76.
- Streck, C., & Scholz, S. M. (2006). Journal Compilation. *Blackwell Publishing Ltd/The Royal Institute of International Aff airs.*, 5(82), 861-879.
- Tang, Y., Chen, A., & Zhao, S. (2016). Carbon Storage and Sequestration of Urban Streets in Beijing, China. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 4(53).
- USGS. (2019). *Data Users Handbook*.
- Ustin, S. L., Adams, J. B., & Green, R. O. (2004). Remote Sensing of Ecosystems: Principles and Applications. *CRC Press*.
- Vashum, K., & Jayakumar, S. (2012). Methods to Estimate Above-Ground Biomass and Carbon Stock in 578 Natural Forests—A Review. *Journal of Ecosystem and Ecography*, 2, 1-7.
- Vásquez, A., & Arellano, H. (2012). Estructura, biomasa aérea y carbono almacenado en los bosques del Sur y Noroccidente de Córdoba. *Colombia Diversidad Biótica: La Región Caribe de Colombia*, 12, 923-962.

Veneros, J. E. (2020). *Valoración económica de la reserva de carbono en biomasa aérea mediante la aplicación de Fotogrametría y Teledetección—San Martín, 2018.*

Universidad Nacional de San Martín.

Vogelmann, J. G., Howard, C. S., Yang, L., Homer, J. R., Larrieu, J. R., & Wylie, S. J. (2001).

Completion of the 1990s National Land Cover Data Set for the conterminous United

States from Landsat Thematic Mapper data and ancillary data sources. *Photogrammetric*

*Engineering and Remote Sensing.*

Zhang, Y., & Shao, Z. (2020). Evaluación de la biomasa de la vegetación urbana con LiDAR e

imágenes de teledetección de alta resolución. *International Journal of Remote Sensing,*

*42(3), 964-985.*