



**Evaluación Del Servicio Ecosistémico De Remoción De Material Particulado PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> Por El Arbolado Urbano De La Ciudad De Barranquilla En El Año 2019.**

**Andrea Carolina Ramos Duran**

**Camilo De Jesús Martínez Puente**

**Corporación Universitaria Reformada**

**Facultad De Ingeniería Ambiental**

**Barranquilla-Atlántico**

**2023**

**Evaluación Del Servicio Ecosistémico De Remoción De Material Particulado PM<sub>10</sub> Y  
PM<sub>2.5</sub> Por El Arbolado Urbano De La Ciudad De Barranquilla En El Año 2019.**

**Andrea Carolina Ramos Duran**

**Camilo De Jesús Martínez Puente**

**Investigación presentada como requisito para optar por el título de Ingeniero Ambiental**

**Tutora:**

**Margarita Castillo Ramírez**

**Cotutora:**

**Martha Mendoza Hernández**

**Corporación Universitaria Reformada**

**Departamento de Ingeniería**

**Barranquilla – Atlántico**

**2023**

## **Agradecimientos**

Expresamos nuestros más sinceros agradecimientos a todos aquellos que generosamente compartieron su tiempo, conocimiento y experiencia:

A Margarita Castillo y Martha Mendoza, cuya dedicación, orientación y apoyo constante fueron esenciales para establecer los fundamentos de esta investigación, brindando dirección y sabiduría a lo largo de todo el proceso.

A Alexander Parody, por su labor en los análisis estadísticos, que brindaron una base sólida para la comprensión y la validación de nuestros resultados.

A Geraldine Salcedo, por su orientación y apoyo en georreferenciación que nos permitió la creación de representaciones visuales de gran relevancia para esta investigación.

A Bárbara Guerrero, por su asesoramiento y la provisión de herramientas esenciales para llevar a cabo revisiones bibliográficas efectivas, fundamentales para contextualizar nuestro trabajo.

A Pedro Pacheco, por su disponibilidad constante para brindar retroalimentación constructiva para la calidad de este proyecto.

Sus contribuciones individuales y colectivas han dejado una huella indeleble en este proyecto de investigación.



## Contenido

1. Introducción.....	11
1. Planteamiento Del Problema .....	12
2. Justificación.....	13
3. Objetivos.....	14
3.1. Objetivo General.....	14
3.2. Objetivos Específicos .....	14
4. Marco Referencial .....	14
4.1. Marco Conceptual.....	14
4.1.1. Conceptos claves en la cobertura vegetal urbana .....	14
4.1.2. Conceptos claves para el análisis estadístico.....	16
4.1.3. Conceptos claves para la ubicación espacial. ....	18
4.2. Marco teórico.....	18
4.2.1. Calidad Del Aire.....	18
4.2.2. Material Particulado .....	21
4.2.3. Servicios Ecosistémicos .....	22
4.2.4. Interacción entre arbolado, servicios ecosistémicos y material particulado.....	24
4.2.5. Capacidad De Remoción De Contaminantes Del Arbolado urbano.....	25
4.2.6. Gestión Y Planificación Del Arbolado Urbano Para La Remoción De Contaminantes.....	26

4.3. Marco Legal.....	27
4.4. Estado del arte .....	31
5. Metodología.....	40
5.1. Población y muestra .....	40
5.2. Procedimiento.....	42
5.3. Instrumentos y técnicas de recopilación de datos.....	45
6. Área De estudio .....	46
7. Resultados.....	50
7.1. Análisis de Remoción de Material Particulado $PM_{10}$ Y $PM_{2.5}$ en la ciudad de Barranquilla. ....	56
7.1.1. Análisis de Remoción de Material Particulado $PM_{10}$ .....	56
7.1.2. Análisis de Remoción de Material Particulado $PM_{2.5}$ .....	61
7.2. Mapas de remoción de material particulado $PM_{10}$ y $PM_{2.5}$ por el arbolado urbano en la ciudad de Barranquilla en el año 2019. ....	66
8. Discusión .....	71
9. Conclusiones .....	77
10. Recomendaciones.....	78
11. Bibliografía.....	80
12. Anexos.....	91

## Listado de Tablas

<b>Tabla 1</b> <i>Número de parcelas de las 5 localidades de la ciudad de Barranquilla.</i> .....	41
<b>Tabla 2</b> <i>Resumen estadístico respecto a la remoción de <math>PM_{10}</math> en las 5 localidades de la ciudad de Barranquilla.</i> .....	59
<b>Tabla 3</b> <i>Tabla ANOVA para <math>PM_{10}</math>.</i> .....	60
<b>Tabla 4</b> <i>Resumen estadístico respecto a la remoción de <math>PM_{2.5}</math> en las 5 localidades de la ciudad de Barranquilla.</i> .....	64
<b>Tabla 5</b> <i>Tabla ANOVA para <math>PM_{2.5}</math>.</i> .....	65

## Listado de Figuras

<b>Figura 1</b> Dimensiones de $PM_{10}$ y $PM_{2.5}$ en comparación con el cabello humano y la arena fina de playa. ....	22
<b>Figura 2</b> Diagrama de etapas del procedimiento para realizar la evaluación de la remoción por arbolado urbano en la ciudad de Barranquilla en el año 2019. ....	44
<b>Figura 3</b> Mapa del del Distrito Especial, Industrial y Portuario de Barranquilla y sus 5 localidades. ....	47
<b>Figura 4</b> Mapa de localidad Suroccidente de la ciudad de Barranquilla. ....	47
<b>Figura 5</b> Mapa de Localidad Suroriente de la ciudad de Barranquilla. ....	48
<b>Figura 6</b> Mapa de localidad Metropolitana de la ciudad de Barranquilla. ....	48
<b>Figura 7</b> Mapa de localidad Norte Centro Histórico de la ciudad de Barranquilla. ....	49
<b>Figura 8</b> Mapa de localidad Riomar de la ciudad de Barranquilla. ....	49
<b>Figura 9</b> Gráfico de cantidad de árboles por especie en la localidad Norte Centro Histórico de la ciudad de Barranquilla. ....	51
<b>Figura 10</b> Gráfico de cantidad de árboles por especie de la localidad Metropolitana de la ciudad de Barranquilla. ....	52
<b>Figura 11</b> Gráfico de cantidad de árboles por especie en la localidad Riomar de la ciudad de Barranquilla. ....	53
<b>Figura 12</b> Gráfico de cantidad de árboles por especie en localidad Suroccidente de la ciudad de Barranquilla. ....	54
<b>Figura 13</b> Gráfico de cantidad de árboles por especie en localidad Suroriente de la ciudad de Barranquilla. ....	55
<b>Figura 14</b> Remoción total de $PM_{10}$ por arbolado urbano de la ciudad de Barranquilla en el año 2019. ....	56

<b>Figura 15</b> <i>Porcentajes de remoción de <math>PM_{10}</math> por arbolado urbano de la ciudad de Barranquilla.</i> .....	57
<b>Figura 16</b> <i>Promedio de remoción de <math>PM_{10}</math> por arbolado urbano de la ciudad de Barranquilla en el año 2019.</i> .....	58
<b>Figura 17</b> <i>Gráfico de medida de tendencia central y prueba de LSD de Fisher para <math>PM_{10}</math>.</i> ...	61
<b>Figura 18</b> <i>Remoción total de <math>PM_{2.5}</math> por arbolado urbano de la ciudad de Barranquilla en el año 2019.</i> .....	62
<b>Figura 19</b> <i>Porcentajes de remoción de <math>PM_{2.5}</math> por arbolado urbano de la ciudad de Barranquilla.</i> .....	62
<b>Figura 20</b> <i>Promedio de remoción de <math>PM_{2.5}</math> por arbolado urbano de la ciudad de Barranquilla en el año 2019.</i> .....	63
<b>Figura 21</b> <i>Gráfico de medida de tendencia central y prueba de LSD de Fisher para <math>PM_{2.5}</math>.</i> ..	66
<b>Figura 22</b> <i>Ubicación de las parcelas muestreadas en el inventario realizado en las 5 localidades de la ciudad de Barranquilla.</i> .....	66
<b>Figura 23</b> <i>Áreas de remoción de <math>PM_{10}</math> por arbolado urbano en la ciudad de Barranquilla.</i> ..	67
<b>Figura 24</b> <i>Áreas de remoción de <math>PM_{2.5}</math> por arbolado urbano en la ciudad de Barranquilla.</i> ..	69

## **Resumen**

La calidad del aire tiene grandes impactos ambientales, económicos y sociales en una ciudad. La contaminación por material particulado (PM) en el aire generadas por la combustión de combustibles fósiles y la actividad industrial, se han convertido en un problema de salud pública y ambiental que requieren de estudio más en varias ciudades colombianas.

El arbolado urbano desempeña un papel fundamental en la provisión de servicios ecosistémicos, y esta investigación busca comprender la contribución del arbolado urbano en Barranquilla a la remoción de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ . Para ello, se llevan a cabo muestreos en toda la ciudad, evaluando cuantitativamente la capacidad de diferentes especies para eliminar estas partículas en diversas áreas de la ciudad. Aunque los resultados revelan una contribución poco relevante, se resalta la necesidad de proyectos que fortalezcan el arbolado a través de siembras estratégicas. Esto promoverá un entorno más saludable y sostenible en Barranquilla.

**Palabras Claves:** Arbolado urbano, servicios ecosistémicos, material particulado, regulación ambiental, y remoción.

## **Abstract**

Air quality has significant environmental, economic, and social impacts on a city. Specifically, particulate matter (PM) pollution in the air resulting from fossil fuel combustion and industrial activity has become a serious public health and environmental issue that requires further study in multiple Colombian cities.

Urban woodland plays a fundamental role in the provision of ecosystem services, and this research seeks to understand the contribution of urban woodland in Barranquilla to the removal of  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$ . To do this, sampling is conducted throughout the city, quantitatively evaluating the ability of distinct species to eliminate these particles in different areas of the city. Although the results reveal a minor contribution, the need for projects that strengthen the tree

through strategic planting is highlighted. This will promote a healthier and sustainable environment in Barranquilla.

**Keywords:** Particulate matter, air quality, urban forestry, environmental regulation, and removal.

## 1. Introducción

En el contexto de un mundo en constante transformación y crecimiento urbano, la conservación y mejora de la calidad del entorno natural se ha convertido en un desafío primordial. La urbanización acelerada ha llevado al aumento de problemas ambientales, particularmente relacionados con la contaminación del aire. Entre los diversos contaminantes atmosféricos, las partículas suspendidas en el aire, específicamente el material particulado  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ , han emergido como un grave problema de salud pública y ambiental. Estas partículas generadas por diversas fuentes, incluyendo la combustión de combustibles fósiles y la actividad industrial, pueden tener efectos perjudiciales en la salud humana y en los ecosistemas urbanos (Narváez, 2021).

El arbolado urbano se ha destacado como un componente fundamental de las ciudades, que desempeña un papel crucial en la mejora de la calidad del aire y la prestación de servicios ecosistémicos que resultan beneficiosos para el entorno (Martínez, et, al. 2021). En Barranquilla, en la costa norte de Colombia, se busca conocer los servicios de sus ecosistemas para aprovechar y abordar problemas ambientales, que pueden mejorar la calidad de vida de los habitantes (Narváez, 2021).

Con una revisión exhaustiva de la literatura, mediciones in situ y análisis de datos, esta investigación busca comprender la contribución del arbolado urbano en Barranquilla a la remoción de material particulado de 10 y 2.5 micras ( $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ ). El trabajo se enfocará en la evaluación cuantitativa de la capacidad de los árboles para eliminar los niveles de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  en la ciudad, considerando la especie, la densidad poblacional, la ubicación y otros factores clave.

Al abordar este tema crítico, esta investigación busca aportar conocimientos valiosos para el desarrollo sostenible de Barranquilla, y el fortalecimiento y gestión adecuada del arbolado urbano, que puede significar un impacto positivo en la calidad de vida de los habitantes y en la salud del entorno urbano en general (González, 2022).

## **1. Planteamiento Del Problema**

El crecimiento urbano en Barranquilla ha llevado a una disminución significativa de su arbolado urbano y al deterioro del ecosistema de bosque seco tropical característico de la región. Esto ha limitado la disponibilidad de árboles, tanto nativos como no nativos, en la ciudad. A pesar de los esfuerzos de las administraciones recientes por aumentar la cobertura arbórea y mejorar la calidad de vida, la falta de enfoque en la planificación ambiental ha resultado en la reducción de áreas verdes (Manrique, 2019).

Los planes de gobierno han priorizado proyectos para incrementar la cobertura arbórea en Barranquilla, siguiendo las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS), que sugiere que las grandes ciudades deberían contar con 1 árbol por cada 3 habitantes. Esto ha llevado al desarrollo de proyectos que buscan contrarrestar los efectos negativos del crecimiento urbano y aumentar la cobertura arbórea en la ciudad (Alcaldía de Barranquilla, Distrito Especial, Industrial y Portuario, 2020).

A pesar de estos esfuerzos, la calidad del aire en Barranquilla se mantiene dentro de límites aceptables, con promedios anuales de  $43.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de  $\text{PM}_{10}$  y  $13.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de  $\text{PM}_{2.5}$  en comparación con los límites normativos de  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , respectivamente. Estos datos provienen de los monitoreos realizados por el Establecimiento público ambiental (EPA) Barranquilla Verde, que evalúa las condiciones atmosféricas de la ciudad (Narváez, 2021).

A pesar de estos resultados favorables, la relación entre el crecimiento urbano, la disminución del arbolado urbano y la calidad del aire motiva la necesidad de comprender el papel del arbolado

urbano en la remoción de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ . Este enfoque busca aprovechar al máximo los servicios ecosistémicos y contribuir a abordar problemas globales como el cambio climático y la sensación térmica de la ciudad (Cepeda, 2021).

## **¿Cuál es la contribución del arbolado urbano en la remoción de material particulado $PM_{10}$ y $PM_{2.5}$ en la ciudad de Barranquilla en el año 2019?**

### **2. Justificación**

El arbolado urbano en las ciudades no solo cumple un papel estético y estructural, sino que desempeña un papel fundamental al proporcionar diversos servicios ecosistémicos esenciales para la calidad de vida de la población. Uno de estos servicios sobresalientes es su capacidad para eliminar contaminantes atmosféricos y capturar carbono, aspectos cruciales para abordar los retos asociados al crecimiento de la población y al desarrollo urbano (Ortiz, 2020).

Si bien se ha constatado que la calidad del aire en Barranquilla se encuentra dentro de los parámetros aceptables, según los índices de calidad del aire (Narváez, 2021), es imperativo investigar a fondo cómo contribuyen los árboles a través del servicio ecosistémico de remoción que brindan, y cómo estos pueden ser aprovechados de manera más eficiente. Esto adquiere especial relevancia en el contexto de los ambiciosos proyectos ambientales que el Distrito de Barranquilla ha impulsado con miras a convertirse en una Biodiversidad (Manrique, 2019).

Por eso, el arbolado se alinea con esta visión ambiental, aunque se supervisa constantemente los contaminantes criterio, incluyendo el material particulado generado por diversas actividades urbanas, como el tráfico vehicular, la construcción y la industria, hay que investigar y comprender las estrategias para maximizar los beneficios de los servicios ecosistémicos de los árboles en Barranquilla (Núñez, 2019).

Este estudio tiene el potencial de proporcionar información valiosa al evaluar cómo contribuyen los árboles a la reducción de material particulado  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  en el aire. Estos

hallazgos pueden respaldar la toma de decisiones relacionadas con la planificación y conservación del arbolado urbano, así como la identificación de las especies más relevantes en diferentes localidades y el desarrollo de estrategias de gestión efectivas. En última instancia, esta investigación contribuirá al desarrollo sostenible de Barranquilla, en línea con los objetivos ambientales, y por consiguiente ayudará a mejorar la calidad de vida de sus residentes.

### **3. Objetivos**

#### **3.1. Objetivo General**

Evaluar el servicio ecosistémico de remoción de material particulado  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  por el arbolado urbano de la ciudad de Barranquilla en el año 2019.

#### **3.2. Objetivos Específicos**

1. Identificar las especies arbóreas más representativas por localidad en la ciudad de Barranquilla en el año 2019.
2. Analizar el porcentaje de remoción de material particulado  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  por el arbolado urbano de la ciudad de Barranquilla en el año 2019.
3. Categorizar a través de mapas las áreas de mayor remoción de material particulado  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  por el arbolado urbano de la ciudad de Barranquilla en el año 2019.

### **4. Marco Referencial**

#### **4.1. Marco Conceptual**

##### ***4.1.1. Conceptos claves en la cobertura vegetal urbana***

**Ecosistemas urbanos.** El ecosistema urbano se puede describir como un entorno donde existe una estrecha interacción entre el entorno natural preexistente y el ambiente construido por el ser humano. El espacio urbano y el entorno de la ciudad pueden entenderse como espacios que combinan elementos naturales y artificiales, con relaciones recíprocas, a veces interdependientes.

Esto se evidencia en la relación entre la ciudad y su entorno, ya que este último proporciona los recursos naturales esenciales para la vida en la ciudad (Rositano, & Civeira, 2022).

**Arbolado urbano.** El arbolado urbano desempeña un papel fundamental en la estructura sostenible de las ciudades. Investigaciones han revelado que la variedad de especies de árboles en áreas urbanas es esencial para proporcionar servicios ecosistémicos y conservar la diversidad biológica. Además, estudios recientes a nivel mundial han subrayado la importancia de una buena cobertura vegetal en las ciudades para contrarrestar el cambio climático, almacenar carbono, mejorar la calidad del aire, reducir la contaminación, disminuir la escorrentía superficial y contribuir a mantener la biodiversidad en entornos urbanos. También ofrecen espacios de recreación para la población, lo que demuestra que los árboles urbanos tienen un impacto positivo en la salud y el bienestar mental de las personas (Pucha, 2023).

**Árboles.** Los árboles se destacan como las plantas leñosas más grandes, generalmente con una altura que supera los 5 metros. Se caracterizan por su tronco principal, del que surgen ramas cuando alcanzan cierta altura. Es relevante notar que los árboles no producen ramas desde el nivel del suelo, lo que constituye una distinción sencilla entre un árbol pequeño y un arbusto grande. Las ramas de los árboles también funcionan como sus tallos secundarios, entrelazándose para formar la copa del árbol de diversas maneras (Acosta, 2021).

**Inventario arbóreo.** El inventario forestal es una herramienta esencial para recopilar datos cualitativos y cuantitativos específicos sobre los ecosistemas forestales con el fin de facilitar la planificación, gestión, conservación y reforestación. Este proceso garantiza un nivel de precisión, exactitud y detalle requeridos. Un inventario forestal incluye variables como superficie, ubicación, tipos de bosque presentes, estructura, calidad, condiciones, volumen, tamaño, composición, entre otros. Estos datos son la base de un informe detallado del inventario que

incluye información sobre el margen de error y el nivel de detalle que se utilizará en el futuro (Bejarano, & García, 2018).

**Remoción de contaminantes.** La remoción de contaminantes atmosféricos elimina o reduce las sustancias nocivas o contaminantes del aire que pueden tener efectos negativos en la salud humana y el medio ambiente. Existen varios métodos y tecnologías para llevar a cabo la remoción de contaminantes atmosféricos, y la elección del método depende del tipo de contaminante y de las condiciones específicas del entorno (González, 2019).

#### ***4.1.2. Conceptos claves para el análisis estadístico.***

**Promedio.** El promedio es una medida que representa un valor típico o central en datos numéricos. El cálculo del promedio es una operación matemática común y se puede hacer de varias maneras, dependiendo del contexto y los datos disponibles (Cernas y Nava, 2020).

**Media.** La media es una medida importante en estadísticas y se utiliza para resumir y analizar datos. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la media puede verse afectada por valores atípicos en el conjunto de datos, por lo que no siempre refleja completamente la "tendencia central" de los datos. Otros estadísticos, como la mediana y la moda, también se utilizan para describir aspectos diferentes de la distribución de datos (Ortega, s.f).

**Mediana.** La mediana es el valor central de un conjunto de datos cuando se ordena en orden ascendente o descendente. Si hay un número par de valores, la mediana es el promedio de los dos valores centrales. La mediana se utiliza a menudo cuando los datos están sesgados o contienen valores atípicos que podrían afectar el promedio aritmético (Ortega, S.f).

**Desviación estándar.** Es una medida obtenida al calcular la raíz cuadrada de la varianza, para una población en general y una variable aleatoria que la representa. Su relevancia es considerable en el contexto de la inferencia clásica, sobre todo en el análisis de la distribución normal, ya que es uno de los parámetros clave junto con la media poblacional que influyen en ella. Sin embargo,

su importancia es más limitada en la inferencia tradicional cuando se trabaja con poblaciones que son finitas (Ruiz, 2017).

**Coefficiente de variación.** El coeficiente de variación (CV) es útil para comparar conjuntos de datos con escalas o unidades de medida diferentes, ya que proporciona una medida de variabilidad relativa que permite comparar mucho. Un CV más alto indica una mayor variabilidad relativa en relación con la media, mientras que un CV más bajo sugiere una variabilidad relativa más baja (Wilson, 2016).

**Test de diferencia mínima significativa de Fisher (LSD).** La prueba de Diferencia Mínima Significativa (LSD) de Fisher es un procedimiento estadístico utilizado para realizar comparaciones entre las medias de múltiples niveles de un factor, una vez que se ha rechazado la Hipótesis Nula de igualdad de medias mediante el análisis de varianza (ANOVA). Todos los métodos de comparación múltiple tienen como objetivo definir y concretar una Hipótesis Alternativa específica, similar a las que se utilizan en los análisis de ANOVA. El LSD se basa en la determinación de un umbral común, que se establece mediante una prueba de la t de Student. Luego, se realizan todas las comparaciones posibles entre las medias de los diferentes niveles del factor. Las diferencias que superen este umbral se consideran significativas, indicando una diferencia sustancial entre las medias, mientras que las diferencias por debajo del umbral se consideran no significativas (Llopis, 2013).

**Análisis ANOVA.** Este análisis es una técnica estadística utilizada para establecer las diferencias significativas entre las medias de tres o más grupos o poblaciones. ANOVA se utiliza comúnmente para investigar si existen diferencias estadísticamente significativas entre los grupos y, en caso afirmativo, dónde se encuentran esas diferencias. A menudo, se usa en contextos de investigación experimental o en comparaciones de múltiples grupos (Miranda, 2021).

**Statgraphics.** Es un software estadístico ampliamente utilizado en la industria y la investigación para el análisis de datos y la creación de gráficos. Este programa proporciona herramientas para realizar análisis de datos descriptivos, pruebas de hipótesis, análisis de regresión, diseño de experimentos y mucho más. También ofrece capacidades de gráficos avanzados que permiten crear una variedad de gráficos estadísticos y representaciones visuales de los datos (Torres & Del Pilar, 2007).

#### ***4.1.3. Conceptos claves para la ubicación espacial.***

**Sistemas de información geográficos.** Un Sistema de Información Geográfica, comúnmente abreviado como SIG, se compone de datos, métodos, tecnología informática y personas que se emplean en la manipulación de información geográfica. En su mayoría, estos sistemas están asociados con sistemas informáticos y se utilizan en diversas aplicaciones, incluida la investigación en ciencias de la Tierra. Un SIG no solo es una base de datos, aunque usa esta herramienta informática para almacenar datos adquiridos (Rdicelli, Pomboza, Villacrés, & Boderó, 2019).

**Georreferenciación.** La georreferenciación es el proceso técnico que busca establecer una relación unívoca entre cualquier punto en la superficie terrestre y un marco de referencia convencional. Como consecuencia de este procedimiento, se asignan las coordenadas geográficas o las coordenadas planas proyectivas generales a dicho punto georreferenciado. En esencia, la georreferenciación permite identificar el lugar único en la superficie terrestre que corresponde a una parcela específica (Suprema Corte de Justicia, s.f.).

## **4.2. Marco teórico**

### ***4.2.1. Calidad Del Aire***

La calidad del aire ha sido un tema de relevancia a nivel global durante muchos años, debido a la influencia negativa tanto de actividades antropogénicas como de fenómenos naturales en su

deterioro. Las medidas que determinan la calidad del aire están relacionadas con la pureza o con la ausencia de contaminantes atmosféricos que son introducidos en el medio ambiente, (Manisalidis et al., 2020); y para las que se han desarrollado metodologías de monitoreo con el fin de efectuar dichas mediciones, estimar concentraciones y establecer medidas regulatorias.

Históricamente la calidad del aire ha sido una problemática que ha aquejado a millones de personas y que hoy por hoy gracias a los avances e investigaciones se ha logrado determinar que, la contaminación de esta ha sido responsable de millones de muertes. Desde el siglo XVIII, en Europa se inició con la aplicación de medidas como la prohibición del carbón, perjudicial para la salud; después, en el siglo XIX, inicia el reconocimiento de la contaminación del aire, donde autores como Robert Angus Smith investigaron la polución atmosférica. Posterior a ello llegó la implementación de leyes, ejecución de conferencias y mesas de trabajo, y la creación de acuerdos y programas con el fin de abordar los efectos de múltiples contaminantes y las medidas a implementar para su disminución y control (Fowler et al., 2020).

#### **4.2.1.1. Contaminantes Atmosféricos**

La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha reiterado en diferentes ocasiones los efectos adversos de la exposición humana a la contaminación del aire, y ha referenciado el impacto de los contaminantes atmosféricos tales como Material particulado ( $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ ), Ozono ( $O_3$ ), Dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ), Dióxido de azufre ( $SO_2$ ) y Monóxido de carbono ( $CO$ ); para los que también ha dado recomendaciones y niveles permisibles de referencia. (WHO, 2021). Con base en investigaciones realizadas, se han logrado definir e identificar alternativas para reducir su generación, y se ha logrado describir y analizar su composición. El material particulado se define como la mezcla de partículas sólidas y líquidas presentes en el aire, que se clasifican según su tamaño en  $PM_{10}$ , con un tamaño de  $10 \mu$  (micrómetros),  $PM_{2.5}$ , con un tamaño de  $2.5 \mu$ , y últimamente se ha descubierto el aumento de partículas de un tamaño de  $0,1 \mu$ ; cuyo origen es de

fuentes tanto naturales como artificiales, siendo estas últimas las más responsables de las altas concentraciones (Lima, 2022).

El ozono ( $O_3$ ) es un contaminante atmosférico que se puede definir como la mezcla entre Óxidos de Nitrógeno ( $NO_x$ ) y Compuestos Orgánicos Volátiles (COV), y que se forma en presencia de la luz solar. Por otra parte, también como contaminante atmosférico figura el Dióxido de Nitrógeno, el cual es un gas producto de reacciones químicas en la atmósfera y que se da por la combinación de óxido de nitrógeno y oxígeno, principalmente en la quema de combustibles a altas temperaturas tal como en industrias o vehículos. El Dióxido de Azufre es parte del conjunto de contaminantes atmosféricos y, al igual que el Dióxido de Nitrógeno, se da por la quema de combustibles fósiles, es un gas proveniente de industrias y de erupciones volcánicas, cuya particularidad se deriva de un elemento con azufre. Por último, también como contaminante de la atmósfera, el Monóxido de Carbono es un gas de la combustión incompleta de elementos con carbono y que, como los demás, representa un gran riesgo para la salud humana y al medio natural (Lima, 2022).

Para identificar los múltiples perjuicios de los contaminantes atmosféricos, se diseñaron normas e implementaron estándares para garantizar la buena calidad del aire. Internacionalmente, organizaciones como la OMS han establecido metas para reducir las concentraciones y han recomendado niveles de concentración de los contaminantes para los que se trabaja en tres ámbitos que son, principalmente, conocimiento, evidencias y medición de progresos, seguido de fomento y apoyo técnico y por último liderazgo y coordinación para la protección de la salud pública (World Health Organization: WHO, 2022). Por su parte, Colombia cuenta con diferentes resoluciones y decretos en los que se establecen estándares de calidad del aire, niveles máximos permisibles y disposiciones para gestionar adecuadamente este recurso (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022).

#### **4.2.1.2. Fuentes De Contaminación Atmosférica**

Como la calidad del aire afecta a los contaminantes, es importante reconocer que fenómenos naturales y actividades humanas generan la liberación de estos al aire, por lo que se altera su calidad. Las concentraciones de los componentes atmosféricos están relacionadas, en parte, con las emisiones de fuentes naturales que se derivan de procesos que incluyen erupciones volcánicas, emisiones marinas, procesos biológicos, incendios forestales y tormentas de polvo y arena. Sin embargo, desempeñan un papel importante en los ciclos naturales del planeta, contribuyen a regular la temperatura a nivel global, mantienen el equilibrio químico de la atmósfera y han influido significativamente en la evolución de los ecosistemas. Las antropogénicas causan las alteraciones más devastadoras en la calidad del aire y los efectos negativos en la salud humana y el deterioro del medio ambiente, como las industriales, de transporte, de generación de energía, de agricultura y ganadería (Boldo, 2016).

#### **4.2.2. Material Particulado**

El material particulado es una mezcla de partículas sólidas y líquidas suspendidas en el aire. (“El riesgo para la salud de las partículas en suspensión”) Sin embargo, se categorizan según su tamaño. Según las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud, el estudio de este contaminante se resume en las de menor o igual a 10 micrómetros ( $PM_{10}$ ) y las de diámetro menor o igual a 2.5 micrómetros ( $PM_{2.5}$ ) (Núñez, 2019).

##### **4.2.2.1. Material Particulado $PM_{10}$ Y $PM_{2.5}$**

Este tipo de partículas tienen diversos tiempos de vida y de retención en la atmósfera, siendo el tamaño de las partículas el factor determinante en su tiempo suspensión en el aire (ver Figura 1). Las partículas de mayor tamaño se suspenden durante horas, y las más pequeñas pueden permanecer en suspensión durante días o semanas. Además, los estudios han demostrado que

también se dan variaciones de este tipo en función de la capa atmosférica en la que se encuentren (Seinfeld and Pandis, 2016).

### Figura 1

*Dimensiones de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  en comparación con el cabello humano y la arena fina de playa.*



**Nota.** Ilustración de referencia de las dimensiones de tamaño de los contaminantes  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  respecto al cabello humano y la arena fina de playa. **Fuente:** (US EPA, 2022).

#### 4.2.3. Servicios Ecosistémicos

Los conceptos y definiciones de los servicios que brindan los ecosistemas son relativamente nuevos, una de las primeras definiciones que se les dio a estos, y que hoy en día se mantiene vigente, fue por Cortez y otros autores, (1997). Los cuales precisaron que “los servicios ecosistémicos son los beneficios directos e indirectos que obtiene la población humana de las funciones del ecosistema”.

##### 4.2.3.1. Tipos de servicios ecosistémicos

Los servicios que se pueden obtener de la estructura natural de los ecosistemas son muchos, debido a esto se manejan tres tipos de servicios ecosistémicos, que van desde los primarios, hasta los tangibles y no tangibles. Los servicios primarios, son aquellos que se consumen de forma

directa, también reciben el nombre de recursos naturales, de estos pueden obtener bienes como los alimentos, recursos hídricos, energía, medicamentos, materiales para construir, entre otros. Los servicios secundarios son los que influyen en la regulación de las condiciones en las que vive una sociedad y el entorno en el que desarrollan todas sus actividades. Los bienes que se obtienen de este tipo de servicios son, regulación climática, regulación de inundaciones y protección costera. Por último, están los servicios terciarios, conocidos por brindar bienes tangibles y no tangibles, mediante actividades recreativas, conforman el paisajismo del territorio, y se relacionan con la identidad de las comunidades que viven alrededor del ecosistema (Balvanera, 2012).

Los sectores urbanos tienen una alta demanda de numerosos servicios ecosistémicos, asociados con los bienes del suelo, los beneficios que se obtienen del medio ambiente y del arbolado urbano para regular el clima de la ciudad, gestionar los recursos hídricos, estructurar el paisajismo y la biodiversidad urbana, y garantizar la oferta de cultivos alimenticios (Cantuarias, 2021).

El rol que cumple un arbolado urbano es muy importante y en las nuevas agendas de desarrollo urbano a nivel mundial, cuenta con un lugar especial dentro de estas, así como se incluyen vías, ciclo rutas, urbanizaciones, espacios peatonales, etc. También se deben incluir los espacios verdes y los parques naturales urbanos (Orellana, 2022).

#### **4.2.3.2. Servicios ecosistémicos proporcionados por el arbolado urbano**

Al estar conformado por organismos vivos, como los árboles, que pueden desarrollarse en zonas urbanas y dentro de la sociedad, el arbolado urbano impacta positiva y decisivamente en el mejoramiento de la calidad de vida de las personas, que se benefician directa e indirectamente de este. El arbolado urbano es el medio natural que se quiere integrar a la infraestructura gris que caracteriza a las ciudades. Aunque en los suelos urbanos no se dan las mejores condiciones para

su desarrollo, los aboles ofrecen servicios esenciales para mejorar el entorno donde las personas se desenvuelven día a día (Orellana, 2022).

#### **4.2.3.3. Servicio Ecosistémico De Regulación**

La regulación hace parte de los servicios ecosistémicos secundarios y recae sobre muchos medios naturales como el agua, el aire, el clima, y en la polinización y distribución de semillas. En todas las actividades de regulación, la cobertura vegetal es fundamental; en materia de regulación hídrica ayuda a la conformación de escorrentías superficiales, y en la absorción de enriquecer las aguas subterráneas; para el aire y el clima, una buena cobertura vegetal es protagónica en la captura y almacenamiento de carbono, en la remoción de contaminantes atmosféricos, en la producción de oxígeno, disminución de la irradiación y mantenimiento de la temperatura (Gómez, & Ballinas, 2022).

#### **4.2.4. Interacción entre arbolado, servicios ecosistémicos y material particulado**

La remoción de contaminantes atmosféricos es un servicio ecosistémico que brinda el arbolado urbano, este hace parte de los servicios secundarios encargados de la regulación, Este servicio en particular tiene un impacto notorio en la calidad de vida de las personas, ya que al tratarse del recurso aire, y el nivel de carga contaminantes en este, la salud pública es la que está comprometida. Este es un proceso en el cual influyen muchas variables, estas están asociadas a la carga de contaminantes que se encuentre en la atmosfera, las condiciones climáticas de la región, la cobertura vegetal y las especies arbóreas que la constituyen, lo que hará que los valores de remoción sean mayores o menores, según el comportamiento de estas variables (Arroyave et al, 2018).

Para examinar la capacidad de ciertas especies de plantas o árboles para retener partículas, es importante estudiar cuidadosamente las características funcionales de la flora. Estas características se refieren a los rasgos químicos y físicos que pueden servir como indicadores de

la respuesta de las plantas a los cambios ambientales. Estos rasgos están asociados al área foliar de la especie, la densidad estomática con la que cuente, el tipo de hoja y la longitud foliar del árbol (Ríos, 2022).

La capacidad de la vegetación para retener partículas se produce principalmente a través de las hojas, y esto se debe a la variedad de estructuras presentes en las hojas, las cuales varían de una especie a otra y determinan su eficacia para capturar partículas. Se ha observado que, en general, las especies con hojas más pequeñas, anchas y rugosas son más efectivas en la captura de partículas que las hojas lisas y suaves. Dependiendo de las características de la hoja, ésta puede desempeñar mejor ciertas funciones. Por ejemplo, los tricomas (crecimientos o apéndices como: pelos, escamas o papilas) aumentan la rugosidad y la superficie de contacto con las partículas, lo que reduce la cantidad de partículas suspendidas en el aire (Vargas, 2021).

#### ***4.2.5. Capacidad De Remoción De Contaminantes Del Arbolado urbano***

Existen diversas formas de estimar la cantidad de material particulado retenido por la vegetación, que puede realizarse mediante experimentos en laboratorio o mediante modelos numéricos y físicos. Por lo general, los métodos utilizados para estimar la captura de partículas por la vegetación se centran en la estimación de las partículas capturadas en la superficie de las hojas. Se ha realizado poca investigación sobre el desempeño de otras partes de la vegetación en la captura de partículas. En cuanto a las hojas, existen tres métodos experimentales utilizados para su evaluación: el método de lavado de hojas, el método del regenerador de aerosoles y el método de microscopía electrónica de barrido (Vargas, 2021).

Por otra parte, Vieco en el año 2014, dejó claro que, es esencial comprender la habilidad de las especies de plantas que se encuentran en las áreas verdes para retener partículas y considerar esta función en el diseño de proyectos paisajísticos en zonas urbanas. La vegetación en las ciudades,

al capturar material particulado, puede mejorar la calidad del aire y reducir los efectos negativos en la salud, aumentando el bienestar de las personas.

El método comparativo es uno de los métodos más comunes utilizados para evaluar la capacidad de la vegetación para remover contaminantes atmosféricos. Este método implica el estudio y análisis comparativo del comportamiento de los contaminantes atmosféricos en áreas urbanas y suburbanas. A través de la comparación de porcentajes, se ha demostrado que la vegetación en áreas urbanas puede remover hasta un 11% de contaminantes atmosféricos, puntualmente PM 2.5, mientras que, en áreas suburbanas, este porcentaje puede superar el 15%. Estos resultados subrayan la importancia de contar con una buena cobertura vegetal para mejorar la calidad del aire (Cardona, & Bermúdez, 2019).

#### ***4.2.6. Gestión Y Planificación Del Arbolado Urbano Para La Remoción De Contaminantes***

Cardona y Bermúdez en su investigación realizada en el año 2019 y que lleva como título “Arbolado urbano como estrategia de gestión de la calidad del aire” dicen que, para lograr una eficiencia en cuanto a la remoción de contaminantes atmosféricos por el arbolado urbano, es importante elegir especies que sean adaptables a las condiciones ambientales de las zonas urbanas y que tengan una alta tolerancia a la contaminación, así como un alto rendimiento esperado ante las condiciones futuras. Incluso las especies con bajos índices de tolerancia pueden ser utilizadas como bioindicadores de la calidad ambiental en la zona, lo que permite tomar decisiones y monitorear su evolución a lo largo del tiempo.

La ciudad de Barranquilla ha establecido una estructura vegetal sólida mediante la implementación de proyectos sostenibles y plantaciones masivas. Los espacios verdes urbanos, parques públicos y jardines están compuestos por una diversidad de especies arbóreas, lo que ha llevado a la ciudad a ser reconocida mundialmente como una ciudad verde y sostenible. La implementación de estos proyectos ha permitido a la ciudad competir por diversos

reconocimientos y obtener fondos para continuar formulando y desarrollando proyectos similares que enriquezcan aún más su arbolado urbano (Jiménez, 2020).

La elección de las especies vegetales para desarrollar estos proyectos sostenibles y de siembra masiva se realiza según las necesidades específicas del entorno o lugar de siembra, considerando las limitaciones del área para evitar conflictos con la infraestructura existente o interrupciones del servicio, y así alcanzar los objetivos establecidos al maximizar el potencial del arbolado urbano (Cardona, & Bermúdez, 2019).

### **4.3. Marco Legal**

La problemática de la calidad del aire no se limita a una región específica, sino que es un desafío a nivel global, ya que el aire no conoce fronteras geográficas y los contaminantes pueden dispersarse por la acción del viento. Esto significa que los contaminantes pueden desplazarse hacia áreas menos contaminadas, causando efectos perjudiciales tanto en seres humanos como en la flora y fauna (Pérez, 2017).

La Organización Mundial de la Salud ha liderado esfuerzos a nivel mundial para detectar y abordar la contaminación atmosférica. Sin embargo, esta tarea se vuelve más compleja con el crecimiento de la población mundial, que a su vez aumenta la demanda de combustibles tanto fósiles como no fósiles, en el sector del transporte e industrial. Como resultado, la calidad del aire está en constante cambio debido al aumento de la población global (Pérez, 2017).

Las recomendaciones internacionales en cuanto a la calidad del aire se remontan a varias décadas atrás, con la creación de organizaciones y acuerdos internacionales para abordar la contaminación del aire y sus efectos en la salud humana y el medio ambiente. Las pautas y límites más importantes en la historia para regular la calidad del aire han surgido de los siguientes eventos:

*Acuerdo de Viena de 1985 y el Protocolo de Montreal de 1987:* Estos acuerdos internacionales se centraron en la protección de la capa de ozono estratosférico. Aunque su enfoque principal fue la protección del ozono, también tuvieron un impacto positivo en la calidad del aire en general. El Protocolo fue acordado en 1987 y comenzó a aplicarse el 1° de enero de 1989. Desde entonces, se ha sometido a diversas revisiones y se sostiene la esperanza de que, si todos los países cumplen con las metas establecidas en el tratado, la capa de ozono podría recuperarse completamente para el año 2050 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022).

*Convenio de Ginebra sobre la contaminación atmosférica transfronteriza a larga distancia 1979:* Este convenio estableció medidas para abordar la contaminación del aire que atraviesa fronteras internacionales, incluida la lluvia ácida y la contaminación por partículas finas. El Convenio fue suscrito en 1979 durante una reunión celebrada en Ginebra bajo la jurisdicción de la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (CEPE) y comenzó a ser efectivo en 1983. Este convenio es importante dentro de la estructuración y análisis de los antecedentes para este trabajo investigativo, ya que en este fue expuesto el contaminante a estudiar, material particulado (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, s. f.).

*Protocolo de Kioto 1997:* Aunque principalmente se centró en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero para combatir el cambio climático, el Protocolo de Kioto también tuvo un impacto en la calidad del aire al alentar a los países a reducir sus emisiones de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), que son precursores de la lluvia ácida y la formación de partículas finas. En un principio, se adoptó el 11 de diciembre de 1997 en Kioto, Japón, pero no se hizo efectivo hasta el año 2005. Luego, durante la decimoctava Conferencia de las Partes sobre cambio climático (COP18), se confirmó la extensión del segundo período de vigencia del Protocolo de Kioto, que tuvo lugar desde enero de 2013 hasta diciembre de 2020 (Medio Ambiente Y Recursos Naturales, s. f.).

*Directiva Marco de la Unión Europea sobre la calidad del aire 2008:* La Unión Europea ha implementado directivas y regulaciones para mejorar la calidad del aire en sus Estados miembros, incluida la Directiva Marco sobre la Calidad del Aire, que establece límites de concentración para contaminantes atmosféricos y objetivos para reducir emisiones (Parlamento europeo, 2008).

*Acuerdo de París 2015:* Aunque se centra en mitigar el cambio climático, el Acuerdo de París reconoce la interconexión entre la calidad del aire y el clima y promueve la reducción de emisiones de contaminantes del aire en el contexto de la mitigación del cambio climático. Mediante el Acuerdo de París, las naciones instauraron un sistema de mayor transparencia. A partir del año 2024, los países informarán sobre las acciones tomadas y los avances en la reducción de los efectos del cambio climático, las iniciativas de adaptación y la asistencia brindada o recibida. También se establecerán procedimientos internacionales para revisar estos informes (Organización de las Naciones Unidas, s. f).

Las normas internacionales para la calidad del aire son pautas y límites establecidos por organismos internacionales y gobiernos para regular y controlar la contaminación del aire y garantizar que el aire que respiramos sea seguro y saludable. La Organización Mundial de la Salud (OMS) establece directrices para la calidad del aire en términos de concentraciones seguras de contaminantes atmosféricos. Sus recomendaciones se basan en la investigación científica y se actualizan periódicamente. La OMS proporciona directrices para contaminantes como el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), el dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), las partículas PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>, el ozono (O<sub>3</sub>) y el monóxido de carbono (CO), entre otros (Organización Mundial de la Salud, 2022).

A nivel regional y nacional, cada país puede tener sus propias normas y regulaciones para la calidad del aire. Estas normas a menudo se basan en las recomendaciones de la OMS y los acuerdos internacionales pertinentes. Los límites y estándares varían según el país y pueden incluir regulaciones para contaminantes específicos, como el dióxido de azufre, el óxido de

nitrógeno, las partículas en suspensión, el ozono, el monóxido de carbono y otros (Organización Mundial de la Salud, 2021).

Colombia ha tomado conciencia de la problemática mundial de la contaminación atmosférica, por eso se ha estructurado su legislación ambiental tomando como referencia las recomendaciones de los entes internacionales, y así estableció los límites frente a esta temática para mantener el equilibrio entre el medio natural y el ser humano (Villalobos, 2007).

La calidad y adecuada gestión del aire se ha convertido en un tema importante en el territorio nacional, y cada municipio ha adelantado avances relacionados con este importante ámbito. La ciudad de Barranquilla no ha sido la excepción en cuanto a la preocupación por la calidad del aire y su impacto en los habitantes, por lo que, como un destacado centro urbano en Colombia, ha impulsado la necesidad de evaluar y analizarla (Alcaldía de Barranquilla, 2020).

En el marco Nacional, las normativas relacionadas con la calidad del aire y los recursos naturales desempeñan un papel fundamental y en dicho contexto hay algunas de ellas que destacan, como lo es La ley 99 de 1993, la cual estableció la estructura institucional para el manejo y administración de los recursos naturales renovables y del medio ambiente en el país y fue promulgada para diciembre de 1993. Representa un hito en el marco legal, y establece fundamentos basados en principios generales que van orientados al desarrollo sostenible, tales como la protección de la biodiversidad como patrimonio nacional, el derecho a una vida saludables y en armonía con el medio ambiente y la protección de zonas críticas y recursos del país. Esta ley fundamenta la creación del Ministerio del Medio Ambiente y su estructura, y el desarrollo de políticas encaminadas a la protección y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables en Colombia (El Congreso de Colombia, 1993).

Por otro lado, la resolución 2254 de 2017, emitida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y con vigencia a partir del 1 de enero de 2018, en donde se adopta la norma de calidad

del aire y se establecen los límites máximos permisibles para la concentración de contaminantes. La resolución se enmarca en el cumplimiento de los artículos 79 y 80 de la constitución política, que establece el derecho a disfrutar de un ambiente sano y el deber de proteger la integridad del medio ambiente. También se basa en los numerales 10, 11 y 14 del artículo 50 de la ley 99 de 1993, que establece que el ministerio de ambiente y desarrollo sostenible debe determinar normas y regulaciones ambientales, incluidas las de contaminación atmosférica.

Esta resolución promueve la implementación de sistemas de monitoreo de la calidad del aire, y responde a la necesidad de garantizar un ambiente sano para procurar la buena salud de la población colombiana, y su adopción representa un avance significativo en la gestión de los contaminantes atmosféricos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

Adicionalmente, el decreto 1076 de 2015, expedido en el mismo año y actualizado en agosto de 2023, que busca simplificar el ordenamiento jurídico de Colombia de las normas preexistente, por lo que no requirió de consulta previa al tratarse de normas que ya cumplían con regulaciones vigentes. Este decreto representa un esfuerzo del gobierno nacional al compilar la normativa relacionada con el sector de Ambiente y Desarrollo sostenible, y los aspectos que aborda el Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible como rector de la gestión de los recursos naturales renovables, su aplicación en todo el territorio colombiano, sobre entidades ambientales, corporaciones autónomas regionales, autoridades ambientales, y personas naturales y jurídicas (La República de Colombia, 2015).

#### **4.4. Estado del arte**

La introducción al estado del arte se enfoca en explorar los avances, tendencias y descubrimientos significativos en cuanto a la evaluación del servicio ecosistémico de remoción de material particulado  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  por el arbolado urbano. Se analizarán los métodos de evaluación, los factores que influyen en la remoción, las especies de árboles más eficaces, los

beneficios adicionales proporcionados por el arbolado urbano y los desafíos y consideraciones asociados.

En un mundo cada vez más urbanizado, comprender el potencial del arbolado urbano para mitigar la contaminación del aire es esencial para abordar los desafíos ambientales que enfrentan las ciudades modernas.

A nivel internacional, se han realizado diversos trabajos relacionados con la temática desarrollada en la presente investigación. Uno de estos estudios fue realizado por Hernández, J.; Cuesta, E.; Ortiz, B.; Rosano, E. (2023), titulado “*Servicios ecosistémicos del arbolado urbano en la Laguna de San Baltazar, Puebla, mediante el uso del software i-Tree*” en la Universidad Autónoma del Estado de México, México. Esta investigación tuvo como objetivo principal determinar los servicios ecosistémicos del arbolado urbano en la Laguna de San Baltazar, Puebla, México, utilizando el software i-Tree.

Esta investigación tuvo como objetivo principal determinar los servicios ecosistémicos del arbolado urbano en la Laguna de San Baltazar, Puebla, México, utilizando el software i-Tree. Se aplicó un enfoque cuantitativo que incluyó un inventario arbóreo, la digitalización de datos, la estimación de la capacidad de remoción de contaminantes, y la comparación con otras áreas verdes urbanas. Se descubrió que la Laguna de San Baltazar alberga 3,403 árboles de 23 especies, siendo el cedro blanco y el trueno lila las más predominantes. Se estima que estos árboles eliminan anualmente 324 kg de contaminantes atmosféricos con un valor económico de 432,000 pesos. A pesar de una diversidad relativamente baja, supera a otras áreas verdes urbanas y beneficia la fauna urbana. En comparación con otros espacios verdes en Puebla, el arbolado en la Laguna de San Baltazar exhibe una densidad y diversidad significativamente más altas, destacando su potencial para mejorar la calidad del aire y su influencia en la vida de la fauna urbana.

Siguiendo la línea de los servicios ecosistémicos que nos puede llegar a brindar la cobertura vegetal con la que cuenta una ciudad, tenemos la investigación realizada por Vázquez, S.; Ramírez, M.; Arceo, S.; Solís, J. (2023). Titulado “*Eliminación de la contaminación por el bosque urbano en Las Palmas, Colima, México*”, publicado en la revista Madera y Bosque.

El objetivo de este trabajo fue identificar especies y ejemplares relevantes para mejorar la calidad del aire en la colonia Las Palmas, Colima, México. Se utilizó una metodología cuantitativa en tres fases: la delimitación del área para un inventario arbóreo, la importación de datos al software i-Tree Eco v6.0.23 y el análisis de los resultados. Los árboles eliminaron 220.49 kg/año de contaminantes atmosféricos, con una mayor eliminación de ozono (60.13%) y las especies más representativas en este proceso fueron Parota, higueras y ficus (47.85%). Aunque la contribución del bosque urbano es pequeña a nivel municipal, su impacto local es significativo y es esencial conservar y cuidar estos árboles para mantener los beneficios de la reducción de la contaminación del aire.

El desarrollo de estudios para conocer los servicios ecosistémicos urbanos es una temática relativamente nueva, la cual se ha venido trabajando en distintos países, uno de estos trabajos fue el realizado por Orellana, G. (2022). Titulado “*Los servicios ecosistémicos del arbolado urbano: caso de estudio Barcelona*”, en la universitat politècnica de Catalunya, España.

Esta investigación se centró en evaluar la estructura, los servicios ecosistémicos y el valor económico del arbolado urbano en Barcelona utilizando la herramienta i-Tree ECO. El autor empleó un enfoque cuantitativo, dividiendo el área de estudio en parcelas para recopilar datos en el terreno, que posteriormente digitalizó con i-Tree Eco. Los resultados indicaron una densidad de 63 árboles por hectárea en el área, notablemente menor que la densidad en áreas urbanas generales. Se estimó que estos árboles pueden eliminar 51,12 toneladas métricas de contaminantes del aire anualmente, con un valor económico de 3.130.000 € (Euros). También,

almacenan 55.851,10 toneladas de carbono y capturan 5.949,03 toneladas anualmente, equivalentes a 8.970.000 € y 956.000 €, respectivamente. En resumen, los árboles en Barcelona contribuyen significativamente a mejorar la calidad de vida y a reducir los riesgos ambientales, a pesar de no eliminar por completo los contaminantes del aire ni prevenir desafíos como inundaciones.

En investigaciones recientes relacionadas con los servicios ecosistémicos urbanos, se han utilizado en gran medida metodologías y herramientas similares, como las citadas anteriormente. Una de las herramientas destacadas es i-Tree Eco, que ha desempeñado un papel importante en la orientación de investigaciones en esta área. Este programa proporciona una base completa para la organización y el análisis de datos, lo que lo convierte en una de las herramientas más completas disponibles para este tipo de investigaciones a nivel mundial, y, por lo tanto, es ampliamente utilizada en muchas de ellas. No obstante, es importante destacar que i-Tree Eco no es la única metodología utilizada en este campo, ya que existen otras metodologías que también permiten lograr los objetivos de investigación y obtener resultados satisfactorios.

Partiendo de los anteriores es importante que en el desarrollo de nuestra investigación se analicen metodologías diferentes a la desarrollada en nuestro proyecto, como la estructurada en el trabajo elaborado por Paracta, D. (2021). Titulado *“Retención del polvo atmosférico sedimentable (pas) en las especies ficus benjamina y schinus molle indicadoras de la calidad del aire en la alameda Bolognesi y av. Leguía, referentes para la planeación urbana sustentable Tacna”*, en la universidad privada de Tacna, Perú.

Trabajo investigativo que tuvo como objetivo; evaluar y comparar la capacidad de retención de capacidad de retención de polvo atmosférico (PAS) en las hojas de Schinus molle y Ficus benjamina; especies representativas de la ciudad de Tacna, presentes en la Av. Bolognesi y Av. Leguía; para considerarlas en futuros proyectos de planificación urbana. En este estudio de

investigación, se evaluó y comparó el PAS en las hojas de *Schinus molle* y *Ficus benjamina*, dos especies representativas en Tacna, utilizando la metodología de Dalmasso et al. (1997) que consta de seis fases. Los resultados revelaron que *Ficus benjamina* retuvo tres veces más PAS que *Schinus molle*, con una media de 586.748  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$  en contraste con 186,72  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$  en las avenidas Bolognesi y Leguía. En resumen, se concluye que *Ficus benjamina* muestra una capacidad de retención de PAS significativamente superior a *Schinus molle* en el contexto urbano de Tacna, lo que tiene implicaciones para futuros proyectos de planificación urbana.

Es de gran relevancia comprender el contexto global en el que se desarrollan estas metodologías para orientar nuestra investigación. Sin embargo, es igualmente esencial estar al tanto de cómo se aplican estas metodologías en nuestro país y sus distintas regiones. Colombia, siendo un país con una gran diversidad biológica, ofrece numerosos servicios ecosistémicos tanto en entornos urbanos como rurales. Por lo tanto, el conocimiento de estas metodologías y su aplicación nos permite identificar y aprovechar al máximo estos recursos.

En Colombia, la contaminación del aire es un problema con múltiples desafíos, lo que subraya la importancia de explorar soluciones para abordar esta cuestión. Entre las áreas más afectadas por la mala calidad del aire, el Valle de Aburra se destaca. Por lo tanto, es esencial aplicar en esta región metodologías que identifiquen los servicios ecosistémicos disponibles como una respuesta necesaria a esta problemática. Uno de los trabajos realizados en esta región, referente a estas metodologías fue elaborado por Calle, A. (2022). Titulado "*Servicios ecosistémicos del arbolado urbano de los espacios públicos del valle del río Aburrá en Medellín*", en la universidad nacional de Colombia. Investigación que tuvo como objetivo principal; evaluar los servicios ecosistémicos que aporta el arbolado urbano de los espacios públicos del valle del río Aburrá en Medellín.

En esta investigación, se evaluaron los servicios ecosistémicos proporcionados por el arbolado urbano en el Valle del Río Aburrá en Medellín, utilizando una metodología cuantitativa y datos

de inventario de cuatro áreas de estudio. Se emplearon programas informáticos como i-Tree Eco, R Studio y Arc GIS 10.5 para digitalizar y organizar la información. Los resultados revelaron que los árboles urbanos contribuyen a reducir la temperatura de los parques, contrarrestando el efecto isla de calor al proporcionar sombra y liberar vapor de agua. Estos árboles eliminaron significativas cantidades de contaminantes atmosféricos anualmente, lo que es crucial en una ciudad como Medellín, donde la calidad del aire es vital para la salud pública. En conclusión, se resalta la importancia del arbolado urbano en la mejora del entorno y la calidad de vida en zonas urbanas, subrayando la necesidad de una planificación y gestión adecuada de estos recursos.

El valle de Aburra es una de las áreas del país que más se desarrollan investigaciones para conocer todos los servicios ecosistémicos con los que cuenta, una de estas fue elaborada por Ríos, Y. (2022). Titulada “*Captura de material particulado en puntos críticos del valle de Aburrá por parte de la vegetación urbana en relación con sus rasgos funcionales*”, en la universidad EIA, Colombia.

En este estudio, se analizó la capacidad de ciertas especies de flora del Valle de Aburrá para eliminar material particulado, centrándose en rasgos funcionales específicos. El autor adoptó un enfoque novedoso al identificar puntos de contaminación en la ciudad debido a partículas en suspensión y luego seleccionar dos especies representativas para su metodología. Utilizando hojas de los árboles muestreados, se evaluó la acumulación de partículas a lo largo del tiempo. Los resultados revelaron una concentración superior de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  en la superficie de las hojas de *Thunbergia grandiflora* y *Ficus pumila*. Se concluyó que los tricomas desempeñan un papel crucial en la retención de partículas, y la naturaleza de la superficie de las hojas es un factor determinante para elegir especies que contribuyan a la reducción de material particulado en el aire.

La capital del país es otro punto crítico debido a la fuerte contaminación que experimenta, debido a esto se ven en la obligación de implementar medidas y desarrollar metodologías que ayuden en la minimización de los impactos ambientales relacionados con la contaminación que vive la ciudad, es por esto por lo que en (2022). González, J. Desarrolló un trabajo titulado, *“Valoración Biofísica y Sociocultural de Servicios Ecosistémicos de Tres Parques Urbanos de la Ciudad de Bogotá (Colombia)”*, en la universidad de ciencias ambientales y aplicada.

Esta investigación tuvo como objetivo principal evaluar los servicios ecosistémicos de los parques Enrique Olaya Herrera, El Tunal y Fontanar del Río en Bogotá. Para lograrlo, el autor se basó en enfoques previamente empleados, seleccionando cinco individuos arbóreos por especie en los parques estudiados y determinando los servicios ecosistémicos relacionados con su biología. Luego, se llevaron a cabo entrevistas para evaluar la percepción de los ciudadanos sobre estos servicios. Los resultados mostraron una baja capacidad de almacenamiento de carbono en los parques, y se destacó la falta de ecuaciones alométricas adecuadas para la vegetación urbana. La percepción de los usuarios fue mayormente egoísta, salvo en servicios con alta percepción altruista y de conservación. En resumen, los espacios verdes en entornos urbanos benefician la calidad de vida, pero se necesita más investigación en este tema en Bogotá.

Como mencionó el autor anterior, el conocimiento en cuanto a servicios ecosistémicos urbanos en la capital de nuestro país debe fortalecerse, es por esto por lo que en (2021). Piragauta, M. Desarrollo un trabajo su trabajo investigativo titúlalo *“Evaluación de los servicios ecosistémicos en el borde urbano de Bogotá para su gestión sostenible”*, en la universidad distrital Francisco José de Caldas, Bogotá.

Este trabajo se desarrolló con el propósito de caracterizar los servicios ecosistémicos y dinámicas en la UPZ 89 de Chapinero en Bogotá, utilizando el concepto de borde urbano y el marco del IPBES. Se buscó proponer acciones para el desarrollo sostenible del territorio. La

metodología involucró la identificación de actores, revisión de ecosistemas, evaluación de servicios ecosistémicos, análisis de impulsores de cambio y estudio de las relaciones entre los ecosistemas y los residentes. Se identificaron 15 beneficios de los ecosistemas, destacando servicios culturales y de regulación, subrayando la importancia de la vegetación y los páramos en la regulación del agua. En resumen, se necesita crear conciencia sobre la relevancia de los ecosistemas en áreas urbanas, ya que muchos desconocen su función y su impacto en la calidad de vida de la comunidad, a pesar de los esfuerzos de promoción de senderos ecológicos en Bogotá.

Anteriormente se examinó la situación a nivel nacional en lo que respecta a la identificación de los servicios ecosistémicos urbanos, pero no se debe pasar por alto la relevancia de comprender el panorama local. Es esencial conocer cómo se abordan estas investigaciones en nuestra región para determinar los servicios ecosistémicos que tenemos a disposición y las metodologías que se emplean para alcanzar este propósito.

La ciudad de Barranquilla al estar encaminada a convertirse en una biodiversidad no puede dejar de lado estas metodologías innovadoras que le permiten conocer los servicios ecosistémicos disponibles y poder utilizarlo para crecer de forma sostenible, es por esto por lo que en (2022). Se realizó un trabajo, elaborado por, Serrano, G. Titulado *“Diagnóstico del arbolado urbano en el distrito de Barranquilla”*, en el establecimiento público ambiental Barranquilla verde.

El trabajo se centró en realizar un diagnóstico del arbolado urbano en Barranquilla y evaluar los servicios ecosistémicos utilizando el software i-Tree. La metodología incluyó la recolección de datos de vegetación en el campo, su digitalización siguiendo pautas del programa y la generación de informes para su análisis. Se descubrió que la cobertura arbórea en Riomar supera el nivel recomendado, aunque conserva áreas verdes. Barranquilla captura aproximadamente 9,238 toneladas métricas de carbono al año y produce alrededor de 7,514 toneladas métricas de

oxígeno anualmente. En conjunto, estos hallazgos destacan los servicios ecosistémicos favorables en Barranquilla, que pueden respaldar su desarrollo sostenible y mejorar la calidad de vida de sus habitantes y visitantes en los años venideros.

Ya que se hace mención del Establecimiento Público Ambiental Barranquilla Verde, entidad distrital que regula los lineamientos ambientales en la ciudad, hay que citar el informe realizado en el año 2019, sobre la cuantificación de la cobertura arbórea del D.E.I.P de Barranquilla, informe que tuvo como objetivo principal identificar las zonas de la ciudad con mayor cobertura arbórea y establecer una línea base en la ciudad. La metodología empleada para el desarrollo de este informe consistió en una preestratificación de las cinco (5) localidades que conforman a la ciudad. Para ello fue necesario trabajar con imágenes satelitales y clasificar la cobertura vegetal y el uso del suelo, y lograr una cuantificación más precisa. Las coberturas vegetales se clasificaron en: Árbol, arbusto, edificaciones, superficie impermeable y superficie permeable. Dentro de los resultados arrojados en este informe, puede observar que, en Riomar, la cobertura arbórea alcanza el 39%, superando el nivel ideal recomendado del 30%. En contraste, las áreas de Norte Centro Histórico, Suroccidente, Suroriente y Metropolitana presentan un 21,55%, 26,25%, 21% y 20,75% de cobertura arbórea, respectivamente. La cobertura arbórea de la ciudad está por debajo de lo que se sugiere, con un promedio del 21%. Esto resalta la necesidad de promover proyectos de siembra estratégica y masiva para fortalecer nuestros ecosistemas urbanos.

Este estado del arte buscó destacar la necesidad de reconocer el valor de los servicios ecosistémicos que proporciona el arbolado urbano en términos de calidad del aire. Los resultados presentados en la literatura revisada demuestran la eficacia de los árboles en la captura de partículas contaminantes, lo que puede tener impactos significativos en la salud pública y la calidad de vida de los habitantes de las ciudades. Además, se resaltan los beneficios adicionales

de los árboles, como la reducción de la temperatura urbana, la captura de carbono y la mejora del bienestar psicológico de los residentes en las urbes.

## **5. Metodología**

Con el fin de alcanzar el objetivo planteado, la metodología se fundamenta en un enfoque cuantitativo, que involucra la aplicación de herramientas y análisis matemáticos y estadísticos para la síntesis y evaluación de la información.

Las metodologías cuantitativas no se limitan únicamente a la explicación, descripción o exploración de un fenómeno, sino que buscan realizar inferencias a partir de una muestra hacia la población en general. Esto les permite evaluar las relaciones entre diversos aspectos o variables observados en la muestra (Ugalde y Balbastre, 2013).

El propósito de esta investigación radica en establecer relaciones entre diversas variables y alcanzar generalización y objetividad en los resultados a través de una muestra representativa. A partir de esta muestra, se lleva a cabo un análisis exhaustivo que va más allá de la simple organización de datos en una lista, permitiendo la comprensión y explicación de los fenómenos estudiados (Sarduy. 2007).

### **5.1. Población y muestra**

La población de estudio para esta investigación estuvo conformada por los árboles urbanos presentes en la ciudad de Barranquilla durante el año 2019, y que fueron inventariados por parcela para identificar las especies arbóreas presentes en cada una de las áreas que conforman la ciudad, que se encuentra dividida en un total de 5 localidades: Metropolitana, Riomar, Norte-Centro Histórico, Suroccidente y Suroriente.

Como recurso fundamental, se hace énfasis en la participación en el Diagnóstico del arbolado urbano en el distrito de Barranquilla, liderado por el Establecimiento Público Ambiental (EPA)

Barranquilla Verde, ya que fue fundamental para la obtención de información crucial para el desarrollo de los objetivos propuestos en esta investigación.

Por su parte, en el proceso de inventario arbóreo, se siguieron procedimientos específicos que garantizan la precisión y representatividad de la muestra, y se recopilaron datos esenciales, como el Diámetro a la Altura del Pecho (DAP), la altura, la condición y la ubicación de los árboles, y que son fundamentales para el uso del software empleado para el análisis de remoción i-Tree Eco (ANEXOS D, E).

El inventario fue tipo muestral, mediante parcelas preestratificadas (que tuvieron un tamaño equivalente a 404.68 m<sup>2</sup>), entre las cinco localidades mencionadas anteriormente, el número total se calculó siguiendo las recomendaciones del Manual del Usuario de EcoV6, que sugiere al menos 200 parcelas como regla general para asegurar un error estándar del 10%. Para este caso en particular, se duplicaron el número de parcelas, y se añadieron 96 adicionales como precaución para disminuir el error estándar y obtener una estimación representativa de la cobertura vegetal total real de la ciudad y su capacidad de remoción.

Por su parte, el número de parcelas asignadas a cada localidad se determinó con base a los resultados obtenidos con i-Tree Canopy, que proporcionó información fundamental para el análisis de la población de árboles, su diversidad y su contribución a los servicios ecosistémicos en la ciudad, tal como se detalla en la tabla 1, donde se evidencia la representatividad de las localidades en el distrito de barranquilla en cuanto al porcentaje de cobertura arbórea (CA) y las parcelas correspondientes a cada una teniendo en cuenta esto:

**Tabla 1**

*Número de parcelas de las 5 localidades de la ciudad de Barranquilla.*

<b>Localidades</b>	<b>%CA</b>	<b>Número de parcelas</b>
Riomar	39,00%	88
Norte Centro Histórico	21,50%	80
Suroccidente	26,25%	95
Metropolitana	20,75%	160
Suroriente	21,00%	73
<b>Total</b>		<b>496</b>

*Fuente:* (Serrano, 2022)

Las parcelas se generaron aleatoriamente, utilizando una herramienta de generación aleatoria con distancia mínima, con la excepción de Riomar, donde no se especificó la distancia mínima, ya que algunas áreas de Barranquilla se excluyeron de la toma de muestras debido a razones de seguridad y acceso, y para compensar, se incrementó el número de parcelas en otras áreas.

Durante la recolección de datos, se tuvo acceso a 322 parcelas de las 496 parcelas establecidas. La información recopilada se procesó utilizando la herramienta i-Tree Eco V6 para caracterizar el arbolado urbano, determinar su valor ecológico y cuantificar los servicios ecosistémicos que proporciona a la ciudad (Serrano, 2022).

## **5.2. Procedimiento**

La metodología empleada en esta investigación se dividió en tres fases estratégicas con el objetivo de alcanzar los objetivos planteados (Figura 2).

La primera etapa implicó la recopilación de datos del arbolado urbano en las cinco localidades de Barranquilla durante el año 2019. Este proceso se realizó con un muestreo manual, utilizando

métodos de medición para registrar las características clave de cada árbol en el área de estudio (ANEXO D, F).

Posterior a la recopilación, los datos se digitalizaron en el software iTree-Eco, en donde se registró información del inventario del arbolado, información meteorológica y de contaminación atmosférica a nivel local. Cabe mencionar que, para el caso de los datos de meteorológicos y de calidad del aire, estos fueron suministrados por el establecimiento público ambiental, dado los fines investigativos y la pertinencia para el estudio. A partir de iTree-Eco, resultaron dos informes, el primero, que proporciona una lista detallada que abarca la distribución del arbolado urbano, su agrupación por localidad y parcela, y la cantidad de árboles en cada localidad (Metropolitana, Riomar, Norte Centro Histórico, Suroccidente y Suroriente), junto con la diversidad de especies presentes.

El segundo informe generado presenta información detallada sobre la capacidad de cada árbol para eliminar contaminantes criterio, y esto, gracias a que el software realiza cálculos numéricos a partir de los datos suministrados, y que están descritos por Nowak (Nowak, 2021). A partir de esto, se evidenciarán los porcentajes de remoción por las especies que conforman el arbolado urbano de la ciudad, y se posibilitó la remoción de material particulado  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  por el arbolado urbano en la ciudad de Barranquilla en 2019.

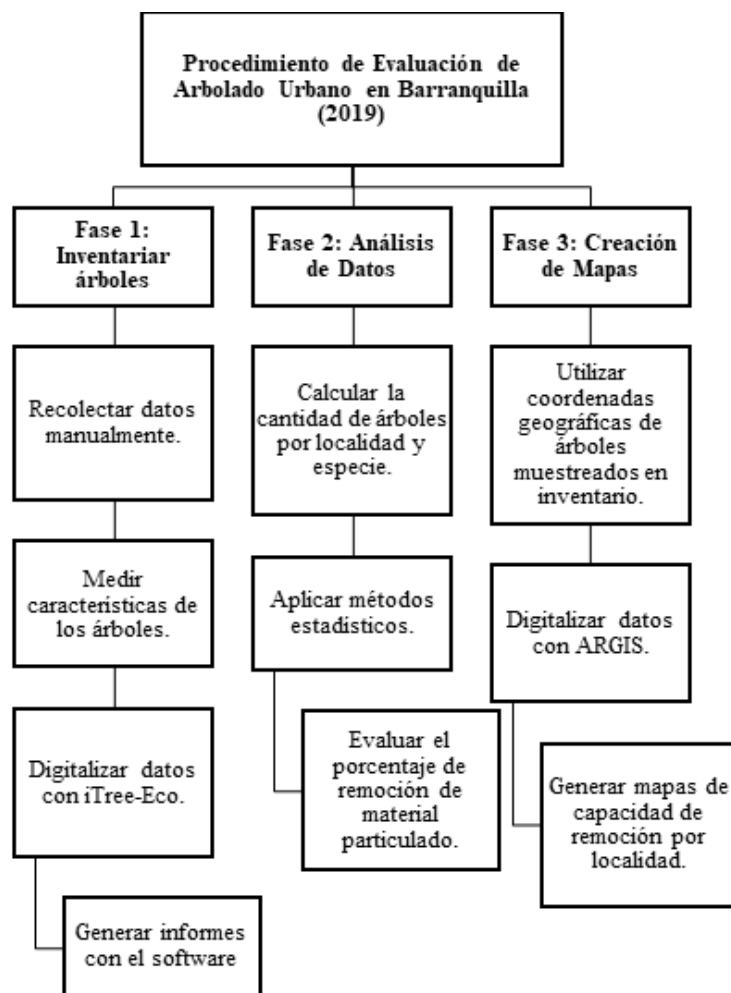
Consecuente a los 1063 datos obtenidos y su organizados, se les realizó el análisis estadístico, para el que se utilizó el software Statgraphics versión 16, y en donde se calcularon medidas de tendencia central y de variabilidad, como el promedio, mediana, desviación estándar y coeficiente de variación. Se utilizaron técnicas de estadística inferencial, como el análisis de varianza (ANOVA) y la prueba post-hoc de diferencia mínima significativa de Fisher (LSD), manejando un nivel de confianza del 95 %. Esto permitió determinar diferencias significativas en la

remoción de material particulado  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  entre diferentes localidades, brindando una comprensión del servicio ecosistémico proporcionado por el arbolado urbano en la ciudad. Finalmente, la última fase se centró en la creación de mapas y la visualización del comportamiento del material particulado  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  en las diferentes localidades, así como el servicio ecosistémico brindado por el arbolado urbano en Barranquilla en 2019. Esto se logró utilizando los datos de las coordenadas geográficas de las parcelas, recopilados durante el inventario del arbolado en campo. Después, estos datos se digitalizaron en el software ARGIS en su versión ArcGIS Pro, y se generaron mapas para clasificar la capacidad de remoción del arbolado urbano en cada localidad de la ciudad y visualizar las concentraciones de material particulado  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  en el área de estudio.

En el mismo software, se interpolaron las muestras mediante el método de Interpolación Inversa a la Distancia (IDW), cuya elección metodológica se justifica porque demuestra ser una herramienta eficaz para generar mapas de remoción de arbolado urbano, incluso en áreas sin cobertura vegetal, utilizando información ponderada y puntos de muestreo recopilados.

## **Figura 2**

*Diagrama de etapas del procedimiento para realizar la evaluación de la remoción por arbolado urbano en la ciudad de Barranquilla en el año 2019.*



*Fuente:* Elaboración propia.

### 5.3. Instrumentos y técnicas de recopilación de datos

Para evaluar el servicio ecosistémico de remoción de material particulado en Barranquilla durante 2019, se realizó un inventario de árboles en campo utilizando herramientas tales como: fichas de toma de datos (ANEXO F), cámara, GPS y varios tipos de metros para medir circunferencias y alturas de los árboles seleccionados. El formato de toma de datos para el inventario, específicamente diseñado para recopilar información pertinente, abarcó datos como: la especie arbórea, ubicación geográfica, condiciones del árbol, dimensiones como altura total y altura de la parte superior viva, ancho de la copa en direcciones norte-sur y este-oeste, porcentaje de copa ausente, condición de la copa, exposición de la luz en la corona y circunferencia a la

altura del pecho (CAP) del árbol. También se registraron datos como la latitud, longitud, conflictos de acera y utilidad, y problemas relacionados, como plagas (ANEXO E).

Una vez completada la toma de datos en campo, estos se digitalizaron al software especializado i-Tree Eco v6, que permitió un procesamiento y almacenamiento eficiente de la información.

## **6. Área De estudio**

Barranquilla, fundada el 7 de abril de 1813, es una destacada ciudad en la costa nororiental de Colombia, situada en la región caribe y bordeada por el río Magdalena en su desembocadura en el mar Caribe. En 1993, se convirtió en el Distrito Especial, Industrial y Portuario.

Con una población de más de 1 millón de habitantes, se ubica como la cuarta ciudad más poblada a nivel nacional, después de Bogotá, Medellín y Cali. Barranquilla es el núcleo central de su área metropolitana, que incluye municipios como Soledad, Malambo, Galapa y Puerto Colombia, sumando un total de más de 2 millones de habitantes (Clean Air Institute & IDEHA - Universidad del Norte, 2021).

Barranquilla cuenta con una ubicación geográfica estratégica que le proporciona un clima entre cálido y árido, con temperaturas elevadas durante todo el año que oscilan entre máximas de 33°C y mínimas de 23°C. Dicho clima, se divide en dos estaciones, una temporada seca desde diciembre hasta abril, donde predominan los vientos alisios del noreste; y una temporada lluviosa desde abril hasta noviembre, en donde hay periodos de sequía conocidos como el “Veranillo de San Juan”. Además de su particular clima, esta se caracteriza por recibir altos niveles de radiación solar, con picos significativos en marzo y julio; también por su humedad relativa, que es permanente y elevada durante todo el año, manteniéndose entre el 81% y 83% (Clean Air Institute & IDEHA - Universidad del Norte, 2021).

### Figura 3

*Mapa del del Distrito Especial, Industrial y Portuario de Barranquilla y sus 5 localidades.*

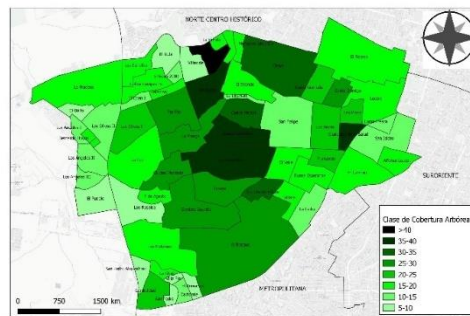


**Fuente:** (vgalvez\_baq, 2021)

Tal como se evidencia en la Figura 3, la ciudad de Barranquilla se encuentra dividida en cinco subdivisiones administrativas, o localidades (Sur Occidente, Metropolitana, Sur Oriente, Norte Centro Histórico y Riomar) (Clean Air Institute & IDEHA - Universidad del Norte, 2021).

### Figura 4

*Mapa de localidad Suroccidente de la ciudad de Barranquilla.*

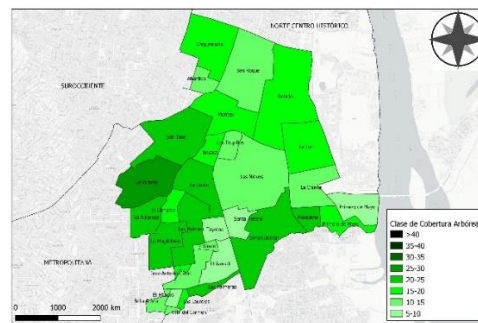


**Fuente:** (Serrano, 2022)

En la figura 4 se evidencia la localidad Suroccidente, ésta limita al norte con la carrera 38 y al suroriente con la acera oeste de la avenida cordialidad. En su límite este, se conecta con la acera oeste de la calle murillo, y al sur occidente limita con el municipio de Galapa. (Clean Air Institute & IDEHA - Universidad del Norte, 2021).

### Figura 5

*Mapa de Localidad Suroriente de la ciudad de Barranquilla.*

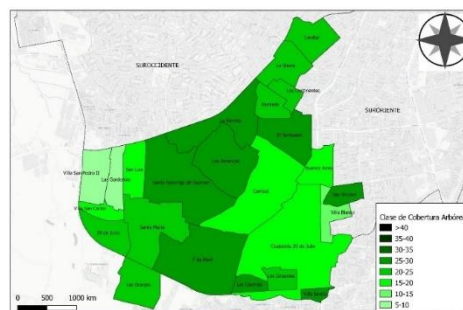


*Fuente:* (Serrano, 2022)

La localidad Suroriente por su parte se sitúa en la parte sur de la ciudad (ver figura 5). Limita al norte con la carrera 38 y al suroriente con el río Magdalena. Hacia el sur occidente, su límite se encuentra en la acera de la avenida Murillo, y al sur, limita con el municipio de Soledad. (Clean Air Institute & IDEHA - Universidad del Norte, 2021).

### Figura 6

*Mapa de localidad Metropolitana de la ciudad de Barranquilla.*

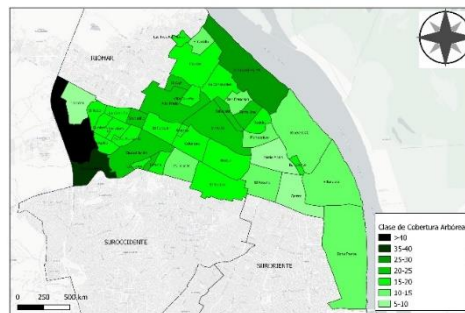


*Fuente:* (Serrano, 2022)

Por otro lado, la localidad Metropolitana, referenciada en la figura 6, está en el sureste de la ciudad, y cuenta con límites al suroriente con la avenida cordialidad, y se conecta con la acera oeste de la calle 45 con carrera 21. Al suroeste se encuentra la avenida circunvalar. Se caracteriza por abarcar zonas tanto rurales como urbanas y por comprender 23 barrios (Clean Air Institute & IDEHA - Universidad del Norte, 2021).

### **Figura 7**

*Mapa de localidad Norte Centro Histórico de la ciudad de Barranquilla.*

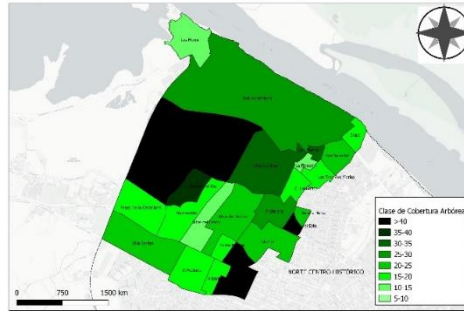


***Fuente:*** (Serrano, 2022)

Tal como se evidencia en la figura 7, la localidad Norte Centro Histórico se ubica en la zona nororiental y limita con el río Magdalena al nororiente. Hacia el norte limita con la acera sur de la carrera 46, la autopista al mar hasta la calle 84 y sigue hasta la calle 82 con carrera 64, para empalmar con el río Magdalena. Al occidente colinda con la avenida circunvalar; y también se caracteriza por abarcar áreas rurales y urbanas, y comprender 36 barrios (Clean Air Institute & IDEHA - Universidad del Norte, 2021).

### **Figura 8**

*Mapa de localidad Riomar de la ciudad de Barranquilla.*



*Fuente:* (Serrano, 2022)

Por último, la **Localidad Riomar**, esta localidad está al norte de la ciudad, y limita con el río Magdalena (ver figura 8). Al occidente limita con la periferia del municipio de Puerto Colombia, al sur con la acera norte de la carrera 46 (conocida como autopista al mar), llegando hasta la calle 84. Finaliza en el río Magdalena. Se caracteriza por ser un área de expansión tanto rural como urbana (Clean Air Institute & IDEHA - Universidad del Norte, 2021).

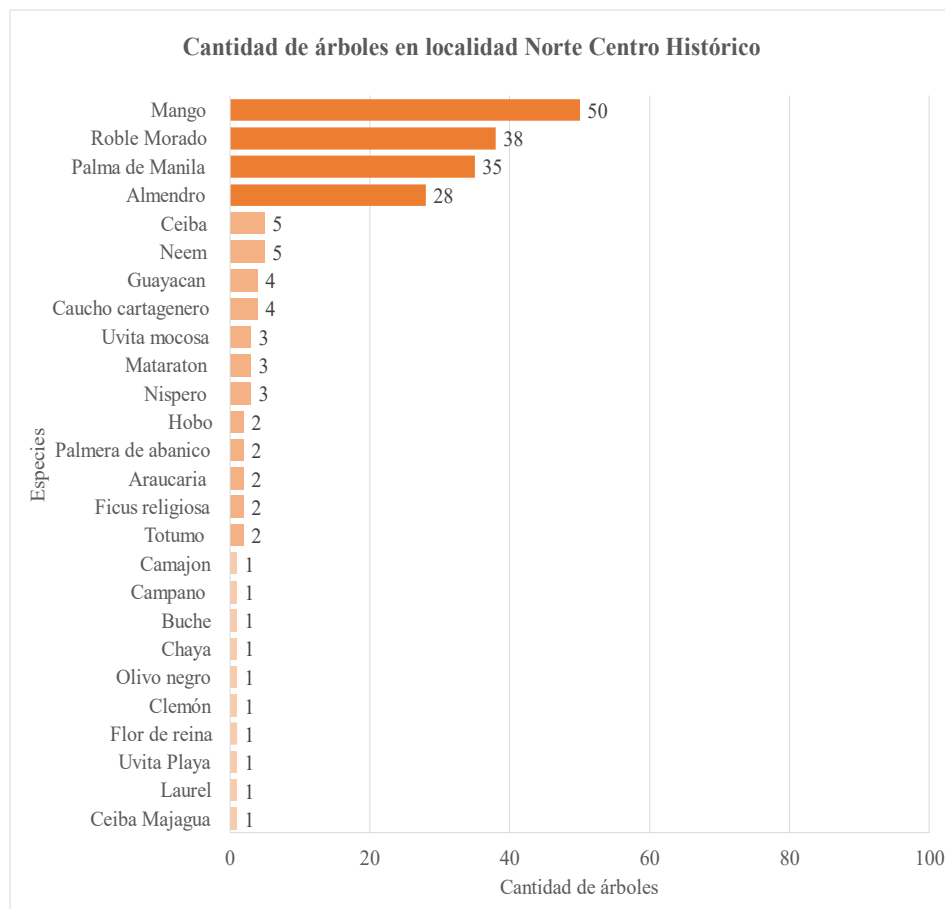
## 7. Resultados

En este proyecto, se ejecutó una fase crucial centrada en la recopilación y procesamiento de datos para identificar los árboles presentes en Barranquilla en 2019. Esto involucró la medición e identificación de atributos clave de los árboles, como su ubicación geográfica, dimensiones y especie.

La conversión de los datos se realizó utilizando el software iTree-Eco V6, lo que resultó en la generación de dos informes que presentan una visión general del arbolado urbano en Barranquilla en sus 5 localidades: Metropolitana, Riomar, Norte Centro Histórico, Suroccidente y Suroriente (ver ANEXO A). Esto permitió el análisis de los resultados que van encaminados dar respuesta a los objetivos propuestos.

**Figura 9**

*Gráfico de cantidad de árboles por especie en la localidad Norte Centro Histórico de la ciudad de Barranquilla.*

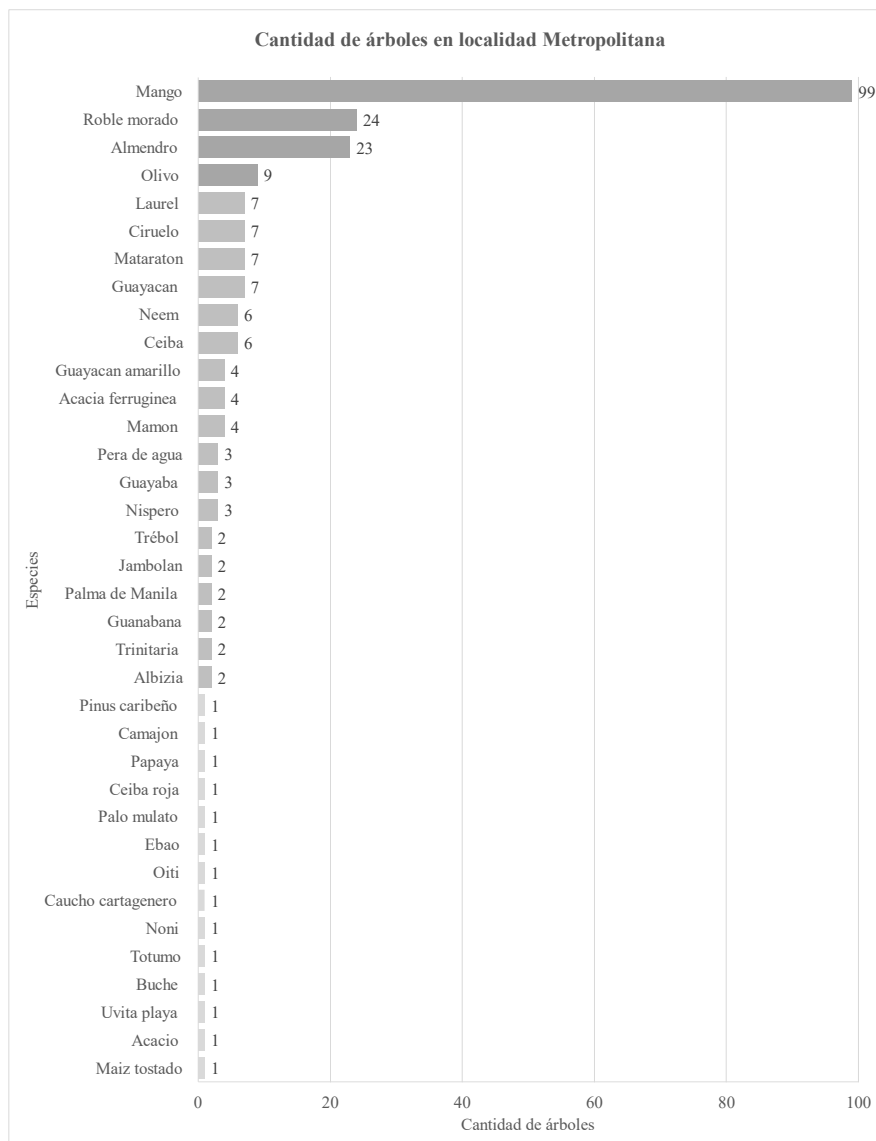


**Nota.** Datos correspondientes a la localidad Norte Centro Histórico, en relación con las especies y cantidades de árboles. **Fuente:** Elaboración propia.

La figura 9 muestra el análisis de la localidad Norte Centro Histórico, y presenta las especies arbóreas más representativas en esta área en particular. En ella se pueden identificar 4 especies sobresalientes: Mango (*Mangifera indica*), Roble Morado (*Tabebuia rosea*), Palma de Manila (*Adonidia merrilli*), y Almendro (*Terminalia catappa*). Se contabilizan un total de 26 especies diferentes que coexisten en la localidad.

## Figura 10

Gráfico de cantidad de árboles por especie de la localidad Metropolitana de la ciudad de Barranquilla.



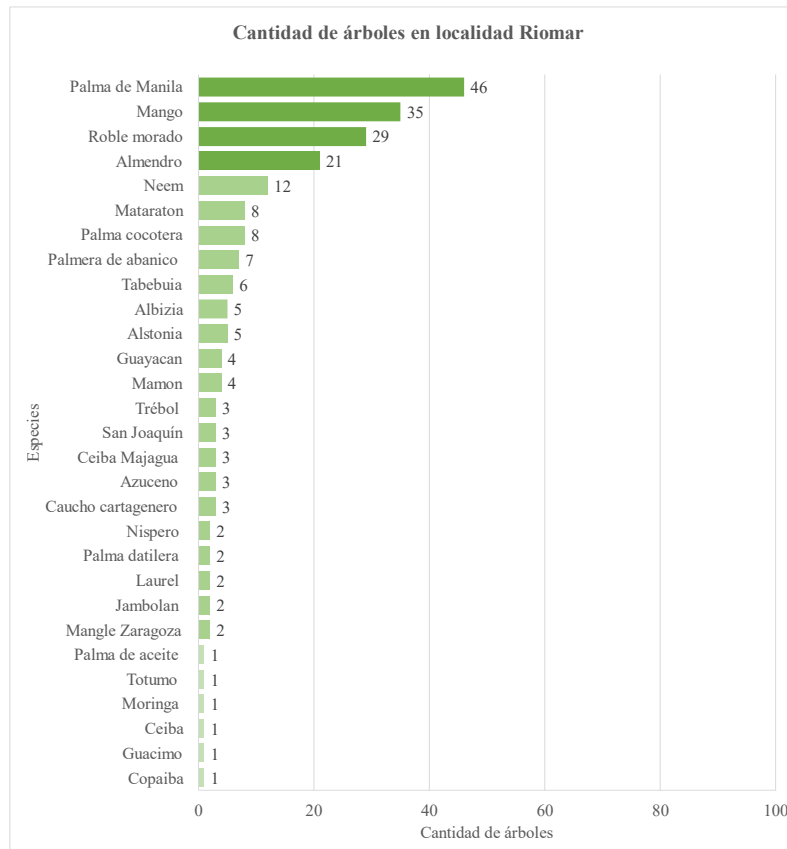
**Nota.** Datos correspondientes a la localidad Metropolitana, en relación con las especies y cantidades de árboles. **Fuente:** Elaboración propia.

La figura 10 se enfoca en la localidad Metropolitana, en donde es posible identificar 4 especies sobresalientes:

Mango (*Mangifera indica*), Roble Morado (*Tabebuia rosea*), Almendro (*Terminalia catappa*), y Olivo (*Quadrella odoratissima*). Se contabilizan un total de 36 especies diferentes que coexisten en la localidad.

**Figura 11**

*Gráfico de cantidad de árboles por especie en la localidad Riomar de la ciudad de Barranquilla.*



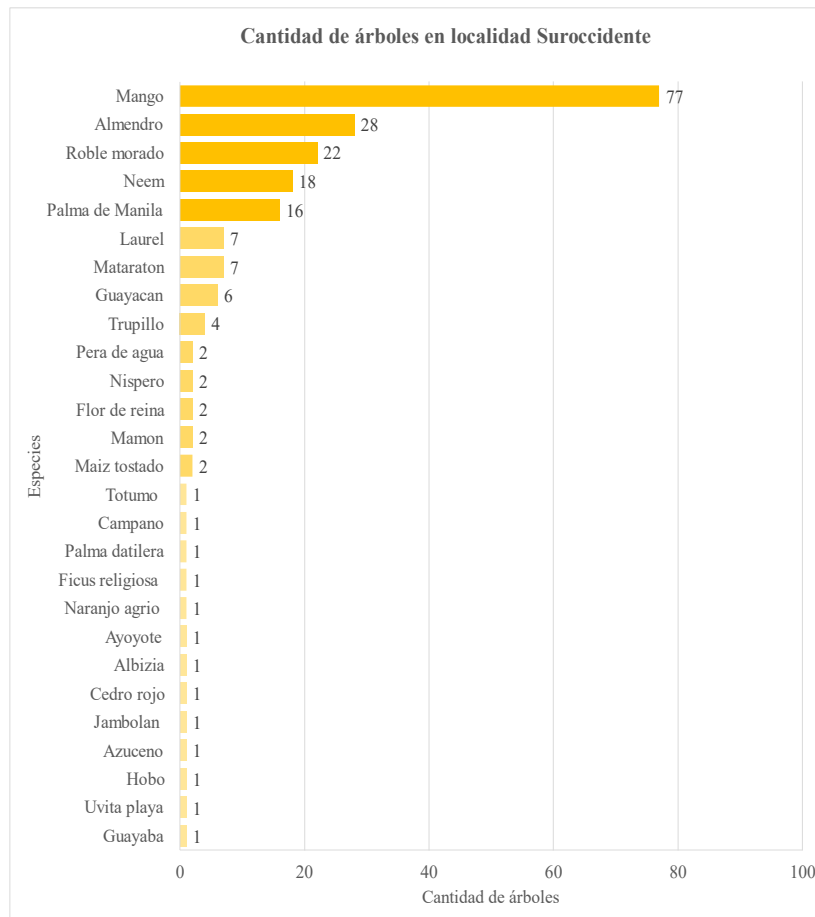
**Nota.** Datos correspondientes a la localidad Riomar, en relación con las especies y cantidades de árboles. **Fuente:** Elaboración propia.

De las 29 especies de árboles que coexisten en la localidad Riomar, y tal como se evidencia en la figura 11, se identifican 5 especies representativas:

Palma de Manila (*Adonidia merrilli*), Mango (*Mangifera indica*), Roble Morado (*Tabebuia rosea*), Almendro (*Terminalia catappa*) y Neem (*Azadirachta indica*)

**Figura 12**

*Gráfico de cantidad de árboles por especie en localidad Suroccidente de la ciudad de Barranquilla.*



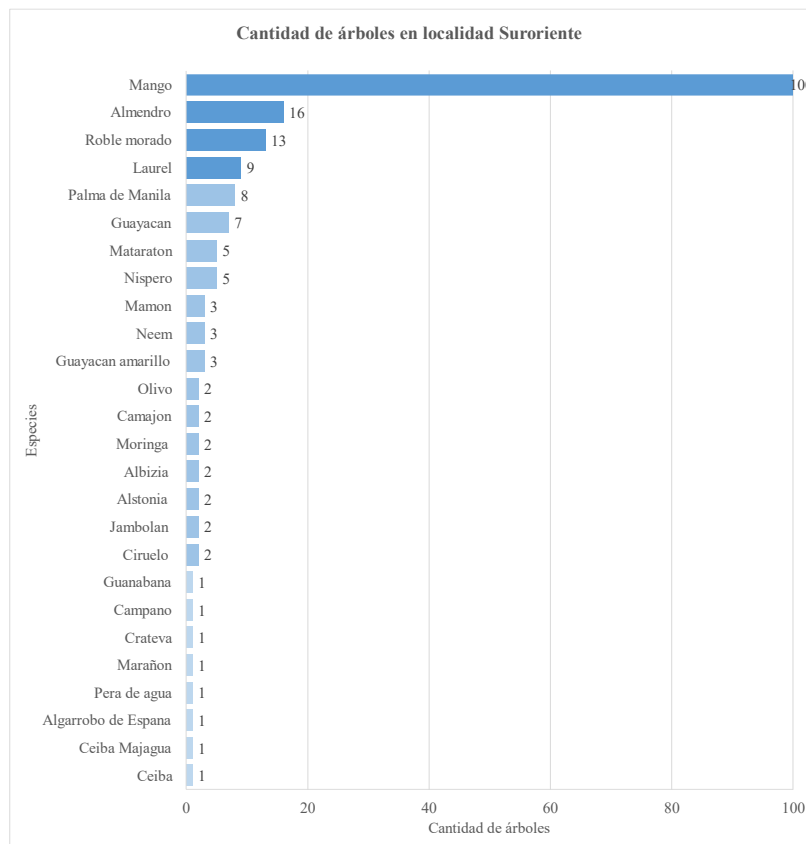
**Nota.** Datos correspondientes a la localidad Suroccidente, en relación con las especies y cantidades de árboles. **Fuente:** Elaboración propia.

Como se observa en la figura 12, en donde se contabilizan 27 especies distintas en la localidad Suroccidente.

Son representativas el Mango (*Mangifera indica*), el Almendro (*Terminalia catappa*), el Roble Morado (*Tabebuia rosea*), el Neem (*Azadirachta indica*) y la Palma de Manila (*Adonidia merrilli*).

**Figura 13**

*Gráfico de cantidad de árboles por especie en localidad Suroriente de la ciudad de Barranquilla.*



**Nota.** Datos correspondientes a la localidad Suroriente, en relación con las especies y cantidades de árboles. **Fuente:** Elaboración propia.

En la localidad Suroriente (gráfica 13) se identificaron 4 especies representativas: Mango (*Mangifera indica*), Almendro (*Terminalia catappa*), Roble Morado (*Tabebuia rosea*) y Laurel (*Ficus benjamina*). Estas especies resaltan en medio de 26 variedades de árboles que componen la diversidad arbórea de esta localidad.

Los resultados obtenidos denotan que las especies estudiadas (Mango, Almendro, Roble Morado, Laurel, Neem, Olivo y la Palma de Manila), y consideradas como representativas en cuanto a cantidad entre un grupo de 65, corresponden a especies presentes en el bosque seco tropical, que constituye el principal ecosistema del departamento del Atlántico. Este hallazgo

muestra la importancia de preservar y fomentar la vegetación autóctona, lo que a su vez puede garantizar la sostenibilidad medioambiental y el funcionamiento adecuado del arbolado urbano en la ciudad. (Alcaldía de Barranquilla et al., 2013)

## 7.1. Análisis de Remoción de Material Particulado PM<sub>10</sub> Y PM<sub>2.5</sub> en la ciudad de Barranquilla.

Tras identificar las especies arbóreas destacadas en varias localidades, procedemos al análisis cuantitativo de la remoción de material particulado PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>. En esta sección, se presentan los resultados y hallazgos que sintetizan la información recopilada y los cálculos generados a partir del segundo informe del software I-Tree Eco V6 (ANEXO B).

### 7.1.1. Análisis de Remoción de Material Particulado PM<sub>10</sub>

La figura 14 muestra la remoción total de PM<sub>10</sub> por las 65 especies de árboles muestreados en Barranquilla durante el año 2019. En esta se relaciona la cantidad eliminada en gramos por año (g/año) de los contaminantes objeto de estudio. Cabe mencionar que en total se alcanzó una remoción de 103,251.7 g/año de PM<sub>10</sub> en la ciudad.

**Figura 14**

*Remoción total de PM<sub>10</sub> por arbolado urbano de la ciudad de Barranquilla en el año 2019.*



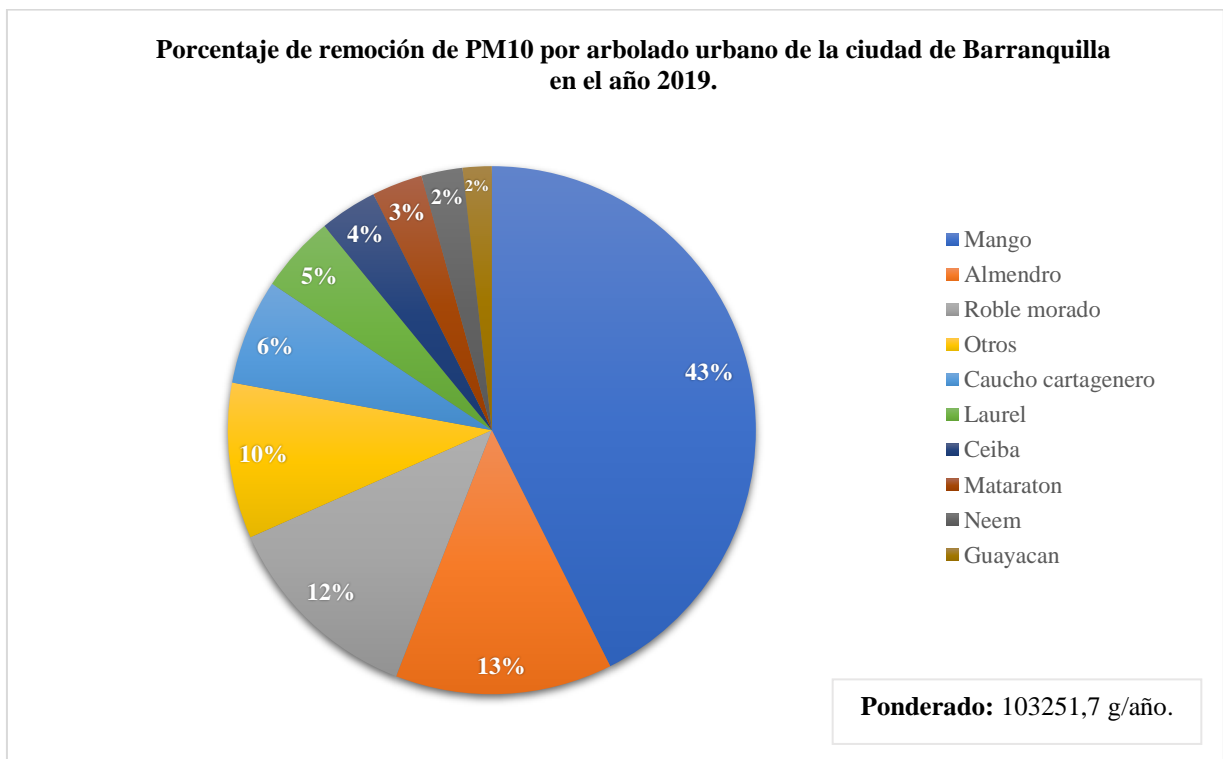
**Nota.** En ANEXO B se encuentran los datos completos. **Fuente.** Elaboración propia.

Las principales especies según la remoción de PM<sub>10</sub> removido son el Mango (41616.9 g/año), el Almendro (13003.5 g/año), el Roble Morado (12160.8 g/año), el Caucho Cartagenero (6316.8 g/año), el Laurel (4607 g/año) y Ceiba (3446 g/año). Estos hallazgos resaltan la contribución significativa de estas especies al servicio de remoción de material particulado PM<sub>10</sub> en Barranquilla, lo que beneficia tanto la calidad del aire como la sostenibilidad y el bienestar de la comunidad local.

A partir de los ponderados de remoción estimados por especie, se determinan los porcentajes de remoción de material particulado. En la figura 15 es posible evidenciar la representatividad de cada una en cuanto al servicio ecosistémico estudiado para la ciudad de Barranquilla.

**Figura 15**

*Porcentajes de remoción de PM<sub>10</sub> por arbolado urbano de la ciudad de Barranquilla.*



**Fuente:** Elaboración propia.

En la Figura 15, se puede observar que las especies más representativas en términos de remoción presentan dos características distintivas:

En primer lugar, están aquellas especies que están ampliamente distribuidas en la ciudad, lo cual tiene sentido, ya que se puede inferir que, debido a su presencia abundante, desempeñan un papel significativo en la remoción de contaminantes en comparación con las especies menos comunes.

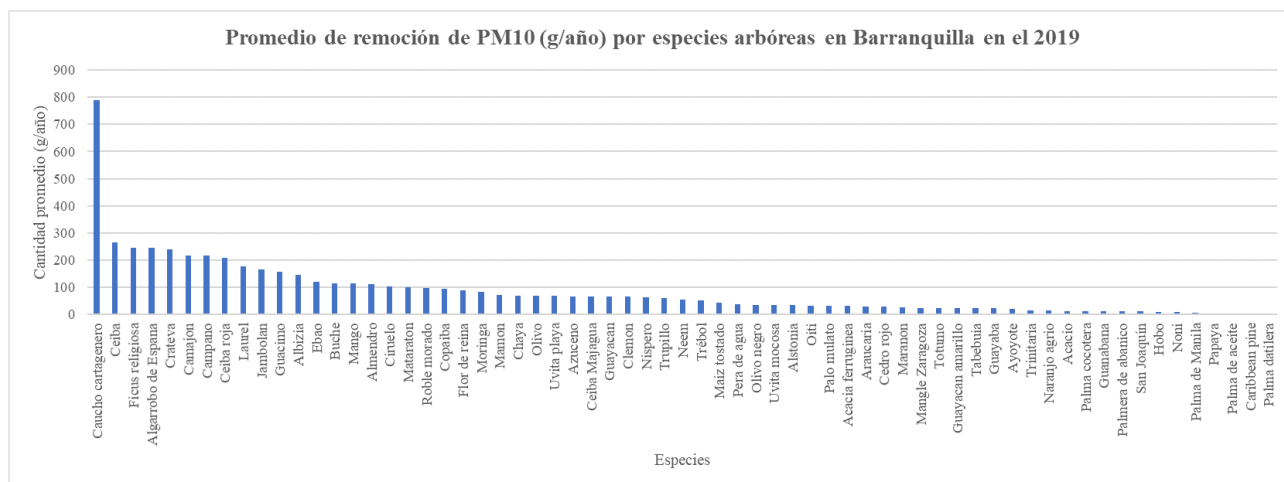
En segundo lugar, se destacan especies como el "caucho cartagenero", que, a pesar de no ser tan numerosas, muestran la capacidad de eliminar concentraciones de contaminantes que resultan significativas para la ciudad.

Lo anterior, se fundamenta en el análisis de la Figura 16, que es una representación de la remoción promedio por especie. En esta figura, se destaca un alto nivel de remoción promedio para ciertas especies, incluso aquellas con un número de ejemplares muestreados relativamente bajo. Por ejemplo, el "caucho cartagenero" alcanza una remoción promedio de 789.6 g/año, seguido por la "Ceiba" con 265 g/año y el "ficus religioso" con 246.1 g/año.

Este hallazgo es significativo, ya que demuestra que independientemente de la cantidad de ejemplares muestreados, existen especies que se destacan por su eficacia en la remoción de contaminantes, lo que las convierte en contribuyentes importantes a este servicio ecosistémico.

### **Figura 16**

*Promedio de remoción de  $PM_{10}$  por arbolado urbano de la ciudad de Barranquilla en el año 2019.*



**Nota.** Promedio de la remoción de PM<sub>10</sub> (g/año) por especie. **Fuente:** Elaboración propia.

### 7.1.1.1. Análisis de la Remoción de PM<sub>10</sub> por localidad

La Tabla 2 muestra las medidas clave del resumen estadístico por localidades de la ciudad de Barranquilla.

**Tabla 2**

*Resumen estadístico respecto a la remoción de PM<sub>10</sub> en las 5 localidades de la ciudad de Barranquilla.*

Localidad	Recuento	Promedio (g/año)	Mediana (g/año)	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación
METROPOLITANA	242	113,945	91,35	102,335	89,8105%
NORTE CENTRO HISTORICO RIOMAR	198	108,524	58,7	207,58	191,275%
SUROCCIDENTE	221	73,6769	33,3	112,663	152,915%
SURORIENTE	208	78,6404	49,7	83,5716	106,271%
<b>Total</b>	<b>1063</b>	<b>97,1324</b>	<b>59,8</b>	<b>129,14</b>	<b>132,953%</b>

**Nota.** Se evidencian medidas clave, como el recuento de árboles, promedio, mediana, desviación estándar y coeficiente de variación en cada localidad, respecto al ANEXO B. **Fuente:** Elaboración propia.

Los 1063 árboles muestreados están distribuidos de manera equitativa entre las cinco localidades de la ciudad. Se evidencia una remoción promedio de 97,1 g/año y una desviación estándar de 129,14 g/año. La remoción por localidades varía desde 73,676 g/año en Riomar hasta 113,945 g/año en la localidad Metropolitana.

### 7.1.1.2. Análisis comparativo de remoción de PM<sub>10</sub> por localidad

Para analizar la remoción del contaminante PM<sub>10</sub> por el arbolado, se realizó un análisis de varianza, con el fin de establecer si existen diferencias estadísticamente significativas entre las cinco localidades del distrito de Barranquilla, lo cual se evidencia en la Tabla 3.

**Tabla 3**

*Tabla ANOVA para PM<sub>10</sub>.*

<b>Fuente</b>	<b>Suma de Cuadrados</b>	<b>Gl</b>	<b>Cuadrado Medio</b>	<b>Razón-F</b>	<b>Valor-P</b>
Entre grupos	324549,	4	81137,3	4,94	0,0006
Intra grupos	1,73866E7	1058	16433,4		
<b>Total (Corr.)</b>	<b>1,77111E7</b>	<b>1062</b>			

**Nota.** La tabla proporciona un resumen de los componentes clave utilizados en el análisis, respecto a los datos de la Tabla 2. **Fuente:** Elaboración propia

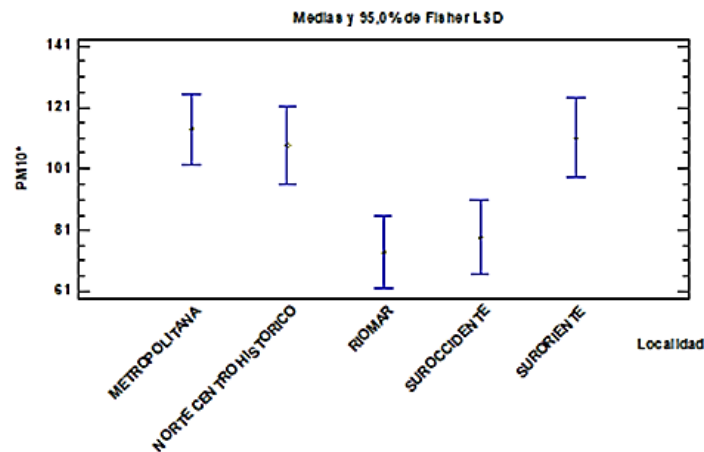
Los valores de la Razón-F (4,94) y Valor-P (0.0006) indican que existe una diferencia estadísticamente significativa en la remoción de PM<sub>10</sub> entre las diferentes localidades. En efecto, el Valor-P sugiere que al menos uno de los grupos es diferente de los demás y que las

diferencias observadas no son debidas al azar ya que es inferior al nivel de significancia  $\alpha = 0.05$  comúnmente usado en análisis estadístico.

Dados los resultados de ANOVA se efectúa un análisis post-hoc (LSD de Fisher) para determinar las localidades específicas que demuestran diferencias. En la Figura 17 se visualizan los promedios de  $PM_{10}$  en diferentes localidades de Barranquilla y los intervalos de confianza correspondientes. Se puede evidenciar que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las localidades de Riomar y Suroccidente, respecto a las localidades Metropolitana, Norte Centro Histórico y Suroriente. Estas últimas muestran mayores niveles de remoción  $PM_{10}$ .

### Figura 17

Gráfico de medida de tendencia central y prueba de LSD de Fisher para  $PM_{10}$  (g/año).



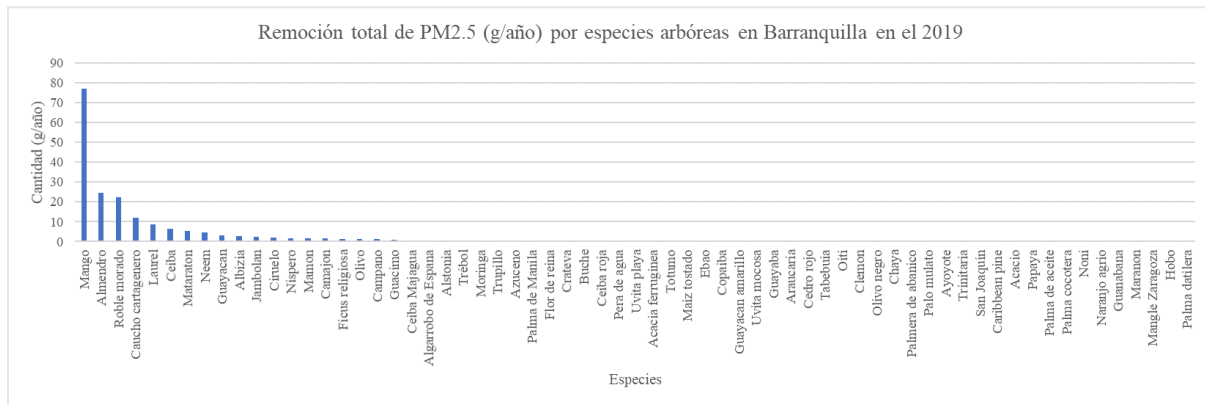
*Nota.* Gráfico elaborado con el software Statgraphics versión 16. *Fuente:* Elaboración propia.

#### 7.1.2. Análisis de Remoción de Material Particulado $PM_{2.5}$

La figura 18 muestra la remoción total de  $PM_{2.5}$  por las 65 especies de árboles muestreados en Barranquilla durante el año 2019. En esta se relaciona la cantidad eliminada en gramos por año (g/año) de los contaminantes objeto de estudio Cabe mencionar que en total se alcanzó una remoción de 189.8 g/año en la ciudad.

## Figura 18

Remoción total de  $PM_{2.5}$  por arbolado urbano de la ciudad de Barranquilla en el año 2019.

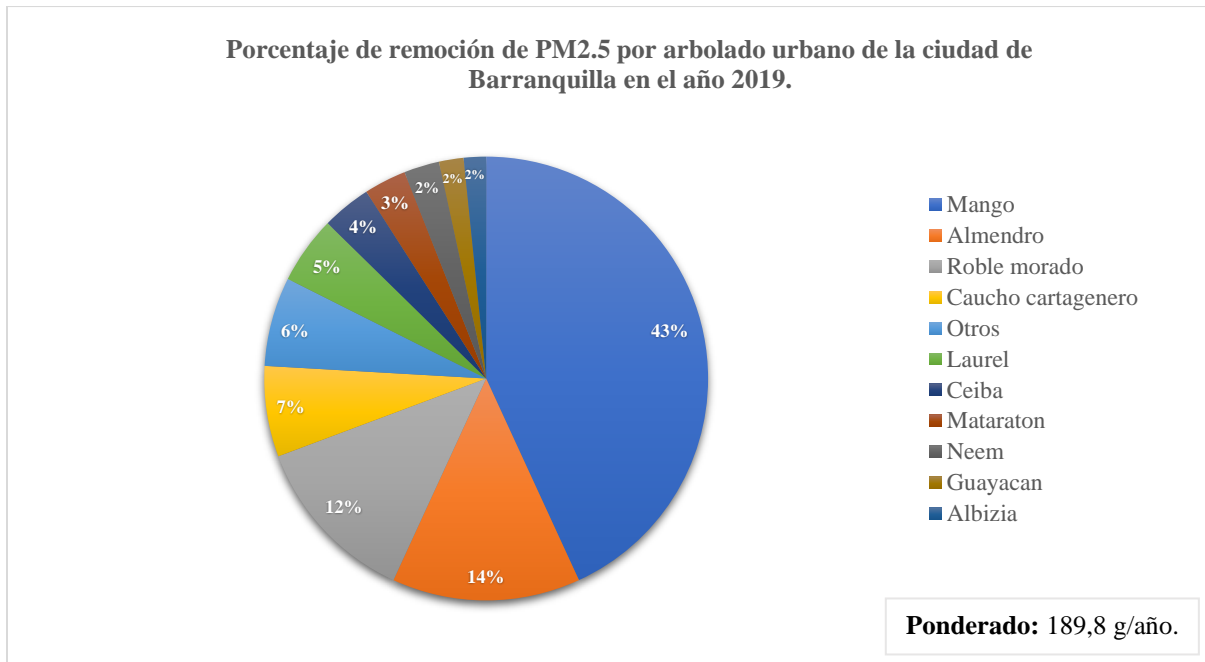


**Nota.** En ANEXO B se encuentran los datos completos. **Fuente:** Elaboración propia.

Las principales especies en función de la cantidad total de  $PM_{2.5}$  removido son el Mango (77 g/año), Almendro (24,5 g/año), Roble Morado (22,2 g/año), Caucho Cartagenero (11,8 g/año), Laurel (8,8 g/año) y Ceiba (6,4 g/año). Estos hallazgos resaltan la contribución significativa de estas especies al servicio de remoción de material particulado  $PM_{2.5}$  en Barranquilla.

## Figura 19

Porcentajes de remoción de  $PM_{2.5}$  por arbolado urbano de la ciudad de Barranquilla.



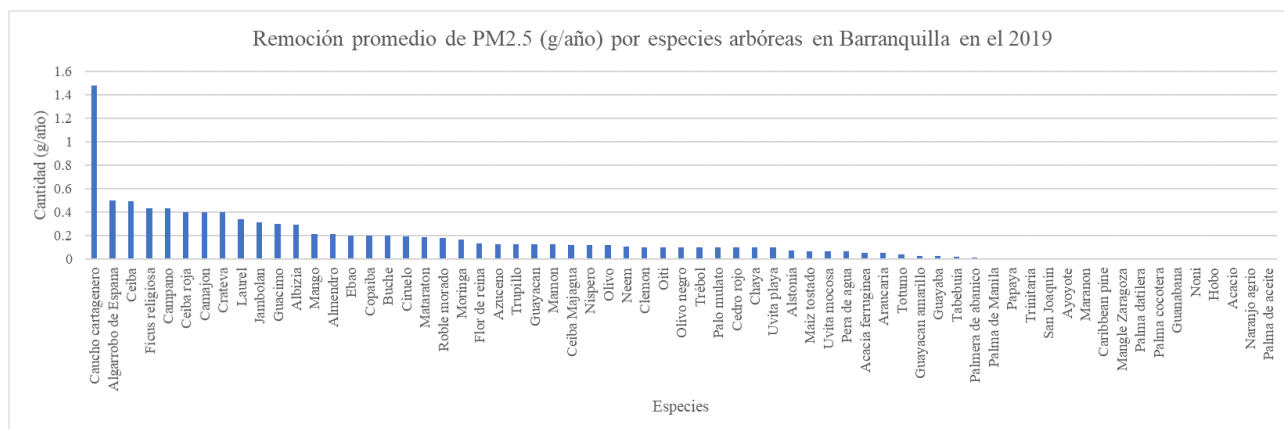
**Fuente:** Elaboración propia.

Al igual que para el PM<sub>10</sub>, y de acuerdo con la figura 19, donde se visualizan los porcentajes de remoción de material particulado PM<sub>2.5</sub> en la ciudad, se infiere que independientemente de la cantidad de ejemplares muestreados, existen especies que se destacan por su eficacia en la remoción de contaminantes.

Adicional a la remoción total, en la figura 20 se ilustra el análisis de remoción promedio por especie. Al igual que con la remoción de PM<sub>10</sub>, se observa un alto nivel de remoción promedio por el caucho cartagenero (1.47 g/año). Sin embargo, le sigue el Algarrobo de España (0.5 g/año), la Ceiba (0.49 g/año) y el Ficus Religioso (0.43 g/año).

**Figura 20**

*Promedio de remoción de PM<sub>2.5</sub> por arbolado urbano de la ciudad de Barranquilla en el año 2019.*



**Fuente:** Elaboración propia.

### 7.1.2.1. Análisis de la Remoción de PM<sub>2.5</sub> por localidad

La Tabla 4 muestra las medidas clave del resumen estadístico por localidades de la ciudad.

**Tabla 4**

*Resumen estadístico respecto a la remoción de PM<sub>2.5</sub> en las 5 localidades de la ciudad de Barranquilla.*

Localidad	Recuento	Promedio (g/año)	Mediana (g/año)	Desviación Estándar	Coficiente de Variación
METROPOLITANA	242	0,207851	0,2	0,197863	95,1945%
NORTE CENTRO	198	0,19697	0,1	0,389834	197,916%
HISTORICO	221	0,133032	0,1	0,215627	162,087%
SUROCCIDENTE	208	0,147596	0,1	0,162985	110,427%
SURORIENTE	194	0,208247	0,2	0,201121	96,578%
<b>Total</b>	<b>1063</b>	<b>0,178551</b>	<b>0,1</b>	<b>0,245508</b>	<b>137,5%</b>

**Nota.** La tabla presenta información clave, como el promedio, la mediana, la desviación estándar y el coeficiente de variación de los datos recopilados. **Fuente:** Elaboración propia.

De los árboles muestreados, se evidencia una remoción promedio de 0,17 g/año y una desviación estándar de 0,24 g/año. La remoción por localidades varía desde 0,13 g/año en la localidad Riomar hasta 0,208 g/año en Suroriente.

### 7.1.2.2. Análisis comparativo de remoción de PM<sub>2.5</sub> por localidad

El análisis de remoción de la Tabla 5 sigue el mismo protocolo descrito para la sección de PM<sub>10</sub>.

**Tabla 5**

*Tabla ANOVA para PM<sub>2.5</sub>.*

<b>Fuente</b>	<b>Suma de Cuadrados</b>	<b>Gl</b>	<b>Cuadrado Medio</b>	<b>Razón-F</b>	<b>Valor-P</b>
Entre grupos	1,10323	4	0,275808	4,64	0,0010
Intra grupos	62,9077	1058	0,0594591		
<b>Total (Corr.)</b>	<b>64,011</b>	<b>1062</b>			

**Nota.** La tabla proporciona un resumen de los componentes clave utilizados en el análisis de la remoción de material particulado PM<sub>2.5</sub> por las especies arbóreas en Barranquilla. Estos componentes incluyen la Suma de Cuadrados, Grados de Libertad (Gl), Cuadrado Medio, Razón-F y Valor-P. **Fuente:** Elaboración propia.

Los valores de la Razón-F (4,64) y Valor-P (0,0010) indican que existe una diferencia estadísticamente significativa en la remoción de PM<sub>2.5</sub> entre las diferentes localidades.

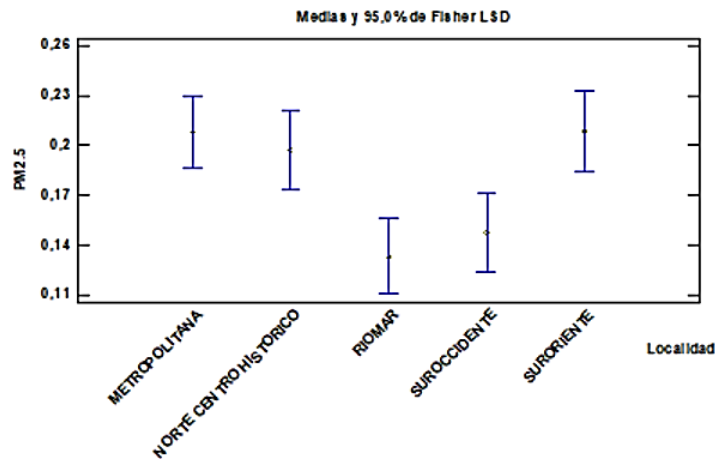
Al igual que para el caso de PM<sub>10</sub>, se efectúa un análisis post-hoc (LSD de Fisher).

En la Figura 21 se visualizan los promedios de PM<sub>2.5</sub> en diferentes localidades de Barranquilla y los intervalos de confianza correspondientes. Se puede evidenciar que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las localidades de Riomar y Suroccidente, respecto a las

localidades Metropolitana, Norte Centro Histórico y Suroriente. Estas últimas muestran mayores niveles de remoción  $PM_{2.5}$ .

### Figura 21

Gráfico de medida de tendencia central y prueba de LSD de Fisher para  $PM_{2.5}$  (g/año).



*Fuente:* Elaboración propia.

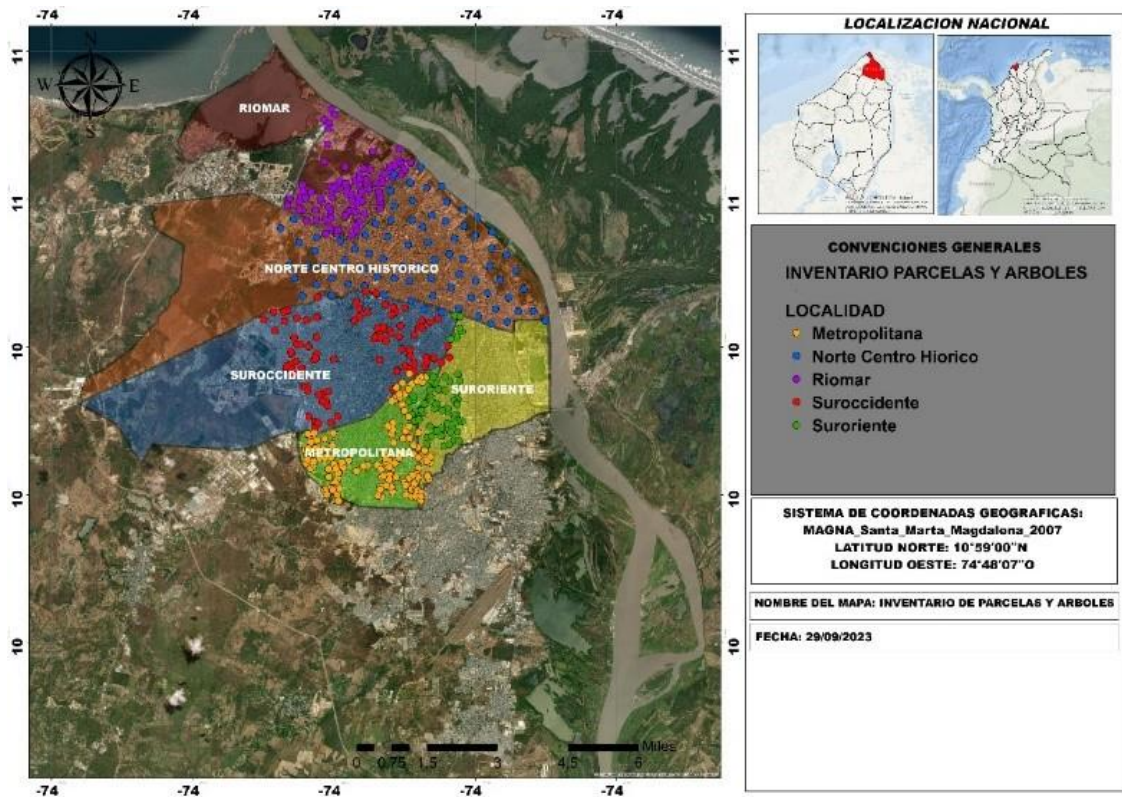
## 7.2. Mapas de remoción de material particulado $PM_{10}$ y $PM_{2.5}$ por el arbolado urbano en la ciudad de Barranquilla en el año 2019.

Con base en los resultados de eliminación de material particulado, y la verificación de la representatividad de las muestras, se sigue visualizando el servicio ecosistémico de remoción de árboles en Barranquilla.

En el inventario se realizaron los muestreos estratégicos, y en el inventario se consideraron los árboles en la ciudad de Barranquilla. En la figura 22, se puede visualizar la ubicación de cada parcela en estudio donde se tomaron los muestreos aleatorios de los árboles allí presentes.

### Figura 22

Ubicación de las parcelas muestreadas en el inventario realizado en las 5 localidades de la ciudad de Barranquilla.

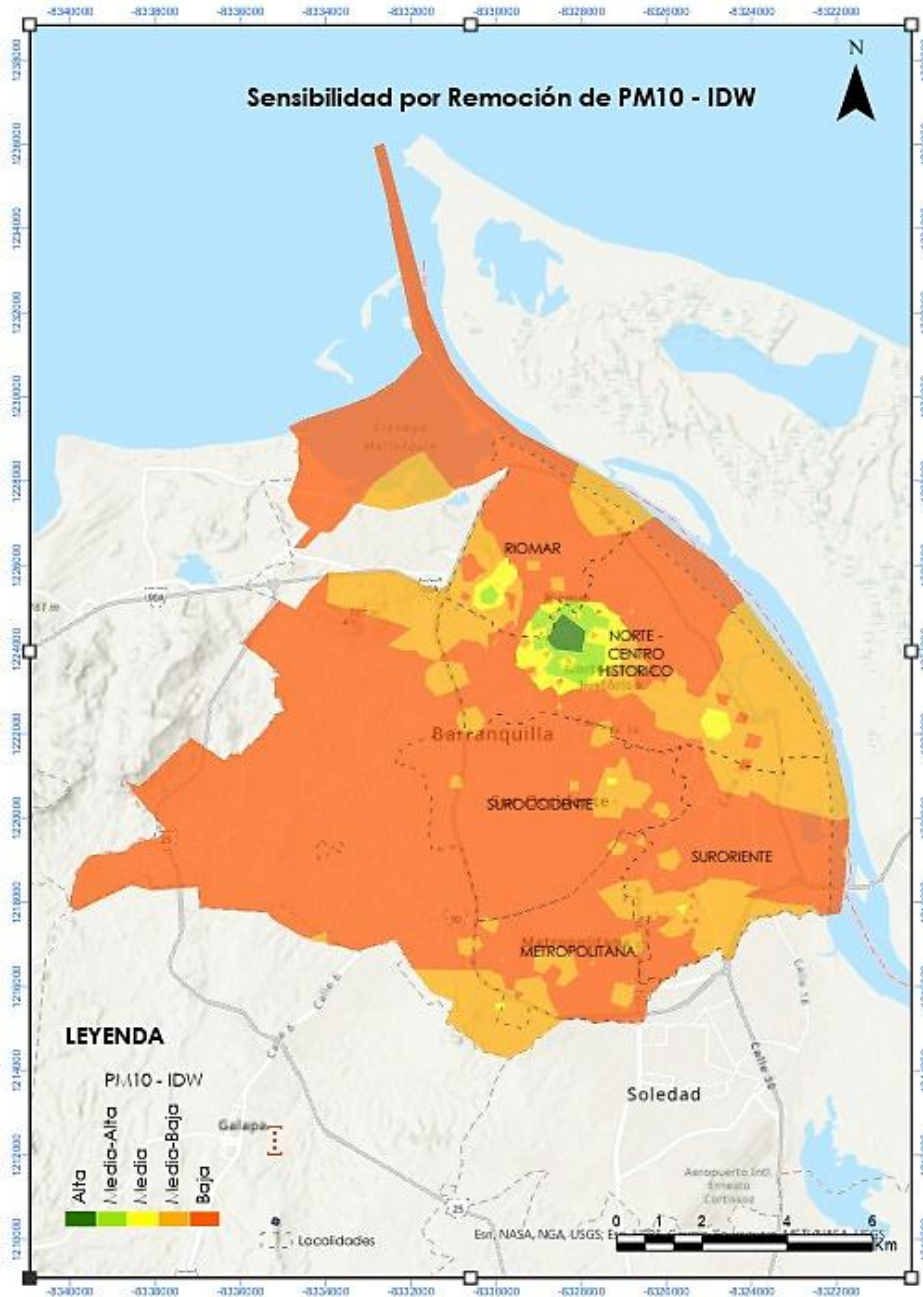


*Nota.* Mapa de 322 parcelas muestreadas donde se relaciona la ubicación geográfica de cada una. *Fuente:* Elaboración propia.

Los árboles muestreados ofrecen información clave sobre la remoción de material particulado  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ . En este estudio, la información se convierte en una representación gráfica a través de mapas que ilustran la distribución de la capacidad de remoción en diversas localidades de la ciudad. La creación de estos mapas, esencial para alcanzar nuestros objetivos, se llevó a cabo empleando el método de interpolación IDW. En este contexto, el método permitió estimar valores en ubicaciones que no fueron muestreadas, teniendo en cuenta los valores medidos en ubicaciones cercanas.

### Figura 23

*Áreas de remoción de  $PM_{10}$  por arbolado urbano en la ciudad de Barranquilla.*



*Nota.* Datos recopilados en el año 2019  $PM_{10}$ . *Fuente:* Elaboración propia.

La figura 23 cuenta con una leyenda cualitativa que hace referencia a un rango de datos cuantitativos respecto al ponderado de eliminación en g/año por el arbolado urbano en la ciudad de Barranquilla. Las categorías hacen referencia a una remoción “baja” donde los rangos van de 0 a 2064,0 g/año; “Media Baja” donde van de 2064,1 a 4128,0 g/año; “Media” donde van de

4128,1 a 6192,0 g/año; “Media-alta” donde van de 6192,1 a 8256,0 g/año; y “Alta” donde van de 8256,1 a 103251,7 g/año.

Se aprecia que las localidades Norte Centro Histórico y Riomar muestran áreas con notable remoción de PM10, lo que se atribuye principalmente a la presencia de ejemplares de alto valor en la remoción de este contaminante.

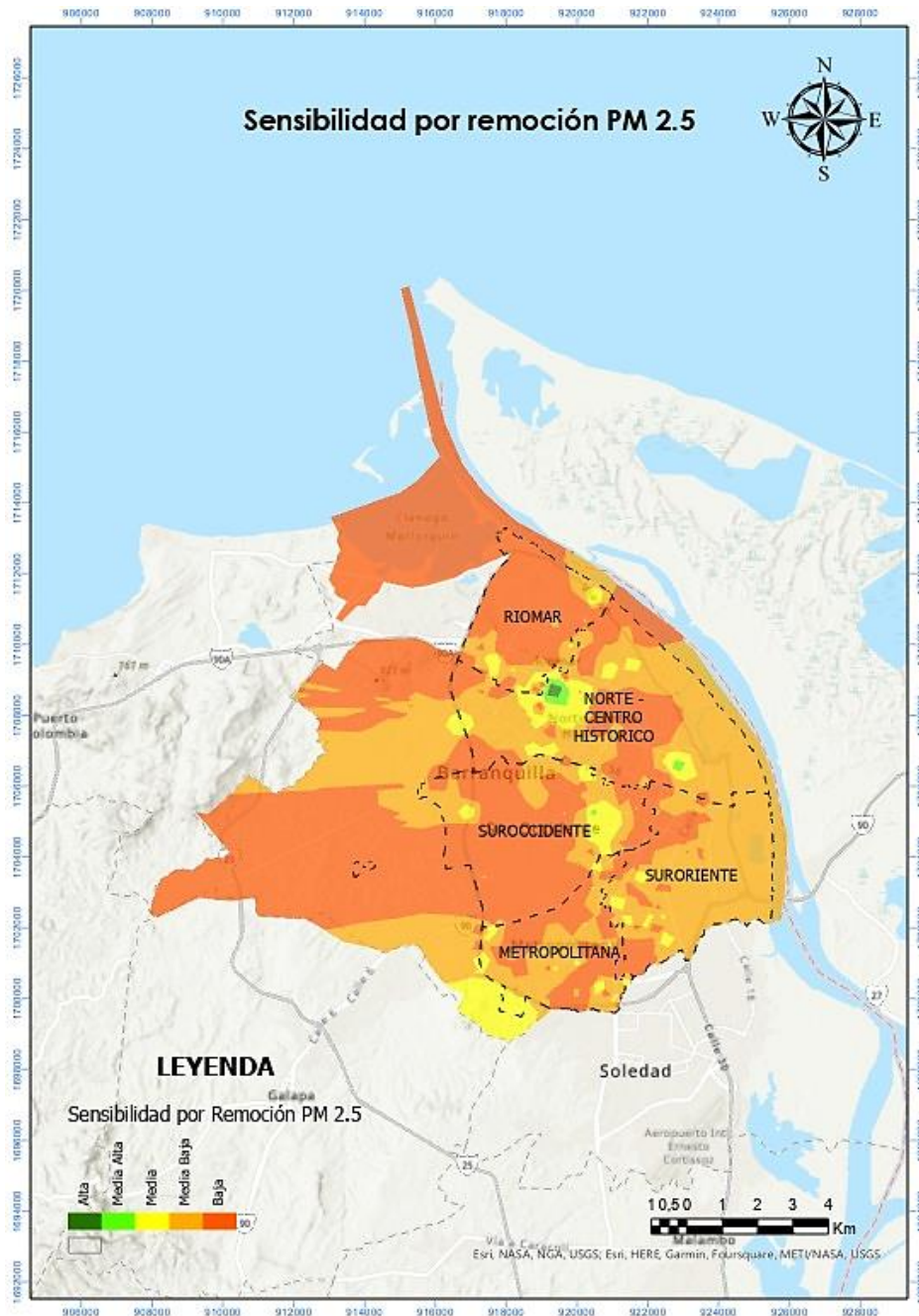
En particular, en el área con remoción "alta" de la localidad Norte Centro Histórico, sobresale el caucho cartagenero, que con 2584.7 g/año (ver ANEXO G), y se posiciona como el ejemplar con la mayor capacidad de eliminación de PM<sub>10</sub> en el inventario total. Además, este estudio lo reconoce como una especie individualmente importante en la remoción de este contaminante, como se ilustra en la Figura 15.

En contraste, Suroccidente y Metropolitana presentan áreas con menor capacidad de remoción, posiblemente por el tipo de especies y el tamaño de individuos presentes en estas áreas.

Por otro lado, para el caso de PM<sub>2.5</sub>, y tal como se evidencia en la figura 24, los rangos de las leyendas en g/año respecto al ponderado de eliminación por el arbolado urbano en la ciudad de Barranquilla referencian a una sensibilidad “baja” en donde los valores van de 0 a 36; “Media Baja” donde van de 37 a 72; “Media” donde van de 73 a 108; “Media-alta” donde van de 109 a 144; y “Alta” donde van de 145 – 189,8.

## **Figura 24**

*Áreas de remoción de PM<sub>2.5</sub> por arbolado urbano en la ciudad de Barranquilla.*



**Nota.** Remoción para PM<sub>2.5</sub> en el 2019. **Fuente:** Elaboración propia.

Los resultados del mapa de remoción de material particulado PM<sub>2.5</sub> del arbolado urbano de Barranquilla para el año 2019 arrojan hallazgos notables. En particular, destaca el cacho cartagenero, una especie arbórea presente en la localidad Norte Centro Histórico, por su

capacidad de eliminar 4.8 g/año de PM<sub>2.5</sub>, como se detalla en el ANEXO H. Este resultado subraya la importancia de esta especie y su contribución al servicio ecosistémico de remoción.

En términos generales, el mapa revela que la capacidad de remoción del arbolado urbano se puede considerar significativa en todas las localidades de Barranquilla. Sin embargo, al igual que para PM<sub>10</sub>, en el Norte Centro Histórico sobresalen áreas con remociones calificadas como "altas". En contraparte, en las demás localidades se evidencian remociones calificadas como "medias" y se pueden considerar relevantes en comparación con los resultados obtenidos para el contaminante PM<sub>10</sub>.

En resumen, el arbolado urbano en Barranquilla demuestra ser un actor en la eliminación de partículas contaminantes, tanto PM<sub>10</sub> como PM<sub>2.5</sub>. En particular, se observa una ligera ventaja en la eliminación de partículas PM<sub>2.5</sub>, ya que por su menor tamaño tienden a quedar atrapadas con mayor eficacia en las superficies de hojas y ramas de los árboles. A pesar de esta ventaja, es importante destacar que las diferencias en los porcentajes de remoción oscilan entre un 1% y 3% según la especie por lo que no es que se considere una diferencia representativa.

## 8. Discusión

Este estudio se enmarca en un contexto en el que se reconocen los servicios ecosistémicos proporcionados por el arbolado urbano como elementos que pueden influir en las decisiones futuras relacionadas con la gestión ambiental y la planificación urbana. Nuestros objetivos se orientaron hacia identificar contribuciones significativas del arbolado urbano a la remoción de material particulado, lo que afecta directamente a la calidad de vida de la comunidad.

Se encuentra que, entre las 65 especies que se identificaron en la muestra aleatoria de árboles en la ciudad de Barranquilla, hay 4 especies altamente significativas, que son: el Mango (*Mangifera indica*), el Almendro (*Terminalia catappa*), el Roble Morado (*Tabebuia rosea*) y la Palma de manila (*Adonidia merilli*).

Estas especies representan más del 50 % de la cantidad de individuos presentes en cada localidad. Para la localidad Suroccidente, alcanzan un 68.75%, en Suroriente un 70.62%, en Norte Centro Histórico un 76.26%, en Metropolitana un 61.83%, y en Riomar un 59.27% (ANEXO C). Destaca que en la localidad Norte Centro Histórico hay más árboles representativos en la remoción de material particulado, mientras que en la localidad Riomar su cantidad es inferior que en las otras cinco localidades.

Con nuestros resultados, podemos demostrar que estas especies son las principales contribuyentes a la cobertura arbórea de la ciudad de Barranquilla. Este fenómeno no es fruto del azar, ya que, en un estudio llevado a cabo por Serrano, G. en 2022 en la misma ciudad, estas mismas cuatro especies destacaron como las más relevantes en el arbolado urbano. El Mango (*Mangifera indica*) encabezó la lista con un 70% de importancia, seguido por el Roble Morado (*Tabebuia rosea*) con un 27%, el Almendro (*Terminalia catappa*) con un 25%, y finalmente, la Palma de manila (*Adonidia merilli*) con un 14% en términos de importancia relativa. Esto nos proporciona una comprensión sólida de las especies más representativas en la ciudad, en cuanto a la cantidad de individuos que aportan como a su relevancia en la cobertura vegetal urbana. De estas 4 especies de mayor relevancia en nuestra ciudad, llama la atención que solo el Almendro (*Terminalia catappa*) sea especie nativa, y que las otras tres restantes sean de otros países y se hayan introducido en nuestro territorio. Esto representa un bajo porcentaje del protagonismo de especies nativas en la relevancia que pueden tener en la cobertura arbórea de la ciudad, lo que puede arriesgar si las especies exóticas son altamente competitivas, al punto de despojar nuestras propias especies del territorio.

Los resultados en cuanto a la comparación de los niveles de remoción de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  resaltan la importancia de ciertas especies en la remoción de material particulado, y se sustentan con el análisis ANOVA realizado. Los valores de P, tanto para  $PM_{10}$  como para  $PM_{2.5}$ , son

notablemente bajos, registrando 0,0006 y 0,0010, respectivamente. Estos valores indican que la muestra aleatoria tomada del arbolado urbano es representativa de la cobertura vegetal total real de la ciudad y que su potencial de remoción es significativo. Dado que los valores son inferiores a 0.05, según la teoría ilustrada en el trabajo investigativo, realizado por Miranda en (2021), podemos concluir que los resultados no son aleatorios, respaldando la representatividad de la muestra completa y la significancia real de la capacidad de remoción del arbolado urbano en Barranquilla.

En la ciudad, en cada localidad hay especies significativas, pero se denotan variaciones entre ellas, mediante el análisis de medida de tendencia central y prueba de LSD de Fisher se evidenciaron las diferencias entre localidades y los promedios de remoción para cada una. De acuerdo con las Figuras 17 y 21, donde se relacionan los gráficos elaborados a partir del software statgraphics justifica los intervalos de confianza donde se evidencia lo siguiente: Las localidades pueden agruparse en dos categorías. En el primer grupo, encontramos la Metropolitana, Norte Centro Histórico y Suroriente, que se destacan por su mayor capacidad de remoción de material particulado. El segundo grupo formado por Riomar y Suroccidente, con menor capacidad de remoción. En el caso del primer grupo se evidencia que las diferencias no son significativas porque sus intervalos de confianza coinciden paralelamente, pero existe una diferencia estadísticamente significativa con las otras dos localidades del segundo grupo. Por su parte, el segundo grupo no tiene diferencias significativas entre sí, pero sí con las localidades del primer grupo, ya que no coincide paralelamente con sus intervalos de confianza.

Las diferencias son significativas en la remoción de material particulado  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  se atribuye principalmente a las características fenotípicas de los árboles y al número de individuos de la misma especie presentes en un área determinada. Es evidente que en las localidades donde

el Mango (*Mangifera indica*) prevalece como la especie predominante, se observa una mayor eliminación de estos contaminantes.

Una de las características distintivas del Mango (*Mangifera indica*) que lo convierte en la especie más destacada en la eliminación de material particulado PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> es la presencia de estomas en sus hojas y su densidad estomática. Según Agüero, K. et. al. (2017), las estomas son la parte de la hoja donde se acumula una mayor cantidad de partículas contaminantes. Esto está relacionado con la densidad de estomas, que varía según las condiciones de exposición a la luz solar. En el caso del Mango, la densidad de estomas en sombra es del 50 %, pero aumenta mucho al alcanzar un 70 % cuando los árboles están expuestos directamente al sol. Una mayor densidad de estomas se traduce en una mayor captura de material particulado. Por lo tanto, al contar con estas características en su fenotipo y tener la mayor cantidad de individuos sembrados en la ciudad lo convierten en la especie representativa en cuanto a la remoción total de material particulado PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> por año.

Teniendo en cuenta lo anterior, y considerando las condiciones climáticas de la ciudad de Barranquilla, se comprende por qué el Mango (*Mangifera indica*) es una de las especies más efectivas en la eliminación de material particulado. En esta ciudad, los árboles están expuestos en su mayoría a la radiación solar, lo que aumenta la densidad estomática, por lo tanto, mejora la eficiencia en la remoción de contaminantes.

En lo que respecta a la eliminación promedio de material particulado PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> proporcionada por la vegetación urbana, se detecta que la especie Caucho cartagenero (*Ficus benghalensis*) es la más destacada en este proceso, debido a que es un árbol perennifolio que puede alcanzar hasta 20 metros de altura tiene la capacidad de abarcar una amplia extensión del área en que se encuentra. Sus hojas, que son coriáceas y enteras, presentan una forma oval o elíptica, miden entre 20 y 40 centímetros de longitud y muestran venas laterales prominentes.

Este árbol también posee raíces aéreas numerosas que pueden extenderse hasta el suelo. El tallo tiene una corteza lisa blanca-grisáceo, mientras que las ramas presentan una suave pubescencia y estipulas (Alcaldía de Barranquilla et al., 2013). Todas estas características le permiten al Caucho cartagenero (*Ficus benghalensis*) tener una presencia más amplia en la distribución espacial, por lo que puede tener la facilidad de capturar un número mayor de partículas que se entren dispersas en el aire. Este indicador reviste una gran importancia, ya que nos permite comprender cuánto contribuye cada individuo arbóreo a la eliminación de estos contaminantes. Por lo tanto, esta información es fundamental para la planificación de futuros proyectos de siembra estratégica destinados a mejorar la calidad del aire en la ciudad de Barranquilla.

A pesar de que durante el curso de nuestra investigación no experimentamos ninguna dificultad con el programa i-Tree Eco, es fundamental tener en cuenta que los manuales del software advierten sobre posibles anomalías en sus metodologías y procedimientos para estimar la eliminación de partículas  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  y CO. Esto indica la necesidad de llevar a cabo investigaciones adicionales que analicen el impacto de los árboles en las concentraciones, captura y eliminación de material particulado  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  y CO, con el propósito de precisar los métodos empleados por el programa. Asimismo, es esencial proporcionar datos de concentración de contaminantes más precisos, ya que esto contribuiría a una evaluación más precisa de los efectos de la remoción de los árboles.

Además, al conocer la ubicación espacial de los árboles que muestreamos, es vital comprender el impacto de la cobertura arbórea urbana en la remoción de partículas contaminantes, un servicio ecosistémico esencial. Para llevar a cabo este análisis, existen diversas metodologías, entre las que se incluye la implementada por Vásquez, D. en 2019. Su enfoque nos permite examinar la capacidad de los árboles para eliminar partículas contaminantes en los lugares de muestreo. Cada

punto de muestreo nos proporciona información detallada sobre el comportamiento de estas partículas en el ambiente y las condiciones climáticas que imperan en ese momento.

No obstante, esta metodología no brinda una visión holística del comportamiento a nivel poblacional en el territorio. Por tanto, en nuestra investigación implementamos un método adicional, la ponderación inversa de distancia (IDW). Este enfoque nos permite analizar cómo se distribuye este servicio ecosistémico en todo el distrito, lo que, a su vez, nos brindó una comprensión más completa de la remoción de partículas contaminantes en toda la ciudad de Barranquilla.

De manera notable, se observó que la eficiencia en la eliminación de partículas contaminantes de tamaño inferior a  $2.5 \mu\text{m}$  fue más destacada en comparación con las partículas de tamaño inferior a  $10 \mu\text{m}$ . Esta disparidad es diferencia de la cantidad de partículas liberadas en el aire y de que los árboles pueden modular su capacidad de remoción según su tamaño. Las partículas más finas tienden a retenerse y eliminarse con mayor eficacia, ya que se adhieren fácilmente a las hojas y la corteza de los árboles. Además de esto, los árboles también poseen la habilidad de absorber gases contaminantes, tales como monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno y partículas como cadmio, níquel y plomo (World Wildlife Fund, 2020).

La eliminación de partículas suspendidas en el aire es un servicio crucial proporcionado por los ecosistemas arbóreos, ya que contribuye a mejorar la calidad del aire y a reducir los impactos negativos en la salud humana y el entorno medioambiental. Al comparar nuestros resultados con investigaciones similares a nivel nacional e internacional, como el estudio llevado a cabo en la ciudad de Barcelona, España, que demostró que los árboles urbanos pueden eliminar  $8720 \text{ kg/año}$  de partículas con un diámetro menor de  $10 \text{ micras}$  y  $900 \text{ kg/año}$  de partículas con un diámetro menor de  $2.5 \text{ micras}$  (Orellana, 2022), y el estudio realizado en el Valle de Aburra, que indicó

que la cobertura arbórea tiene una capacidad de eliminación de 418,57 kg para  $PM_{10}$  y 17,07 kg para  $PM_{2.5}$  (Calle, 2022), queda demostrado que el servicio ecosistémico de eliminación proporcionado por el arbolado urbano en Barranquilla es limitado. En concreto, la capacidad de eliminación para  $PM_{10}$  es de 103,2 kg/año, y para  $PM_{2.5}$  de 0,19 kg/año. Esta limitada eficacia en la eliminación de material particulado en comparación con las zonas mencionadas anteriormente, podría atribuirse a la menor cantidad de vegetación y espacios verdes en Barranquilla, así como a las características geográficas y climáticas de la ciudad, además de la carga de contaminantes emitida desde diferentes fuentes, ya que las áreas con las que se está realizando el análisis comparativo manejan una carga de contaminantes mayor, pero poseen una representatividad alta en cuanto a remoción brindada por su cobertura vegetal.

## **9. Conclusiones**

En resumen, este estudio ha resaltado la importancia del arbolado urbano como un componente esencial de la infraestructura verde en las ciudades, especialmente en áreas altamente urbanizadas como Barranquilla. A lo largo de la investigación, se evidenció que la mayoría de las especies que componen la cobertura vegetal urbana son exóticas e invasoras, originarias de otras regiones del mundo. Por ende, se destaca la necesidad de fortalecer la presencia de especies endémicas para que nuestro arbolado urbano adquiriera características propias de la región.

En lo que concierne a la eliminación de partículas  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ , se puede concluir que el arbolado urbano en Barranquilla muestra un rendimiento limitado en la depuración de partículas contaminantes en la atmósfera. Es esencial fortalecer este servicio ecosistémico para que su aporte contribuya de manera significativa a la reducción de la exposición de la población a partículas finas perjudiciales para la salud. Además, se observó que no todas las especies arbóreas presentan el mismo nivel de eficacia en la eliminación de material particulado. Algunas especies,

como el caucho cartagenero (*Ficus benghalensis*), podrían tener un impacto mayor en la purificación del aire si su densidad poblacional aumentara, mientras que especies como el mango (*Mangifera indica*) muestran una eficiencia algo menor, pero su relevancia persiste debido a su mayor presencia en el arbolado urbano. Esto resalta la importancia de considerar estos factores al seleccionar y gestionar especies en la planificación del arbolado urbano en futuros proyectos de silvicultura y mejoramiento del paisaje en la ciudad.

Finalmente, los mapas generados utilizando la metodología de Ponderación Inversa de la Distancia (Inverse Distance Weighted “IDW”) arrojaron resultados reveladores. Estos indican que el servicio ecosistémico de eliminación proporcionado por el arbolado urbano en Barranquilla se destaca en mayor medida con relación a partículas de menor tamaño, aunque también se observa una similitud en las zonas de mayor eficacia de remoción para ambos tipos de partícula.

Particularmente, estas áreas sobresalientes se encuentran en la localidad de norte centro histórico, y suroriente, resaltando por su buen servicio ecosistémico. En consecuencia, se sugiere que se sigan implementando este tipo de metodología para analizar los servicios ecosistémicos de una forma más ilustrativa y tomar estos puntos identificados por una mayor remoción como punto de partida para futuras investigaciones orientadas a explorar otros tipos de servicios ecosistémicos que el arbolado urbano y otras áreas naturales pueden proporcionarle a la ciudad de Barranquilla.

## **10. Recomendaciones**

- Debe fortalecerse la seguridad y la coordinación con las autoridades competentes para que se puedan realizar muestreos ambientales en áreas de difícil acceso en la ciudad de Barranquilla.

- En miras de lograr un desarrollo sostenible para la ciudad, se debe tener en cuenta este tipo estudios, ya que pueden servir como base estratégica para la planificación de futuras campañas de siembra masiva y la formulación de políticas públicas destinadas a mejorar el arbolado urbano.
- Se sugiere llevar a cabo investigaciones sobre otros servicios ecosistémicos que el arbolado urbano puede ofrecer a la ciudad. Cabe mencionar, que además de su capacidad para eliminar material particulado, el arbolado urbano tiene el potencial de influir en la regulación de otros contaminantes atmosféricos. Por lo tanto, resultaría valioso analizar su eficacia en la captura de estos contaminantes adicionales.
- Es esencial realizar un análisis que contribuya a la comprensión de la relación entre la eliminación de contaminantes atmosféricos por parte del arbolado urbano y la salud pública de los habitantes de Barranquilla. Esto proporcionaría información vital para respaldar y complementar políticas de salud pública y gestión urbana.
- Considerando que las fuentes fijas y móviles son los principales generadores de contaminantes atmosféricos, se sugiere llevar a cabo investigaciones con el propósito de determinar la cantidad de contaminantes emitidos por estos actores, y cuánta de esa carga puede ser eliminada por el arbolado urbano. Esto contribuiría a cuantificar de manera precisa el impacto del arbolado urbano en la calidad del aire.
- Se aconseja explorar diversas herramientas, métodos de análisis alternativos, y enfoques como los Sistemas de Información Geográfica (SIG) o técnicas estadísticas adicionales que puedan enriquecer la estructuración de estudios similares. Estas iniciativas son fundamentales para promover el desarrollo sostenible de la ciudad, aprovechando al máximo los diversos servicios ecosistémicos que la naturaleza urbana puede ofrecer. Esto,

a su vez, contribuirá a una ciudad más saludable y sostenible en beneficio de sus habitantes.

## 11. Bibliografía

- Acosta, M. (2021). Plantas leñosas: qué son, características y ejemplos. Ecología verde. <https://www.ecologiaverde.com/plantas-lenosas-que-son-caracteristicas-y-ejemplos-3300.html>
- Agüero, K. Carpio, B. Chaves, K. Gómez, J. Lindwedel, A. (2017). Densidad estomática de *Mangifera indica* con respecto a la exposición solar. [https://rstudio-pubs-static.s3.amazonaws.com/328284\\_3380bd990a28405082f97cba7d4d7369.html](https://rstudio-pubs-static.s3.amazonaws.com/328284_3380bd990a28405082f97cba7d4d7369.html)
- Alcaldía de Barranquilla, Distrito Especial, Industrial y Portuario. (2018). Calidad del aire en Barranquilla, en permanente vigilancia por organismos ambientales. Alcaldía de Barranquilla, Distrito Especial, Industrial y Portuario. <https://www.barranquilla.gov.co/mi-barranquilla/calidad-del-aire-en-barranquilla-en-permanente-vigilancia-por-organismos-ambientales>
- Alcaldía de Barranquilla, Distrito Especial, Industrial y Portuario. (2020). Siembra Barranquilla. Alcaldía de Barranquilla, Distrito Especial, Industrial y Portuario. <https://www.barranquilla.gov.co/vive/siembra-barranquilla>
- Alcaldía de Barranquilla, Grupo Argos, & Departamento técnico administrativo del medio ambiente de Barranquilla - DAMAB. (2013). Manual de Silvicultura Urbana para Barranquilla. [https://www.researchgate.net/profile/Jorge-Camano-2/publication/331230765\\_Manual\\_de\\_Silvicultura\\_Urbana\\_para\\_Barranquilla/links/5c6d54e84585156b570be224/Manual-de-Silvicultura-Urbana-para-Barranquilla.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Jorge-Camano-2/publication/331230765_Manual_de_Silvicultura_Urbana_para_Barranquilla/links/5c6d54e84585156b570be224/Manual-de-Silvicultura-Urbana-para-Barranquilla.pdf)
- Área metropolitana del Valle de Aburra. (s.f). PLAN SIEMBRA ABURRÁ. <https://www.metropol.gov.co/ambiental/Paginas/Plan-Siembra-Aburra.aspx>

Arroyave, M., Posada, M., Nowak, D., & Hoehn, R. (2018). Remoción de contaminantes atmosféricos por el bosque urbano en el valle de Aburrá. *Colombia Forestal*, 22(1), 5-16.  
<https://doi.org/10.14483/2256201x.13695>

Balvanera, P. (2012). Los servicios ecosistémicos que ofrecen los bosques tropicales. *Ecosistemas revista científica y técnica de ecología y medio ambiente*.  
<https://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?Id=709>

Bejarano, D. García, D. (2018). Inventario arbóreo en ecosistemas de páramo a partir de técnicas de percepción remota. Universidad del Valle. Cali, Colombia.

<https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/server/api/core/bitstreams/f89698d0-4887-4fcf-8a7a-559bb9dccc31/content>

Boldo, E. (2016). La contaminación del aire. <https://doi.org/10.4321/repisalud.7274>

Calle, A. (2022). Servicios ecosistémicos del arbolado urbano de los espacios públicos del valle del río Aburrá en Medellín. Universidad nacional de Colombia.  
<https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/84732/1037614000.2023.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

Cantuarias, C. (2021). ¿Cómo hacer visibles los servicios ecosistémicos de nuestras ciudades? Experiencias en Francia. *Journal of Economics, Finance, and International Business*, 5(1), 65-67.  
<https://hal.science/hal-03661975/document>

Cardona, K. Bermúdez, V. (2019). Arbolado urbano como estrategia de gestión de la calidad del aire. <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/15906>

Cepeda, A. (2021). ¿Cuál es la calidad del aire que se respira en Barranquilla? *Contexto*.  
<https://contextomedia.com/cual-es-la-calidad-del-aire-que-se-respira-en-barranquilla/>

Cernas, D. Nava, R. (2020). Compromiso organizacional y promedio escolar en estudiantes de maestría: el efecto moderador de las tendencias alocéntricas e idiocéntricas. *Scielo*. Vol. 21.  
[https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1607-40412019000100126&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1607-40412019000100126&script=sci_arttext)

Clean Air Institute & IDEHA - Universidad del Norte. (2021). Elementos del Plan de Gestión Integral de la Calidad del Aire y de Reducción de Emisiones. Barranquilla Verde.  
<https://barranquillaverde.gov.co/storage/app/media/calidad-aire/PIGECA.pdf>

Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farberk, S., Grasso, M., Hannon, B. & Van den Belt, M. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* (387), 253-260.

De Medio Ambiente Y Recursos Naturales, S. (s. f.). Protocolo de Kioto sobre cambio climático. Gobierno de México. Recuperado de:  
<https://www.gob.mx/semarnat/articulos/protocolo-de-kioto-sobre-cambio-climatico#:~:text=El%20Protocolo%20de%20Kioto%20fue,Unidas%20sobre%20el%20Cambio%20Clim%C3%A1tico.>

El Congreso de Colombia. (1993). Ley 99 de 1993. Función Pública.  
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=297>

EPA Barranquilla verde. (2019). Informe de la cuantificación de la cobertura arbórea del D.E.I.P de Barranquilla. Barranquilla, Colombia.  
<https://barranquillaverde.gov.co/storage/app/media/silvicultura-urbana/cuantificacion%20cobertura%20arborea%20del%20DEIP%20de%20Barranquilla.pdf>

Fowler, D., Brimblecombe, P., Burrows, J. P., Heal, M. R., Grennfelt, P., Stevenson, D. K., Jowett, A., Nemitz, E., Coyle, M., Lui, X., Chang, Y. H., Fuller, G. A., Sutton, M., Klimont, Z., Unsworth, M. H., & Vieno, M. (2020). A chronology of global air quality. *Philosophical*

Transactions of the Royal Society A, 378(2183), 20190314.

<https://doi.org/10.1098/rsta.2019.0314>

García, L. (2020). Diagnóstico y control de material particulado: partículas suspendidas totales y fracción respirable pm10 [Tesis de pregrado]. Universidad El Bosque.

Gomez, M., & Ballinas, M. (2022). Percepción de servicios ecosistémicos de parque urbanos en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. INNOVACIÓN MÁS DESARROLLO, XI (30), ISSN: 2007-6703.

<http://148.222.11.200/jspui/bitstream/123456789/3754/1/10.31644.IMASD.30.2022.a07.pdf>

González, D. (2019). Evaluación De La Remoción De Contaminantes Atmosféricos Y La Captura De Carbono Por Parte De Los Cerros Nutibara Y Volador De Medellín. Universidad EIA. <https://repository.eia.edu.co/server/api/core/bitstreams/23a58acd-217a-4d5c-b236-bf933fa5e84b/content>

González, J. (2022). Valoración Biofísica y Sociocultural de Servicios Ecosistémicos de Tres Parques Urbanos de la Ciudad de Bogotá (Colombia). Universidad de ciencias aplicadas y ambientales. Bogotá, Colombia. [https://repository.udca.edu.co/bitstream/handle/11158/4888/1-%20Documento%20Final\\_Tesis\\_John%20Alexander%20Gonzalez%20Jurado.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.udca.edu.co/bitstream/handle/11158/4888/1-%20Documento%20Final_Tesis_John%20Alexander%20Gonzalez%20Jurado.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Hernández, J.; Cuesta, E.; Ortiz, B.; Rosano, E. (2023). Servicios ecosistémicos del arbolado urbano en la Laguna de San Baltazar, Puebla, mediante el uso del software i-Tree. CIENCIA ergo-sum, 30(2). <http://doi.org/10.30878/ces.v30n2a5>

Jiménez, L. (2020). ¿Por qué Barranquilla es una ciudad arbolada? EL HERALDO. <https://www.elheraldo.co/barranquilla/por-que-barranquilla-es-una-ciudad-arbolada-699840>

La República de Colombia. (2015). Decreto 1076 de 2015 [Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible]. Función Pública.

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=78153>

Lima, L. (2022). Gases de efeito estufa e poluição do ar: semelhanças e diferenciais. *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*.

<https://doi.org/10.32749/nucleodoconhecimento.com.br/meio-ambiente/gases-de-efeito-estufa>

Llopis, J. (2013). La matemática y la estadística: una orquesta hecha instrumento.

[https://jllloisperez.com/2013/01/28/test-isd-least-significant-](https://jllloisperez.com/2013/01/28/test-isd-least-significant-difference/#:~:text=El%20Test%20LSD%20(Least%20significant,medias%20mediante%20la%20t%C3%A9cnica%20ANOVA.)

[difference/#:~:text=El%20Test%20LSD%20\(Least%20significant,medias%20mediante%20la%20t%C3%A9cnica%20ANOVA.](https://jllloisperez.com/2013/01/28/test-isd-least-significant-difference/#:~:text=El%20Test%20LSD%20(Least%20significant,medias%20mediante%20la%20t%C3%A9cnica%20ANOVA.)

Manisalidis, I., Stavropoulou, E., Stavropoulos, A., & Bezirtzoglou, E. (2020). Environmental and Health Impacts of Air Pollution: A Review. *Frontiers in Public Health*, 8.

<https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00014>

Manrique, S. (2019). Barranquilla avanza en proyectos ambientales – Alcaldía de Barranquilla, Distrito Especial, Industrial y Portuario. Alcaldía de Barranquilla, Distrito Especial, Industrial y Portuario. <https://www.barranquilla.gov.co/adi/barranquilla-avanza-en-proyectos-ambientales>.

Martínez, K. Vanegas, K. Serrato, O. (2021). Evaluación de los servicios ecosistémicos del arbolado urbano de la localidad de Fontibón mediante i-Tree. *ITTPA*. Vol2.

<https://ittpa.car.gov.co/uploads/files/6298bfab9e2f1.pdf>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2022). Contaminación Atmosférica en Colombia. <https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/contaminacion-atmosferica/>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2022). Convención de Viena y Protocolo de Montreal. Colombia potencia mundial de la vida. Recuperado de:  
<https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/convencion-de-viena-y-protocolo-de-montreal/>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). Resolución 2254 de 2017.  
<https://www.minambiente.gov.co/documento-entidad/resolucion-2254-de-2017/>

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (s. f.). Convenio de Ginebra de 1979 sobre contaminación atmosférica transfronteriza a gran distancia. Vicepresidencia tercera del gobierno. Recuperado de: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/normativa/convenio-ginebra.html>

Miranda, R. (2021). ¿Qué esperan los latinoamericanos de la democracia? Un modelo de análisis de varianza (ANOVA). Agenda internacional.  
<https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/agendainternacional/article/view/24429/23192>

Narváez, V. (2021). Los retos para garantizar la calidad del aire en Barranquilla. EL HERALDO. <https://www.elheraldo.co/medio-ambiente/cumplira-barranquilla-con-la-meta-en-calidad-del-aire-para-el-2030-850745>

Nowak, D. J. (2021). Understanding i-Tree: 2021 Summary of programs and methods (NRS-GTR-200-2021; p. NRS-GTR-200-2021). U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station. <https://doi.org/10.2737/NRS-GTR-200-2021>

Núñez, Y. (2019). Estimación de fuentes de material particulado atmosférico (PM10 y PM2.5) en la ciudad de Barranquilla, Colombia [Tesis de maestría]. Universidad de la costa.

Orellana, G. (2022). Los Servicios Ecosistémicos Del Arbolado Urbano: Caso De Estudio Barcelona [Tesis de maestría]. Universidad Politécnica de Cataluña.

Organización de las naciones unidas. (s. f). El Acuerdo de París. United Nations Climate Change. Recuperado de: <https://unfccc.int/es/acerca-de-las-ndc/el-acuerdo-de-paris#:~:text=El%20Acuerdo%20de%20Par%C3%ADs%20habla,orientaci%C3%B3n%20general%20al%20Mecanismo%20Tecnol%C3%B3gico>.

Organización mundial de la salud. (2021). Las nuevas Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire tienen como objetivo evitar millones de muertes debidas a la contaminación del aire. OMS. Recuperado de: <https://www.who.int/es/news/item/22-09-2021-new-who-global-air-quality-guidelines-aim-to-save-millions-of-lives-from-air-pollution>

Organización mundial de la salud. (2022). Contaminación del aire ambiente (exterior). OMS. Recuperado de: [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)

Ortega, C. (S.f). ¿Qué es la media, la mediana y la moda? Questionpro. <https://www.questionpro.com/>

Ortiz, F. (2020). Servicios ecosistémicos y gestión del arbolado urbano en santo domingo, república dominicana [Tesis de maestría]. Centro agronómico tropical de investigación y enseñanza.

Paracta, D. (2021). Retención del polvo atmosférico sedimentable (pas) en las especies ficus benjamina y schinus molle indicadoras de la calidad del aire en la alameda bolognesi y av. Leguía, referentes para la planeación urbana sustentable tacna. Universidad Privada De Tacna, Perú. <https://repositorio.upt.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12969/2176/Paracta-Garcia-Dariela.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Parlamento Europeo. (2008). Relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa. Parlamento y consejo europeo. Recuperado de:  
<https://www.boe.es/doue/2008/152/L00001-00044.pdf>

Pérez, J. (2017). La calidad del aire en Colombia: un problema de salud pública, un problema de todos. Scielo. Vol 16(2). [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1657-95502017000200005](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1657-95502017000200005)

Piraguata, M. (2021). Evaluación de los servicios ecosistémicos en el borde urbano de Bogotá para su gestión sostenible. Universidad distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia.  
<https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/28706/PiragautaSierraMonica2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Pucha, D. (2023). Caracterización forística y estructura del arbolado urbano de la ciudad de Loja. Bosques Latitud Cero. Vol. 13(2).  
[https://drive.google.com/file/d/1VSrQZIFUs\\_AeI9Cp16CTvvJIJTAS\\_VVv/view?pli=1](https://drive.google.com/file/d/1VSrQZIFUs_AeI9Cp16CTvvJIJTAS_VVv/view?pli=1)

Rdicelli, C. Pomboza, M. Villacrés, P. Boderó, E. (2019). Sistemas de información geográfica y su aplicación en las ciencias sociales: una revisión bibliográfica. Scielo. E no. 28.  
[http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2550-67222019000200024](http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2550-67222019000200024)

Ríos, Y. (2022). Captura de material particulado en puntos críticos del Valle de Aburrá por parte de la vegetación urbana en relación con sus rasgos funcionales. Universidad EIA, Colombia. <https://repository.eia.edu.co/server/api/core/bitstreams/d05a4c30-c0e8-48f1-9245-6a62384a3cee/content>

Rositano, F.; Civeira, G. (2022). Servicios de los ecosistemas en áreas urbanas y periurbanas: su reconocimiento por distintos actores sociales. Scielo.  
<http://www.scielo.org.ar/pdf/cuba/v34n34/1666-6186-cuba-34-34-00031.pdf>

Ruiz, M. (2017). Estimación de la desviación estándar. Estadística Española. Vo. 59.

[https://www.researchgate.net/profile/Mariano-Ruiz-](https://www.researchgate.net/profile/Mariano-Ruiz-Espejo/publication/319332721_Estimacion_de_la_desviacion_estandar/links/59a589beaca272895c14495c/Estimacion-de-la-desviacion-estandar.pdf)

[Espejo/publication/319332721\\_Estimacion\\_de\\_la\\_desviacion\\_estandar/links/59a589beaca272895c14495c/Estimacion-de-la-desviacion-estandar.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Mariano-Ruiz-Espejo/publication/319332721_Estimacion_de_la_desviacion_estandar/links/59a589beaca272895c14495c/Estimacion-de-la-desviacion-estandar.pdf)

Sarduy, Y. (2007). El análisis de información y las investigaciones cuantitativa y cualitativa.

La Habana, Cuba. Recuperado de. <https://www.redalyc.org/pdf/214/21433320.pdf>

Seinfeld, J.H. and Pandis, S.N. (2016) Atmospheric Chemistry and Physics: From Air

Pollution to Climate Change. John Wiley & Sons, Hoboken.

Serrano, G. (2022). Diagnóstico Del Arbolado Urbano En El Distrito De Barranquilla. E.P.A

Barranquilla Verde. [https://barranquillaverde.gov.co/storage/app/media/silvicultura-](https://barranquillaverde.gov.co/storage/app/media/silvicultura-urbana/DIAGNOSTICO%20DEL%20ARBOLADO%20URBANO%20EN%20EL%20DISTRITO%20DE%20BARRANQUILLA.pdf)

[urbana/DIAGNOSTICO%20DEL%20ARBOLADO%20URBANO%20EN%20EL%20DISTRIT](https://barranquillaverde.gov.co/storage/app/media/silvicultura-urbana/DIAGNOSTICO%20DEL%20ARBOLADO%20URBANO%20EN%20EL%20DISTRITO%20DE%20BARRANQUILLA.pdf)

[O%20DE%20BARRANQUILLA.pdf](https://barranquillaverde.gov.co/storage/app/media/silvicultura-urbana/DIAGNOSTICO%20DEL%20ARBOLADO%20URBANO%20EN%20EL%20DISTRITO%20DE%20BARRANQUILLA.pdf)

Suprema Corte de Justicia. (S.f.). Georreferenciación.

<https://biblioteca.enj.org/handle/123456789/81928>

Torres, J. Gibert, Del Pilar, G. (2007). La enseñanza de la probabilidad y estadística usando

statgraphics. En Crespo, Cecilia Rita (Ed.), Acta Latinoamericana de Matemática Educativa (pp.

689-694). Camagüey, Cuba: Comité Latinoamericano de Matemática Educativa A. C.

Ugalde, N. Balbastre, F. (2013). Investigación cuantitativa e Investigación cualitativa:

buscando las ventajas de las diferentes metodologías de Investigación. Recuperado de.

<https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/economicas/article/view/12730/11978>

US EPA. (2022). Conceptos básicos sobre el material particulado.

<https://espanol.epa.gov/espanol/conceptos-basicos-sobre-el-material-particulado-pm-por-sus-siglas-en-ingles>

Vargas, T. (2021). Efecto de la vegetación en el nivel de contaminación atmosférica generada por material particulado en cañones urbanos.

<https://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/20033>

Vásquez, D. (2019). Estimación De La Remoción De Pm2.5 Por El Arbolado Urbano En El Valle De Aburrá. Universidad de Antioquia, Colombia.

[https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/16027/1/VelasquezDaniela\\_2019\\_RemocionArboladoUrbano.pdf](https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/16027/1/VelasquezDaniela_2019_RemocionArboladoUrbano.pdf)

Vásquez, S. Ramírez, M. Arceo, S. Solís, J. (2023). Eliminación de la contaminación por el bosque urbano en Las Palmas, Colima, México. *Madera y Bosques*, 29(1), e2912460.

<https://myb.ojs.inecol.mx/index.php/myb/article/view/2460/2457>

vgalvez\_baq. (2021). LOCALIDADES QUILLA\_WFL1—Información general. ArcGIS. <https://barranquilla.maps.arcgis.com/home/item.html?id=92463770c05549589c70a2f897fe417b>

Vieco, M. (2014). Estimación de la remoción de material particulado por parte de tres especies arbóreas en un corredor vial de Medellín. <https://repository.eia.edu.co/handle/11190/1930>

Villalobos, B. (2007). La gestión ambiental como estrategia para el mejoramiento de la calidad del aire en la ciudad de Barranquilla. Universidad Autónoma del Caribe. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/4962/496251109007.pdf>

Wilson, N. (2016). Determinación Del Coeficiente De Variación De La Demanda Diaria Y Horaria De Agua Potable De La Ciudad Del Cusco. Universidad andina del cusco, Perú. [https://repositorio.uandina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12557/696/Nicole\\_Tesis\\_bachiller\\_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.uandina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12557/696/Nicole_Tesis_bachiller_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

World Health Organization. (2021). WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. World Health Organization. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329>.

World Health Organization: WHO. (2022). Contaminación del aire ambiente (exterior).  
www.who.int. [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)

World Wildlife Fund. (2020). ¿Por qué necesitamos árboles en las ciudades?  
<https://www.wwf.org.co/>

## 12. Anexos

### ANEXO A

*Cantidad de árboles por especie arbórea de las 5 localidades de Barranquilla.*

Nombre Científico	Nombre Común	Cantidad de árboles por localidad				
		Norte Centro Histórico	Metropolitana	Riomar	Suroccidente	Sur-orientado
Adonidia merrilli	Palma de Manila	35	2	46	16	8
Albizia guachapele	Albizia	1	2	0	1	2
Albizia saman	Campano	0	0	5	1	1
Alstonia scholaris	Alstonia	0	0	5	0	2
Anacardium occidentale	Marañón	0	0	0	0	1
Annona muricata	guanábana	0	2	0	0	1
Araucaria araucana	Araucaria	2	0	0	0	0
Azadirachta indica	Neem	5	6	12	18	3
Bougainvillea glabra	Trinitaria	0	2	0	0	0
Bucida buceras	Olivo negro	1	0	0	0	0
Bursera simaruba	Palo mulato	0	1	0	0	0
Carica papaya	Papaya	0	1	0	0	0
Cedrela odorata	Cedro rojo	0	0	0	1	0
Ceiba pentandra	Ceiba	5	6	1	0	1

<i>Ceratonia siliqua</i>	Algarrobo de España	0	0	0	0	1
<i>Citrus aurantium</i>	Naranja agrio	0	0	0	1	0
<i>Cnidioscolus aconitifolius</i>	Chaya	1	0	0	0	0
<i>Coccoloba acuminata</i>	maíz tostado	0	1	0	2	0
<i>Coccoloba uvifera</i>	Uvita playa	1	1	0	1	0
<i>Cocos nucifera</i>	Palma cocotera	0	0	8	0	0
<i>Conocarpus erectus</i>	Mangle Zaragoza	0	0	2	0	0
<i>Copaifera officinalis</i>	Copaiba	0	0	1	0	0
<i>Cordia dentata</i>	Uvita mocosa	3	0	0	0	0
<i>Cordia sebestena</i>	San Joaquín	0	0	3	0	0
<i>Crateva spp</i>	Crateva	0	0	0	0	1
<i>Crescentia cujete</i>	Totumo	2	1	1	1	0
<i>Delonix regia</i>	Acacio	0	1	0	0	0
<i>Diospyros ebenum</i>	Ebao	0	1	0	0	0
<i>Elaeis guineensis</i>	Palma de aceite	0	0	1	0	0
<i>Ficus benghalensis</i>	Caucho cartagenero	4	1	3	0	0

<i>Ficus benjamina</i>	Laurel	1	7	2	7	9
<i>Ficus religiosa</i>	<i>Ficus religiosa</i>	2	0	0	1	0
<i>Gliricidia sepium</i>	Matarratón	3	7	8	7	5
<i>Guaiacum officinale</i>	Guayacán	2	7	4	6	7
<i>Guazuma ulmifolia</i>	Guácimo	2	0	1	0	0
<i>Handroanthus chrysanthus</i>	Guayacán amarillo	0	4	0	0	3
<i>Lagerstroemia speciosa</i>	Flor de reina	1	0	0	2	0
<i>Licania tomentosa</i>	Oiti	0	1	0	0	0
<i>Livistona chinensis</i>	Palmera de abanico	2	0	7	0	0
<i>Mangifera indica</i>	Mango	50	99	35	77	100
<i>Manilkara zapota</i>	Níspero	3	3	2	2	5
<i>Melicoccus bijugatus</i>	Mamón	0	4	4	2	3
<i>Morinda citrifolia</i>	Noni	0	1	0	0	0
<i>Moringa oleifera</i>	Moringa	0	0	1	0	2
<i>Pachira quinata</i>	Ceiba roja	0	1	0	0	0
<i>Peltophorum pterocarpum</i>	Acacia ferruginea	0	4	0	0	0
<i>Phoenix dactylifera</i>	Palma datilera	0	0	2	1	0

Pinus caribeño	Caribbean pine	0	1	0	0	0
Pithecellobium dulce	Buche	1	1	0	0	0
Platymiscium pinnatum	Trébol	0	2	3	0	0
Plumeria alba	Azuceno	0	0	3	1	0
Prosopis juliflora	Trupillo	0	0	0	4	0
Pseudobombax septenatum	Ceiba Majagua	1	0	3	0	1
Psidium guajava	Guayaba	0	3	0	1	0
Quadrella odoratissima	Olivo	0	9	0	0	2
Spondias mombin	Hobo	0	0	0	1	0
Spondias purpurea	Ciruelo	2	7	0	0	2
Sterculia apetala	Camajon	1	1	0	0	2
Syzygium cumini	Jambolan	0	2	2	1	2
Syzygium malaccense	Pera de agua	0	3	0	2	1
Tabebuia	Tabebuia	0	0	6	0	0
Tabebuia rosea	Roble morado	38	24	29	22	13
Terminalia catappa	Almendro	28	23	21	28	16
Thespesia populnea	Clemón	1	0	0	0	0

Thevetia peruviana	Ayoyote	0	0	0	1	0
<b>Total general</b>		<b>198</b>	<b>242</b>	<b>221</b>	<b>208</b>	<b>194</b>

*Nota.* Primer informe generado por el software i-Tree Eco V6, donde se relaciona la cantidad de especies arbóreas de las 5 localidades de Barranquilla. *Fuente:* Elaboración propia.

## ANEXO B

*Eliminación de Material Particulado PM10 Y PM2.5 por arbolado urbano en la ciudad de Barranquilla.*

No° especies	Nombre Científico	Nombre Común	Ponderado contaminación eliminada (g/año)	
			PM10	PM2.5
1	Peltophorum pterocarpum	Acacia ferruginea	125.5	0.2
2	Delonix regia	Acacio	13.3	0
3	Albizia guachapele	Albizia	1456.1	2.9
4	Ceratonia siliqua	Algarrobo de España	245.3	0.5
5	Terminalia catappa	Almendro	13003.5	24.5
6	Alstonia scholaris	Alstonia	248.7	0.5
7	Araucaria araucana	Araucaria	58.7	0.1
8	Thevetia peruviana	Ayoyote	22	0
9	Plumeria alba	Azuceno	269.1	0.5
10	Pithecellobium dulce	Buche	231	0.4
11	Sterculia apetala	Camajon	868.8	1.6
12	Albizia saman	Campano	650.5	1.3
13	Pinus caribeño	Caribbean pine	1.7	0
14	Ficus benghalensis	Caucho cartagenero	6316.8	11.8

15	<i>Cedrela odorata</i>	Cedro rojo	28.1	0.1
16	<i>Ceiba pentandra</i>	Ceiba	3446	6.4
17	<i>Pseudobombax septenatum</i>	Ceiba Majagua	334.5	0.6
18	<i>Pachira quinata</i>	Ceiba roja	207.4	0.4
19	<i>Cnidoscolus aconitifolius</i>	Chaya	69.9	0.1
20	<i>Spondias purpurea</i>	Ciruelo	1124.1	2.1
21	<i>Thespesia populnea</i>	Clemón	66.3	0.1
22	<i>Copaifera officinalis</i>	Copaiba	94.6	0.2
23	<i>Crateva spp</i>	Crateva	238.6	0.4
24	<i>Diospyros ebenum</i>	Ebao	121.8	0.2
25	<i>Ficus religiosa</i>	Ficus religiosa	738.4	1.3
26	<i>Lagerstroemia speciosa</i>	Flor de reina	263.2	0.4
27	<i>Guazuma ulmifolia</i>	Guácimo	469	0.9
28	<i>Annona muricata</i>	Guanábana	34.4	0
29	<i>Psidium guajava</i>	Guayaba	89.1	0.1
30	<i>Guaiacum officinale</i>	Guayacán	1731.6	3.2
31	<i>Handroanthus chrysanthus</i>	Guayacán amarillo	164.8	0.2
32	<i>Spondias mombin</i>	Hobo	8.6	0
33	<i>Syzygium cumini</i>	Jambolan	1159.7	2.2
34	<i>Ficus benjamina</i>	Laurel	4607	8.8
35	<i>Coccoloba acuminata</i>	Maíz tostado	132.6	0.2
36	<i>Melicoccus bijugatus</i>	Mamón	925.7	1.6

37	<i>Conocarpus erectus</i>	Mangle Zaragoza	48.1	0
38	<i>Mangifera indica</i>	Mango	41616.9	77
39	<i>Anacardium occidentale</i>	Marañón	25.8	0
40	<i>Gliricidia sepium</i>	Mataratón	3037.9	5.5
41	<i>Moringa oleifera</i>	Moringa	251.4	0.5
42	<i>Citrus aurantium</i>	Naranja agrio	13.9	0
43	<i>Azadirachta indica</i>	Neem	2462.5	4.6
44	<i>Manilkara zapota</i>	Níspero	950.9	1.8
45	<i>Morinda citrifolia</i>	Noni	8.3	0
46	<i>Licania tomentosa</i>	Oiti	32.4	0.1
47	<i>Quadrella odoratissima</i>	Olivo	759.4	1.3
48	<i>Bucida buceras</i>	Olivo negro	36.2	0.1
49	<i>Cocos nucifera</i>	Palma cocotera	92.9	0
50	<i>Phoenix dactylifera</i>	Palma datilera	4.6	0
51	<i>Elaeis guineensis</i>	Palma de aceite	1.8	0
52	<i>Adonidia merrilli</i>	Palma de Manila	681.9	0.5
53	<i>Livistona chinensis</i>	Palmera de abanico	98.7	0.1
54	<i>Bursera simaruba</i>	Palo mulato	32.1	0.1
55	<i>Carica papaya</i>	Papaya	2.2	0
56	<i>Syzygium malaccense</i>	Pera de agua	231.9	0.4
57	<i>Tabebuia rosea</i>	Roble morado	12160.8	22.2
58	<i>Cordia sebestena</i>	San Joaquín	32.7	0
59	<i>Tabebuia</i>	Tabebuia	134.1	0.1

60	Crescentia cujete	Totumo	117.8	0.2
61	Platymiscium pinnatum	Trébol	264.2	0.5
62	Bougainvillea glabra	Trinitaria	31.7	0
63	Prosopis juliflora	Trupillo	243.4	0.5
64	Cordia dentata	Uvita mocosa	106.8	0.2
65	Coccoloba uvifera	Uvita playa	204	0.3

---

**Total de contaminación eliminada (g/año) por el arbolado urbano de Barranquilla. 103251.7 189.8**

---

*Nota.* Segundo informe obtenido del software i-Tree Eco, donde se reflejan los datos de la remoción de material particulado por cada una de las especies presentes en la ciudad de Barranquilla para el año 2019. *Fuente:* Elaboración propia

## ANEXO C

*Porcentajes de representatividad de especies arbóreas del inventario realizado en la ciudad de Barranquilla.*

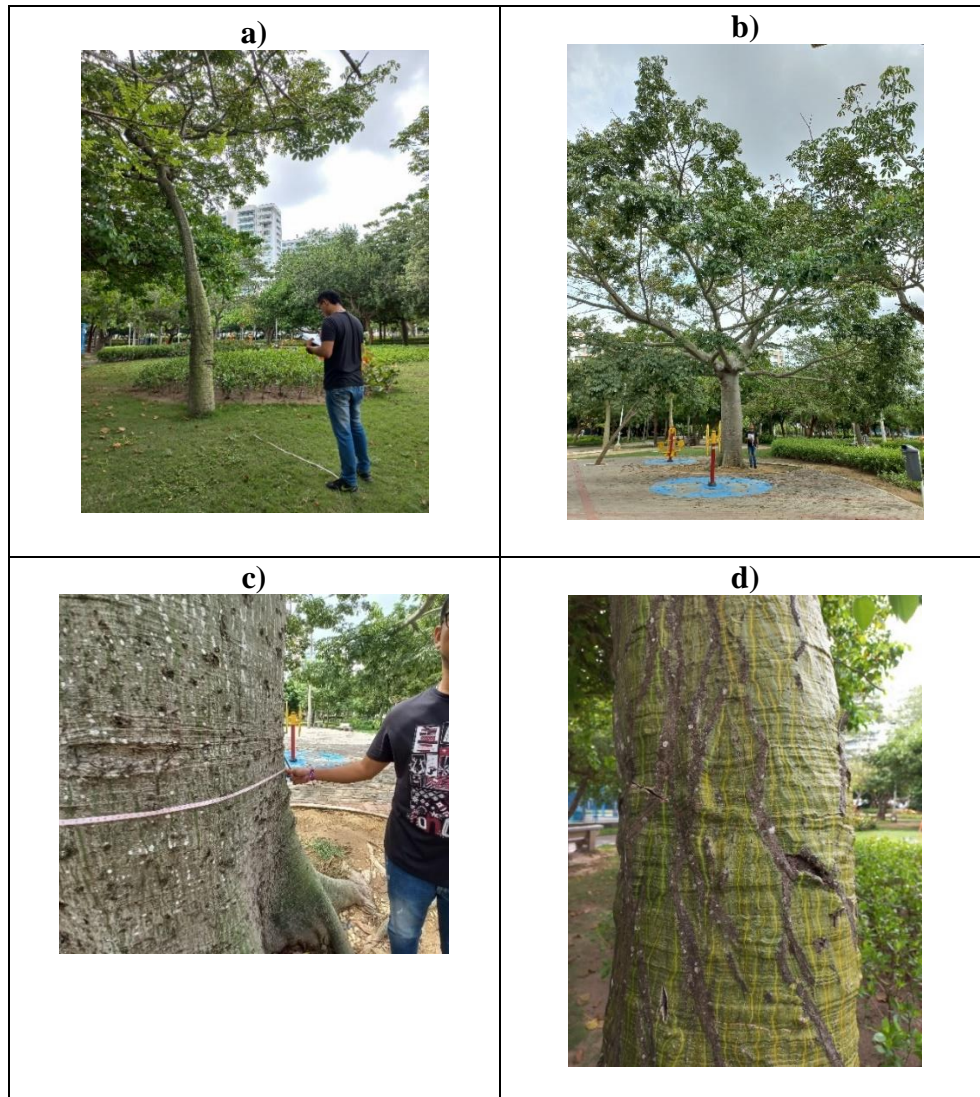
Localidad	Especie	Porcentaje De Representatividad
Suroccidente	Mango	37,02%
	Almendro	13,46%
	Roble morado	10,58%
	Neem	8,65%
	Palma de Manila	7,69%
	Laurel	3,37%
	Otros	19,23%
Suroriente	Mango	51,55%
	Almendro	8,25%
	Roble morado	6,70%
	Laurel	4,64%
	Palma de Manila	4,12%

	Guayacán	3,61%
	Mataratón	2,58%
	Otros	18,55%
<hr/>		
Norte Centro Histórico	Mango	25,25%
	Roble morado	19,19%
	Palma de Manila	17,68%
	Almendro	14,14%
	Ceiba	2,53%
	Neem	2,53%
	Otros	18,68%
<hr/>		
Metropolitana	Mango	40,91%
	Roble morado	9,92%
	Almendro	9,50%
	Olivo	3,72%
	Ciruelo	2,89%
	Guayacán	2,89%
	Laurel	2,89%
	Mataratón	2,89%
	Ceiba	2,48%
	Neem	2,48%
Otros	19,43%	
<hr/>		
Riomar	Palma de Manila	20,81%
	Mango	15,84%
	Roble morado	13,12%
	Almendro	9,50%
	Neem	5,43%
	Mataratón	3,62%
	Palma cocotera	3,62%
	Palmera de abanico	3,17%
	Tabebuia	2,71%
Albizia	2,26%	

*Fuente:* Elaboración propia.

## ANEXO D


*Toma de datos de inventario de arbolado urbano de la ciudad de Barranquilla.*



*Nota.* Toma de datos de inventario de arbolado urbano. a) Datos de ancho de copa. b) Estimación de altura total. c) Cálculo de Circunferencia a la altura del pecho (CAP). d) Evidencia para identificar especie según características del tronco. *Fuente:* Elaboración propia.

## ANEXO E

*Ficha de datos de muestreo de inventario de arbolado urbano de la ciudad de Barranquilla.*

<b>Nombre Común: Neem</b>	
<b>Nombre Científico: <i>Azadirachta indica</i></b>	
<b>Descripción:</b> Es un árbol de rápido crecimiento que puede alcanzar 15 a 20 m de altura y raramente de 35 a 40 m. Tiene abundante follaje todas las temporadas del año, pero en condiciones severas se deshoja incluso completamente. El ramaje es amplio y puede alcanzar de 15 a 20 m de diámetro ya desarrollado. El tronco es corto y recto. La corteza es dura, agrietada y es de color gris claro hasta castaño rojizo. (Alcaldía La Dorada, 2014)	
<b>Datos Árbol</b>	
<b>Altura total (m)</b>	8
<b>Altura a parte superior viva (m)</b>	8
<b>Altura a la base de la corona (m)</b>	0,8
<b>Ancho de copa (m)</b>	N-S: 4,75 E-O: 5,85
<b>% de copa ausente</b>	0
<b>Luz</b>	3
<b>CAP (cm)</b>	92
<b>Tallos</b>	1
<b>DAP (cm)</b>	29,2
<b>Latitud</b>	11°01'07.7"
<b>Longitud</b>	74°49'29.9"
<b>Uso del suelo:</b> Parque <b>Árbol de Calle:</b> Sí <b>Árbol Público:</b> Sí <b>Estatus:</b> Plantado <b>Muerto:</b> No <b>Conflicto de acera:</b> No <b>Conflicto de utilidad:</b> No <b>Plagas:</b> No	
	

**Fuente:** Elaboración propia.

## ANEXO F

*Planillas de toma de datos para inventario de arbolado urbano.*

Nombre: Jamilia Martínez P. Andrea Ramos D.  
 Fecha: 10/Nov/2021

Localidad => Riomar.

Id	Uso de suelo del árbol	Especie	Árbol de calle / Árbol no calle	Público / privado	Estatus	Muerto	Altura total del árbol (m)	Altura a parte superior viva	Altura a la base de la corona (m)	Ancho de copa (m)		% De copa ausente	Condición de la copa	Exposición de luz de la corona	CAP (cm)	DAP (cm)	Lat	Long	Conflicto de acera (cm)	Conflicto de utilidad	Plagas	
										N-S	E-O											
										A1	Parque											Necm
A2		Arbiva	NC				7	5	2	6	6	25	75	3	60	19,1			4			
A3		Arbiva	NC				8,5	5	2,7	7	8	35	65	3	45	14,3			4,8			
A4		Necm	AC				5,8	3,8	2,2	4	4,5	20	80	2	60	19,1			2,6			
A5		Arbiva	NC				6	4	2	5	5,2	40	60	4	50	15,9			NO			
A6		Arbiva	AC				6,8	4,5	2,7	6,5	7	30	70	3	60	19,1			NO			
A7		Hamon	AC				6,5	4	2,3	7	6,2	25	75	5	57	18,1			5,7			
A8		Mango	NC				5,5	3,8	1,9	6	4,5	20	80	2	48	15,2			6,5			
A9		Mango	NC				5	3	1,5	4	5,2	40	60	4	53	16,8			NO			
A10		Arbiva	NC				9	2,5	1,2	3	3,5	45	55	3	43	13,6			4,8			
A11		P. Coco	AC				7	2	1	4	4	30	70	4	50	15,9			6,5			
A12		P. Coco	AC				7,5	2,5	1,2	3,8	4,5	20	80	4	48	15,2			2,2			
A13		Necm					6,2	4	2,4	7	8	15	25	5	67	21,3			4,3			
A14		Ceiba	NC				8	5	2,3	9	7,5	30	70	2	45	13,2			NO			
A15		Ceiba	NC				8,9	4,5	2,8	8,2	7,4	25	65	4	81	25,7			NO			
A16		Arbiva	AC				7	5	2	5	8	25	75	3	69	21,9			NO			
A17		Pasta	AC				8	2,5	1,5	7,4	5,6	40	60	3	61	19,4			2,9			
A18		Arbiva	NC				8,5	4	2,9	10	7,3	30	70	4	75	23,6			NO			
A19		Necm	NC				6	3,5	2	5,6	4	25	75	3	68	21,6			5,7			
A20	Parque	U. Donada	AC	Público	Plantado	No	4,5	2,5	1,9	3,8	3	20	80	4	70	22,2			NO	NO	NO	NO

AC => Arbol Calle  
 NC => Arbol NO calle.  
 DAP =  $\frac{CAP}{3,14}$

Nombre: Jamilia Martínez P. Andrea Ramos D.  
 Fecha: 10/Nov/2021

Localidad => Nordeste centro histórico.

Id	Uso de suelo del árbol	Especie	Árbol de calle / Árbol no calle	Público / privado	Estatus	Muerto	Altura total del árbol (m)	Altura a parte superior viva	Altura a la base de la corona (m)	Ancho de copa (m)		% De copa ausente	Condición de la copa	Exposición de luz de la corona	CAP (cm)	DAP (cm)	Lat	Long	Conflicto de acera (cm)	Conflicto de utilidad	Plagas
										N-S	E-O										
										A51	Parque										
A52		Mango	AC				6	4	3	7	6	20	80	3	70	22,2			NO	SI	
A53		Mango	AC				8,4	6,5	3,5	7,5	6	35	65	4	82	26,7			15	SI	
A54		Mango	AC				9	8,2	3,9	9,1	8,7	25	75	5	79	25,7			17	SI	
A55		Mango	NC				10,8	7	3	11	9	40	60	4	75	23,8			9	NO	
A56		Mango	NC				7,7	5	2,8	6	8	30	70	3	80	25,8			NO	NO	
A57		Necm	AC				7	4,8	2,3	9	4,8	35	65	3	78	24,9			12	SI	
A58		Necm	NC				6,9	5	3	7	5,6	40	60	2	95	30,2			6,8	NO	
A59		Hamon	AC				8,4	6,5	2,8	7,9	6	25	75	4	47	14,9			2,3	SI	
A60		Cerezo	NC				4	2,7	1,4	3	3,2	20	80	3	59	18,7			14,1	SI	
A61		Necm	AC			No	7,2	5,1	2,9	8	7,1	15	85	4	60	19,1			NO	NO	
A62		P. Coco	AC		MP	No	2,2	0	0	0	0	0	0	0	49	15,6			6,2	SI	
A63		Hamon	NC		No	No	11,5	7	3,8	12	14	20	80	4	86	27,5			4,7	NO	
A64		P. Coco	AC				8	6	2,7	8,3	7,2	30	70	3	50	15,9			5,9	SI	
A65		Mango	NC				9	6	2,9	9,5	8,2	35	65	3	77	24,6			NO	NO	
A66		Matarraza	AC			No	12	9	5	14	11	40	60	2	99	31,5			10	SI	
A67		Mango	AC		MP	No	2	0	0	0	0	0	0	0	58	18,4			9,7	SI	
A68		Necm	AC		No	No	7,7	5	3,1	8	7	20	80	3	65	20,7			NO	SI	
A69		Matarraza	NC		No	No	10,5	8	4,4	13	12,5	30	70	2	104	34,1			2,6	NO	
A70	Parque	Hamon	NC	Público	Plantado	No	11,5	8,9	4,8	11	14	25	65	3	101	32,1			NO	SI	NO

AC => Arbol calle  
 NC => Arbol NO calle  
 MP => Muerto en Pie  
 DAP =  $\frac{CAP}{3,14}$

Fuente: Elaboración propia.

## ANEXO G

*Individuos arbóreos más significativos en cuanto a la remoción de PM10 en la ciudad de Barranquilla.*

No	ID Parcela	ID Árbol	Nombre de la especie	PM10 eliminado	Localidad	Latitud (Y)	Longitud (X)
340	182	1	Caucho Cartagenero ( <i>Ficus benghalensis</i> )	2584.70	Norte Centro Histórico	1708762	919341
152	94	2	Caucho Cartagenero ( <i>Ficus benghalensis</i> )	1189.40	Riomar	1709610	917659
241	145	1	Caucho Cartagenero ( <i>Ficus benghalensis</i> )	728.90	Norte Centro Histórico	1706617	922901
738	346	3	Camajon ( <i>Sterculia apetala</i> )	671.90	Suroriente	1702320	922081
877	405	1	Ceiba ( <i>Ceiba pentandra</i> )	657.70	Metropolitana	1700066	917956
485	236	1	Laurel ( <i>Ficus benjamina</i> )	589.70	Suroccidente	1705297	920472
242	145	2	Caucho Cartagenero ( <i>Ficus benghalensis</i> )	572.60	Norte Centro Histórico	1706617	922901
360	189	1	Ficus religiosa ( <i>Ficus religiosa</i> )	473.40	Norte Centro Histórico	1707675	920609
21	21	2	Caucho Cartagenero ( <i>Ficus benghalensis</i> )	463.50	Riomar	1711317	920484
338	181	1	Almendro ( <i>Terminalia catappa</i> )	461.70	Norte Centro Histórico	1705977	923141
792	367	3	Mango ( <i>Mangifera indica</i> )	446.10	Suroriente	1702632	920894
775	363	1	Mango ( <i>Mangifera indica</i> )	442.70	Suroriente	1701907	921904
151	94	1	Mataratón ( <i>Gliricidia sepium</i> )	423.60	Riomar	1709610	917659

20	21	1	Caucho Cartagenero ( <i>Ficus benghalensis</i> )	389.10	Riomar	1711317	920484
1050	530	5	Laurel ( <i>Ficus benjamina</i> )	384.40	Metropolitana	1701575	920947
879	409	1	Mango ( <i>Mangifera indica</i> )	372.40	Metropolitana	1702017	917602
953	464	2	Mango ( <i>Mangifera indica</i> )	371.90	Metropolitana	1703719	920577
1030	514	1	Laurel ( <i>Ficus benjamina</i> )	367.80	Metropolitana	1702771	920634
1029	512	1	Laurel ( <i>Ficus benjamina</i> )	367.10	Metropolitana	1699908	918025
117	74	1	Almendro ( <i>Terminalia catappa</i> )	365.60	Riomar	1709913	919230

**Nota.** En orden decreciente, los 20 individuos arbóreos más representativos en la ciudad de Barranquilla. Latitud y longitud en parámetros geodésicos EPSG: 21897. Adaptado del segundo informe del software i-Tree Eco v6. **Fuente:** Elaboración propia.

## ANEXO H

*Individuos arbóreos más significativos en cuanto a la remoción de PM2.5 en la ciudad de Barranquilla.*

No	ID Parcela	ID Árbol	Nombre de la especie	PM2.5 eliminado	Localidad	Latitud (Y)	Longitud (X)
340	182	1	Caucho Cartagenero ( <i>Ficus benghalensis</i> )	4.8	Norte Centro Histórico	1708762	919341
152	94	2	Caucho Cartagenero ( <i>Ficus benghalensis</i> )	2.2	Riomar	1709610	917659
241	145	1	Caucho Cartagenero ( <i>Ficus benghalensis</i> )	1.4	Norte Centro Histórico	1706617	922901
738	346	3	Camajon ( <i>Sterculia apetala</i> )	1.3	Suroriente	1702320	922081

877	405	1	Ceiba ( <i>Ceiba pentandra</i> )	1.2	Metropolitana	1700066	917956
242	145	2	Caucho Cartagenero ( <i>Ficus benghalensis</i> )	1.1	Norte Centro Histórico	1706617	922901
485	236	1	Laurel ( <i>Ficus benjamina</i> )	1.1	Suroccidente	1705297	920472
21	21	2	Caucho Cartagenero ( <i>Ficus benghalensis</i> )	0.9	Riomar	1711317	920484
338	181	1	Almendro ( <i>Terminalia catappa</i> )	0.9	Norte Centro Histórico	1705977	923141
360	189	1	Ficus religiosa ( <i>Ficus religiosa</i> )	0.9	Norte Centro Histórico	1707675	920609

---

**Nota.** En orden decreciente, 10 individuos arbóreos más representativos en la ciudad de

Barranquilla. **Fuente:** Elaboración propia.