

<https://doi.org/10.14483/2256201X.22550>

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

ISSN 0120-0739 • e-ISSN 2256-201X

Descripción de la remoción de material particulado por una barrera arbórea en un entorno urbano

Description of Particulate Matter Removal by a Tree Barrier in an Urban Environment

Carlos Vicente Rey Guerra ^a, Laura Julieth Monroy Rodríguez ^b, Luisa Fernanda Lozano Benavides ^a,
Omar Ramírez ^b, Miguel Quirama-Aguilar ^a

a Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis, Bogotá, Colombia 

b Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia 

Recibido: 3 de agosto de 2024

Aceptado: 5 de septiembre de 2024

Citación: Rey Guerra, C. V., Monroy Rodríguez, L. J., Lozano Benavides, L. F., Ramírez, O., & Quirama-Aguilar, M. (2025). Descripción de la remoción de material particulado por una barrera arbórea en un entorno urbano. *Colombia Forestal*, 28(1), e22550. <https://doi.org/10.14483/2256201X.22550>

Highlights

- Una cobertura arbórea en distribución de barrera puede remover material particulado de la atmósfera.
 - La barrera modelo evaluada removi6 61.1 kg de material particulado.
 - La especie y ubicaci6n de la barrera son factores determinantes de remoci6n de material particulado.
 - i-Tree es una potente herramienta para cuantificar los beneficios del arbolado urbano.
 - El 6xito del an6lisis se basa en la rigurosidad del inventario de 6rboles.
-

Resumen

El crecimiento y la densificaci6n de las ciudades plantean importantes retos relacionados con la contaminaci6n del aire. En este estudio se analiz6 la capacidad de una barrera arb6rea modelo cercana a dos v6as con alto tr6fico vehicular para reducir la concentraci6n de material particulado suspendido (PM₁₀ y PM_{2.5}) en un entorno urbano. Se realiz6 el inventario forestal de la barrera y, mediante el *software* i-Tree Eco, se estim6 su capacidad de remoci6n de PM, obteniendo una remoci6n anual de 61.1 kg, de los cuales 15.4 kg corresponden a PM_{2.5} y 45.7 kg a PM₁₀. En este caso espec6fico, se identific6 que las especies ex6ticas presentan una mayor remoci6n que las nativas. Estos hallazgos son importantes para determinar los

beneficios del arbolado urbano en materia de calidad del aire y para generar lineamientos de diseño de barreras arbóreas que amortigüen la exposición poblacional a PM urbano.

Palabras clave: calidad del aire, PM10, PM2.5, arbolado urbano, i-Tree, barrera vegetal

Abstract

The growth and densification of cities poses major challenges associated with air pollution and public health. This study examines the capacity of a model tree barrier located near two roads with heavy traffic to reduce exposure to particulate matter (PM₁₀ and PM_{2.5}). A forest inventory of the barrier was conducted and, using the i-Tree Eco software, its PM removal capacity was estimated, showing an annual removal of 61.1 kg, out of which 15.4 kg correspond to PM_{2.5} and 45.7 kg to PM₁₀. In this specific case, exotic species exhibited a greater removal than native ones. These findings are significant in determining the benefits of urban trees concerning air quality, as well as in generating guidelines for the design of tree barriers that mitigate the population's exposure to PM.

Keywords: air quality, PM10, PM2.5, urban trees, i-Tree, tree barrier

INTRODUCCIÓN

La contaminación del aire es un tema de interés público en la mayoría de grandes ciudades alrededor del mundo, así como los costos asociados a la prevención, el control y la atención de enfermedades generadas por contaminantes atmosféricos (Nowak *et al.*, 2006; Brusseau *et al.*, 2019). Se estima que, cada año, siete millones de personas en el mundo mueren por enfermedades asociadas a contaminantes atmosféricos (UNEP, 2021), y, según cifras de la Organización Mundial de la Salud (OMS), una de cada nueve muertes en el mundo es ocasionada por contaminación o mala calidad del aire (OMS, 2018). Así, el monitoreo y control de la contaminación atmosférica ha tomado gran relevancia a nivel mundial. Por *contaminación atmosférica* se entiende el exceso de contaminantes criterio (CO, SOx, NOx, O₃, partículas) en el aire, por encima de las recomendaciones de la OMS. Gran parte de las investigaciones científicas se han centrado en el material particulado (PM, por sus siglas en inglés) inferior a 10 micras (PM₁₀) y a 2.5 micras (PM_{2.5}), ya que estos contaminantes se asocian a efectos en la salud que incluyen mortalidad prematura por inflamación pulmonar y alteración en la función cardiaca (Nowak *et al.*, 2013; Pope *et al.*, 2015; Silva *et al.*, 2022). Además, desde el 2013, el PM es reconocido como agente cancerígeno por la Agencia Internacional de Investigación del Cáncer, perteneciente a la OMS (IARC, 2013).

En el contexto latinoamericano, las cifras muestran que alrededor de 320 000 muertes prematuras están asociadas a la contaminación atmosférica, y que esto representa un 3.4 % del PIB de la región (OMS, 2016; World Bank, 2021). Por su parte, Bogotá, la capital de Colombia, es una de las ciudades latinoamericanas más afectadas por la mala calidad del aire, especialmente por las concentraciones de PM_{2.5}. Bogotá está dividida en 19 localidades urbanas, y estas, a su vez, en cuatro grandes zonas (norte, centro-oriente, suroccidente y sur). En la zona suroccidental de la ciudad, especialmente en las localidades de Kennedy y Tunjuelito, se excede con mayor frecuencia el estándar nacional para este contaminante (37 µg.m⁻³ en 24 h) (IDEAM, 2018; MADS, 2017). Se estima que aproximadamente el 8 % de las muertes prematuras que ocurren en esta ciudad están asociadas a la calidad del aire, lo que en 2021 representó aproximadamente 3400 muertes atribuidas a la exposición a largo plazo a PM_{2.5} (Farrow *et al.*, 2022).

El arbolado urbano es uno de los principales elementos del paisaje y ofrece múltiples beneficios ambientales. Los árboles tienen la capacidad de remover partículas de la atmósfera al capturarlas en la superficie de sus hojas (Hernández *et al.*, 2021; Arroyave *et al.*, 2019; Grote *et al.*, 2016; Nowak *et al.*, 2013). Morakinyo *et al.* (2016) identificaron que la adherencia a la vegetación puede generar una reducción hasta del 80 % en la concentración de $PM_{2.5}$. No obstante, los árboles también pueden alterar la calidad del aire según su estructura, ya que pueden disminuir la dispersión de contaminantes a través del viento (Xing *et al.*, 2019; Xing & Brimblecombe, 2019; Chen *et al.*, 2016). Miao *et al.* (2022) identificaron que dicho efecto depende de la relación entre el ancho de la vía y la altura de los edificios adyacentes, determinando que la concentración de $PM_{2.5}$ disminuye en vías estrechas, mientras que la concentración de PM_{10} disminuye sobre todo en vías con perfiles anchos.

En Colombia, Escobedo *et al.* (2015) identificaron que el arbolado urbano en Bogotá tiene la capacidad de remover en promedio 171 g.m^{-2} de PM al año –agregando la remoción de $PM_{2.5}$ y PM_{10} . Por otra parte, Arroyave *et al.* (2019) encontraron que el bosque urbano del Valle de Aburrá, que comprende 13 ciudades incluyendo Medellín, tiene la capacidad de remover $32.1 \text{ ton.año}^{-1}$ de $PM_{2.5}$ y $60.4 \text{ ton.año}^{-1}$ de PM_{10} . Cardona y Bermúdez (2019) identificaron las contribuciones del arbolado urbano y su capacidad de retención de PM, considerando las características y atributos particulares que permiten distinguir a una especie como adecuada o efectiva en los esfuerzos de planeación urbana para mejorar las condiciones ambientales locales.

En vista de la problemática alrededor de la calidad del aire y la posibilidad de estudiar el arbolado urbano, es necesario analizar las variables relacionadas y estimar la capacidad de los bosques urbanos en Bogotá para regular la calidad del aire, particularmente a través de barreras vivas. En este sentido, el presente estudio analiza una barrera arbórea modelo de alta densidad ubicada cerca de vías de la red primaria, con el objetivo de estimar su capacidad para remover el PM suspendido en un entorno urbano. A partir de un modelado con el *software* i-Tree Eco, se logra estimar a cabalidad la potencial contribución de una barrera arbórea modelo en la remoción de $PM_{2.5}$ y PM_{10} . Paralelamente, se expone la incidencia de las barreras vegetales en la calidad del aire y, en consecuencia, su aporte a la descontaminación de sectores con altos índices de contaminantes dentro de la ciudad.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para estimar la remoción de contaminantes de una cobertura vegetal arbórea urbana en disposición de barrera, se empleó el siguiente esquema: i) se seleccionó una barrera modelo dentro de la ciudad de Bogotá; ii) como parte del trabajo de campo, se realizó el inventario de árboles que componen dicha barrera; iii) se introdujo el inventario en i-Tree Eco, con la finalidad de determinar sus beneficios ambientales; iv) en paralelo, se realizó un análisis de datos de calidad del aire de la ciudad para identificar los beneficios potenciales de la barrera modelo. A continuación, se describe cada parte del proceso metodológico con mayor especificidad.

Área de estudio

La ciudad de Bogotá está conformada por 19 localidades urbanas y una rural. Dentro de su propuesta de estructura ecológica principal, la ciudad cuenta con 3978.72 ha entre parques metropolitanos, parques zonales

y paisajes sostenibles (SDP, 2021). Estas zonas son de gran importancia para los ciudadanos, pues allí pueden realizar actividades de recreación activa y pasiva que contribuyen a su bienestar. Para seleccionar la barrera vegetal modelo, se consideraron los siguientes criterios: i) parque o zona verde con presencia de barreras de vegetación conformadas por arbolado urbano público; ii) cercanía a una fuente de contaminación de PM; iii) dirección del viento de la fuente hacia la barrera; iv) alta densidad arbórea, evitando árboles de vía o árboles establecidos linealmente.

A partir de estos criterios, se seleccionó una barrera real dentro del Parque Simón Bolívar (PSB), ubicado en la localidad de Teusaquillo. Este parque representa la cobertura vegetal continua de mayor extensión dentro de la zona urbana de Bogotá, y, debido a su ubicación en el centro-occidente de la ciudad, donde las concentraciones de PM son mayores que en el norte (que cuenta con otras coberturas vegetales extensas), es un lugar con condiciones adecuadas para estudiar el comportamiento de remoción de contaminantes de una barrera modelo en zonas urbanas. Adicionalmente, es relevante resaltar que el PSB está rodeado de barrios residenciales con edificaciones de media y baja altura, y que limita con la Avenida La Esperanza en el norte y con la Calle 63 en el sur. Por el oriente, limita con la Carrera 48 y, por el occidente, con la Carrera 68. Así mismo, el PSB es cercano a corredores viales de tráfico pesado de la ciudad, como lo son la Avenida Boyacá y la Avenida Calle 26 (Figura 1).

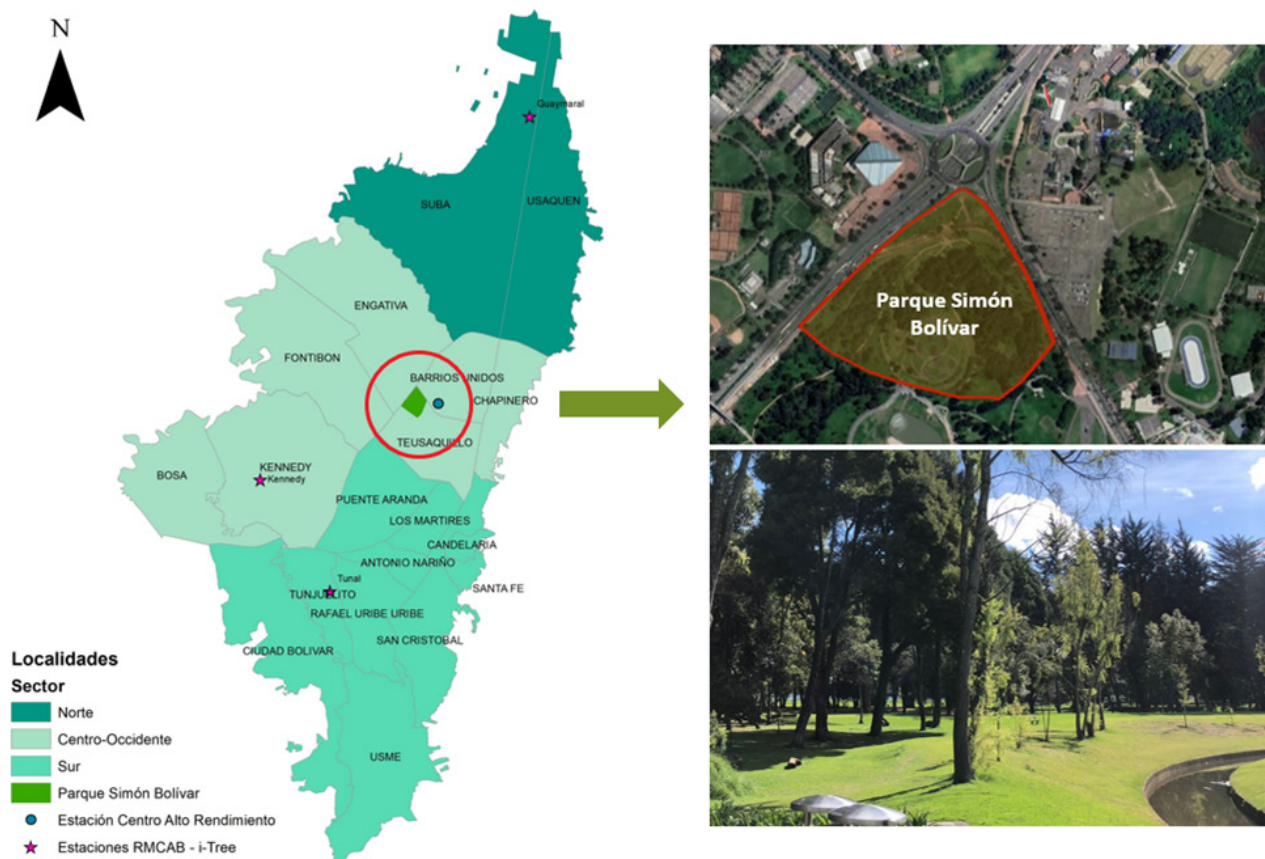


Figura 1. Ubicación del Parque Simón Bolívar en la ciudad de Bogotá y de la barrera modelo dentro del parque

La barrera modelo usada en el estudio parte de una disposición de árboles que se encuentra en la entrada noroccidental del PSB, cerca de la intersección entre la Calle 63 y la Carrera 68. Allí se presenta una barrera arbórea que resguarda la zona interior del parque de las vías de tráfico cercanas y de la contaminación atmosférica y auditiva asociada. La barrera ocupa un área de 1.33 ha y está conformada en su mayoría por árboles adultos de gran tamaño (Figura 2).

Modelación de la remoción de PM

Se realizaron tres jornadas dedicadas al levantamiento del inventario forestal de la barrera modelo (Anexo 1). Para cada árbol, se determinaron las siguientes características: i) especie, ii) diámetro a la altura del pecho (DAP), iii) altura total, iv) ancho de la copa y v) alto de la copa. Se utilizó el *software* de libre acceso i-Tree Eco v6.32.0, desarrollado por el Servicio Forestal de los Estados Unidos (USFS, por sus siglas en inglés), para estimar la contribución del arbolado que conforma la barrera en la remoción de $PM_{2.5}$ y PM_{10} .



Figura 2. Parcelas sobre las que se realizó el inventario forestal.

Como insumo del modelo, para modelar los beneficios del arbolado, se utilizó la información de concentración de PM para el año 2019 de la estación de Kennedy, parte de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB). Se consideró esta estación y esta fecha porque eran las únicas con información disponible para i-Tree 6.32.0 al momento de realizar el estudio. Es imperativo aclarar que, aunque se trata de un *software* de uso libre, i-Tree no permite que el usuario ingrese datos de calidad del aire; solo permite los que han sido precargados por su ente administrador en cada actualización. Esto implicó un error sistemático al evaluar la remoción que logra la barrera real, pues la estación se encontraba a una distancia considerable. Es necesario aclarar que no se encontró una barrera real cerca de la estación Kennedy que tuviera condiciones similares a la utilizada. Así, para evitar el error mencionado, el análisis de datos se desarrolló de tal forma que los resultados en cuanto a calidad del aire fueran representativos únicamente para una barrera modelo.

Análisis de la información

Para analizar la información recopilada sobre la barrera arbórea modelo, se utilizaron algunos indicadores de diversidad como la riqueza y la abundancia, así como estadísticas descriptivas sobre el estado de la copa del arbolado que conforma la barrera.

Por su parte, el tratamiento de los datos de calidad del aire constó de tres etapas. Primero, se calculó la remoción anual media y total de $PM_{2.5}$ y PM_{10} para cada especie identificada. En segundo lugar, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para identificar diferencias entre las mediciones de la estación del Centro de Alto Rendimiento (CDAR), en la localidad de Barrios Unidos y más cercana a la barrera modelo, y la estación de Kennedy, ubicada en la localidad con el mismo nombre. Esto, con el objetivo de cuantificar la incertidumbre de los últimos datos por sobre los primeros, que no estaban disponibles en i-Tree 6.32.0. Finalmente, tomando como referencia la norma nacional que regula la calidad del aire ([MADS, 2017](#)), que establece que las concentraciones máximas de $PM_{2.5}$ y PM_{10} permitidas en 24 h son de 37 y 75 $\mu g.m^{-3}$ respectivamente, se realizó un conteo en los datos anuales para determinar el número de días en que se sobrepasó el límite establecido para cada parámetro en cada una de las estaciones en 2019. Este análisis de excedencias resultó de la aplicación de medias móviles de 24 h a datos horarios, a fin de comparar cada dato con la norma diaria. Este estudio permitió estimar si el uso de una estación lejana a la barrera modelo supone una subestimación o una sobreestimación de los datos de remoción de PM.

RESULTADOS

Inventario forestal

A partir de los datos disponibles en el Sistema de Información para la Gestión del Arbolado Urbano (SIGAU) de Bogotá, se identificaron los árboles que conformaban la barrera y se dividió el área estudio en dos parcelas con aproximadamente la misma cantidad de árboles ([Figura 2](#)). Con el apoyo de dos cuadrillas, se realizó el levantamiento de un inventario de 189 individuos arbóreos. El [Anexo 1](#) detalla la información de cada individuo arbóreo, incluyendo su altura total, DAP, estado de la copa y especie.

Como parte del análisis del servicio ecosistémico de remoción de contaminantes atmosféricos, se caracterizó la barrera en términos de la diversidad de especies que la conforman y su origen, así como el estado de la copa de los individuos. Esto, con el fin de asociar la influencia de estas variables a la capacidad de la barrera para remover PM. Se identificaron 18 especies diferentes, de las cuales cinco son exóticas y 13 nativas.

Proporción de especies

Para determinar la diversidad de la barrera para las especies nativas y exóticas, se calculó su fracción y abundancia (Figura 3a). La *fracción* hace referencia al número de especies, y la *abundancia* tiene en cuenta el número de individuos de cada especie. Mediante este análisis, se determinó que hay mayor fracción de especies nativas (72 %) en comparación con las especies exóticas (28 %). Sin embargo, hay una mayor abundancia de especies exóticas (63 %) con respecto a las nativas (37 %), de manera que las primeras son dominantes en la barrera arbórea.

La dominancia de unas pocas especies dentro de las barreras puede analizarse desde diferentes perspectivas. Por una parte, tener una barrera homogénea conformada por individuos cuyas características promuevan la remoción de material particulado puede ser beneficioso para facilitar el diseño de zonas verdes que principalmente favorezca la calidad del aire. Por otra parte, una barrera con estas características limita la oferta de otros servicios ecosistémicos, como la provisión de hábitat y alimento para otras especies y la belleza escénica, lo cual puede resultar contraproducente.

Estado de la copa

Para complementar la caracterización de la barrera, se identificó el estado de la copa de los individuos según su origen (Figura 3b). El estado de la copa se clasificó en las siguientes categorías: excelente, bueno, medio, crítico y muerto. Estas categorías están asociadas al porcentaje de copa faltante que se reportó durante el levantamiento del inventario forestal.

El estado de la copa es fundamental para la provisión de servicios ecosistémicos, especialmente para la remoción de contaminantes atmosféricos, ya que estos se depositan principalmente en las hojas. Por ello, entre mejor estén la densidad y la salud de la copa y su área foliar, mayor será la capacidad para remover PM. A partir de este análisis, se identificó que las especies exóticas tienen, en su mayoría, un mejor estado de la copa; un 31 % de los individuos presentó copas en estado bueno o excelente, en comparación con un 24 % para los individuos nativos.

Remoción de material particulado

Al modelar los beneficios ambientales que ofrecen los árboles con el software i-Tree Eco, se determinó que la barrera modelo contribuye significativamente en cuanto a la remoción de contaminantes atmosféricos. El Anexo 1 presenta la base de datos con los beneficios de remoción de PM para cada individuo de la barrera.

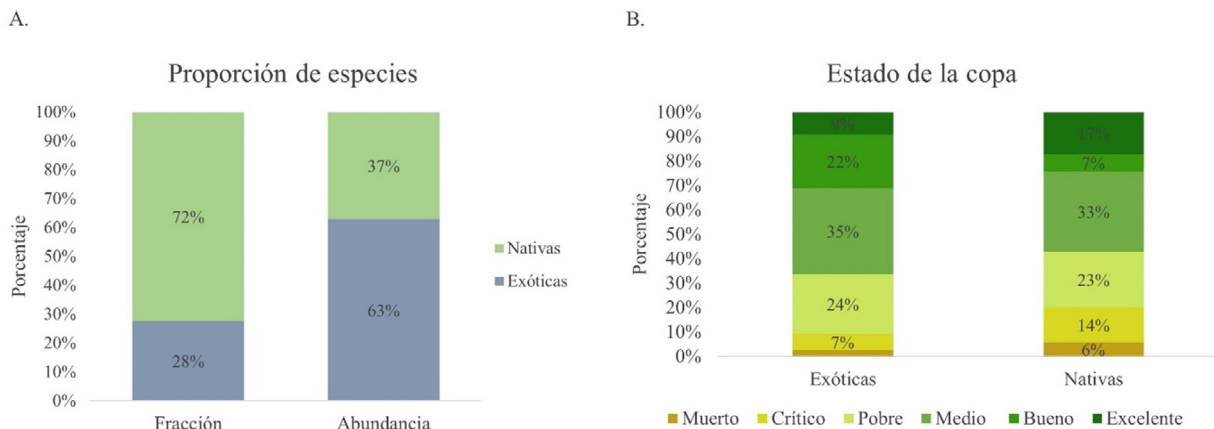


Figura 3. Proporción de especies de la barrera arbórea según su origen (a) y estado de la copa de los individuos de la barrera arbórea según el origen de las especies (b)

Remoción media de material particulado

La remoción media de PM por especie evidenció que los individuos de la barrera de especies exóticas tienen un mayor potencial de remoción. De las cinco primeras especies con mayor potencial, cuatro de ellas son exóticas y una nativa. Se destacan particularmente la Acacia (*Acacia melanoxylon*) y el Ciprés (*Cupressus lusitánica*), las cuales son capaces de remover más de 120 g. año⁻¹ de PM_{2.5} y más de 370 g. año⁻¹ de PM₁₀. Dentro de las especies nativas, se destaca el Roble Andino (*Quercus humboldtii*), que remueve 53.6 g. año⁻¹ de PM_{2.5} y 159 g. año⁻¹ de PM₁₀, y el Guayacán de Manizales (*Lafoensia acuminata*), que remueve 37.5 g. año⁻¹ de PM_{2.5} y 111 g. año⁻¹ de PM₁₀ (Tabla 1).

Remoción total de material particulado

En total, la barrera tiene la capacidad de remover 61.1 kg de PM al año, de los cuales 15.4 kg corresponden a PM_{2.5} y 45.7 kg a PM₁₀. Las especies exóticas contribuyen en mayor medida (89 %) por su dominancia dentro de la barrera y por sus características físicas, pues tienen mayor tamaño y área foliar, lo que favorece su desempeño. Entre las especies exóticas, los cipreses reportan el 48 % de la remoción de PM_{2.5} y PM₁₀, siendo la especie que más contribuye. En cuanto a las especies nativas, que remueven el 11 % del PM, la especie que más contribuye es el Roble Andino, con el 5.2 % de la remoción de PM_{2.5} y PM₁₀ (Tabla 2).

Estaciones de calidad del aire

Teniendo en cuenta que el modelo de i-Tree Eco utiliza información de entrada de la estación de calidad del aire de Kennedy, se realizó una comparación entre sus mediciones y las de la estación del CDAR, la cual, como se mencionó anteriormente, está ubicada en la localidad de Barrios Unidos, muy cerca de la barrera modelo.

Tabla 1. Remoción promedio de $PM_{2.5}$ y PM_{10} por especie

Especie	Origen	$PM_{2.5}$ (g. año ⁻¹)	PM_{10} (g. año ⁻¹)
<i>Acacia melanoxylon</i>	Exótica	129.5	383.9
<i>Cupressus lusitanica</i>	Exótica	127.0	376.7
<i>Pittosporum undulatum</i>	Exótica	56.8	168.4
<i>Quercus humboldtii</i>	Nativa	53.6	159.0
<i>Fraxinus chinensis</i>	Exótica	48.1	142.7
<i>Lafoensia acuminata</i>	Nativa	37.5	111.2
<i>Myrsine coriacea</i>	Nativa	20.6	61.1
<i>Alnus acuminata</i>	Nativa	20.4	60.4
<i>Senna viarum</i>	Nativa	14.5	43
<i>Salix humboldtiana</i>	Nativa	14.1	41.9
<i>Hieronyma alchorneoides</i>	Nativa	11.0	32.6
<i>Erythrina rubrinervia</i>	Nativa	10.5	31.3
<i>Myrsine guianensis</i>	Nativa	10.4	30.9
<i>Myrcianthes fragrans</i>	Nativa	10.3	30.7
<i>Ledenbergia seguierioides</i>	Nativa	9.1	27.1
<i>Prunus serotina</i>	Nativa	8.7	25.9
<i>Calliandra trinervia</i>	Nativa	4.5	13.2
<i>Pyracantha coccinea</i>	Exótica	3.5	10.4

Esto se hizo con el objetivo de validar si las mediciones de la estación de Kennedy reflejaban los niveles de contaminación asociada a PM en el área de estudio. La localidad de Kennedy es una de las zonas de la ciudad donde se reporta mala calidad del aire (SDA, 2024), por lo que es importante validar cuánto varía el comportamiento del PM en las dos estaciones.

En la Figura 4 se muestra el comportamiento de las concentraciones diarias de $PM_{2.5}$ y PM_{10} para el año 2019 en las estaciones Kennedy y CDAR. Se puede observar que las mediciones en la estación de Kennedy están por encima de las concentraciones de la estación CDAR durante todo el año. Además, en el análisis de excedencias se identificó que la estación de Kennedy sobrepasó la norma 11 días al año para PM_{10} y 45 días al año para $PM_{2.5}$, a diferencia de la estación CDAR, que no excedió el límite para $PM_{2.5}$ y solo sobrepasó el límite de PM_{10} un día al año.

De manera complementaria, se realizó una prueba ANOVA para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas entre las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ de las estaciones Kennedy y CDAR (Tabla 3). Mediante esta prueba, se identificó que, para PM_{10} (valor $p < 0.01$) y $PM_{2.5}$ (valor $p < 0.01$), las concentraciones de la estación de Kennedy son estadísticamente mayores.

Tabla 2. Remoción total de PM_{2.5} y PM₁₀ por especie

Especie	Origen	PM _{2.5} (g. año ⁻¹)	PM ₁₀ (g. año ⁻¹)
<i>Quercus humboldtii</i>	Nativas	804.4	2385.2
<i>Alnus acuminata</i>		224.0	664.1
<i>Lafoensia acuminata</i>		150.0	444.7
<i>Prunus serotina</i>		130.7	387.9
<i>Salix humboldtiana</i>		98.8	293.0
<i>Myrcianthes fragrans</i>		72.4	214.6
<i>Myrsine guianensis</i>		31.3	92.7
<i>Hieronyma alchorneoides</i>		22.0	65.1
<i>Myrsine coriacea</i>		20.6	61.1
<i>Senna viarum</i>		14.5	43.0
<i>Erythrina rubrinervia</i>		10.5	31.3
<i>Ledenbergia seguierioides</i>		9.1	27.1
<i>Calliandra trinervia</i>		8.9	26.3
Subtotal		1597.2	4736.1
<i>Cupressus lusitanica</i>	Exóticas	7495	22 222.7
<i>Acacia melanoxylon</i>		5696.8	16 891.7
<i>Pittosporum undulatum</i>		567.6	1683.5
<i>Fraxinus chinensis</i>		48.1	142.7
<i>Pyracantha coccinea</i>		17.5	51.8
Subtotal		13 825.0	40 992.4
Total		15 422.2 (15.4 Kg. año ⁻¹)	45 728.5 (45.7 Kg. año ⁻¹)

DISCUSIÓN

Rasgos funcionales

Los rasgos funcionales de las plantas representan sus diferentes características morfológicas y fisiológicas, permiten comprender los mecanismos que utilizan las especies para adaptarse a un determinado ambiente y brindan una noción de los servicios que proveen (Díaz *et al.*, 2007; Garnier *et al.*, 2015; Rodríguez-Alarcón *et al.*, 2020). Ciertos rasgos funcionales asociados al dosel del arbolado urbano (*i.e.*, tamaño, densidad y forma de las copas) y a su estructura foliar (*i.e.*, forma, fisiología y superficie) son determinantes en su capacidad de remover contaminantes atmosféricos (Grote *et al.*, 2016; Nowak *et al.*, 2006).

Diferentes estudios han determinado que las especies con hojas amplias, ásperas, rugosas y con pubescencias tienen mayor potencial para remover PM y evitar que este se resuspenda (Arroyave *et al.*, 2019; Weerakkody *et al.*, 2018). Arroyave *et al.* (2019) identificaron que, para optimizar la remoción de contaminantes atmosféricos, se debe garantizar el uso de especies con copas densas, perennifolias y con una gran área foliar que, además, conformen barreras densas y porosas para permitir la dispersión vertical de los contaminantes. Estas recomendaciones se alinean con los resultados de este estudio, mostrando que las especies con mayor área foliar contribuyen en mayor medida a la remoción de PM. Entre las especies exóticas, el Ciprés (*Cupressus lusitanica*) y

la Acacia (*Acacia melanoxylon*) presentaron, en promedio, índices de área foliar (IAF) de 6.55 y 8.13 respectivamente, más del doble del IAF de las especies nativas que reportaron mayor remoción, como el Guayacán de Manizales (*Lafoensia acuminata*) y el Roble Andino (*Quecus humboldtii*) (2.68 y 3.77).

No obstante, las especies nativas cobran relevancia con respecto a las exóticas porque pueden adaptarse mejor al ambiente de la ciudad y ofrecer más co-beneficios. Evaluando ciertos rasgos funcionales, [Moreno Barreto y Rubiano Calderón \(2020\)](#) estudiaron seis especies en Bogotá y determinaron sus estrategias de adaptación. Identificaron que el Roble Andino tiene una estrategia de conservación de recursos, por lo que presenta un crecimiento lento y promueve el almacenamiento de carbono en la madera, siendo una especie resiliente a las condiciones urbanas ([de la Riva et al., 2014](#)). Por su parte, el Guayacán de Manizales es una especie con mayor plasticidad en su adaptación, presentando una estrategia intermedia entre la adquisición y la conservación de recursos, rasgos que la hacen importante para la provisión de servicios ecosistémicos ([Lavorel, 2013](#)).

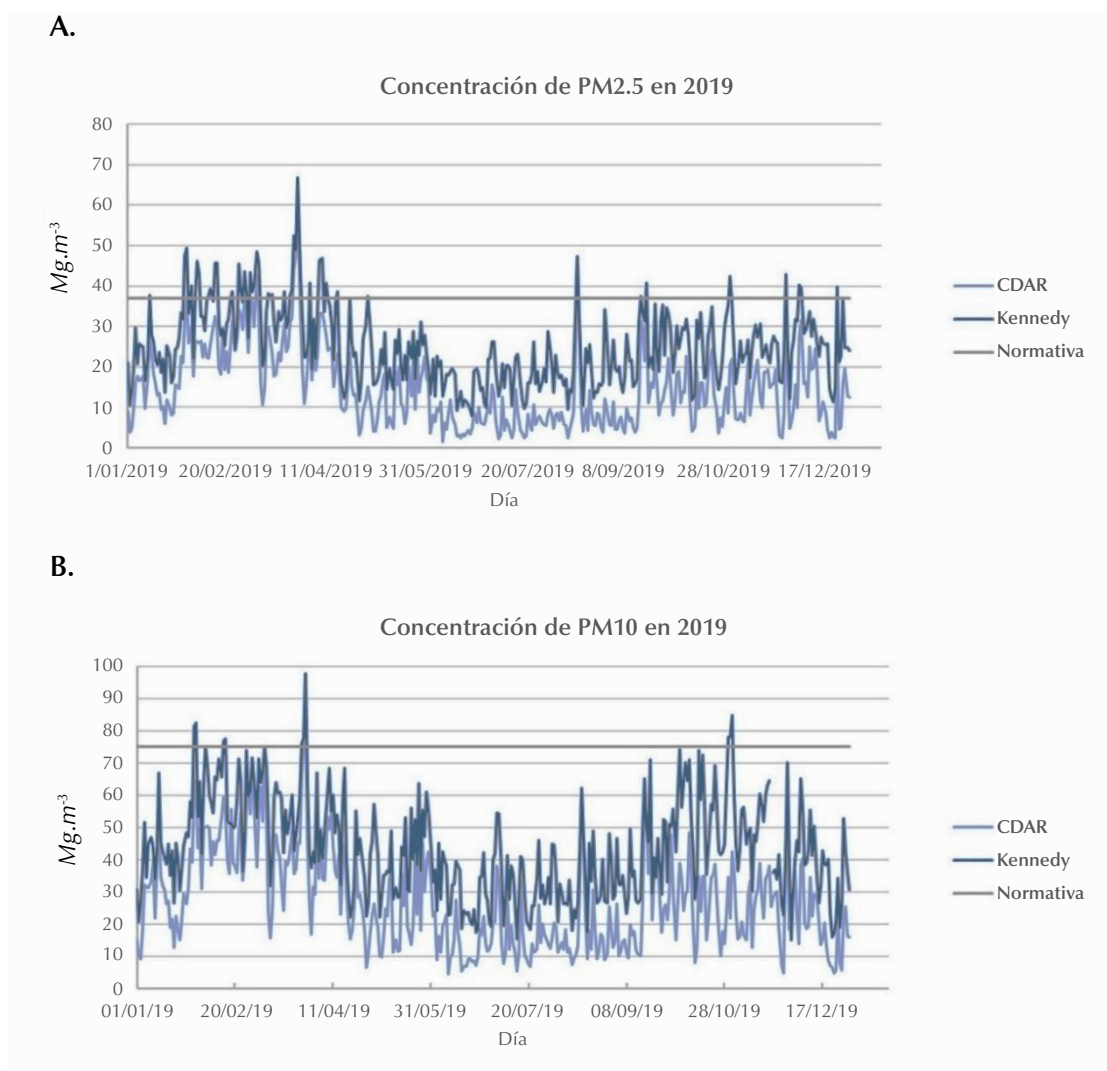


Figura 4. Concentración de PM_{2.5} (a) y PM₁₀ (b) en las estaciones de CDAR y Kennedy en 2019

Tabla 3. ANOVA para $PM_{2.5}$ y PM_{10}

$PM_{2.5}$						
Fuente de error	SC	gl	MC	F	P-value	F crit
Entre grupos	17 410.39	1	17 410.38562	201.0215	1.8 e-40	3.854264
Dentro de los grupos	63051.76	728	86.60955784			
Total	80 462.14	729				
PM_{10}						
Fuente de error	SC	gl	MC	F	P-value	F crit
Entre grupos	46 945.2	1	46945.2	221.5402	6.4 e-44	3.854317
Dentro de los grupos	15 3630.2	725	211.9038			
Total	200 575.5	726				

Cabe resaltar que, según el SIGAU, las especies exóticas han sido ampliamente utilizadas en el espacio público de Bogotá, ya que históricamente se ha dado prioridad a la tasa de crecimiento por encima de otras funciones. Es importante tener presente este contexto, pues, con el tiempo y con lineamientos provenientes de gobiernos locales que promuevan el uso de especies nativas para generar mayores co-beneficios, las especies nativas podrían tener una mayor contribución en el futuro.

Calidad del aire y vientos

Para interpretar los resultados, es necesario tener en cuenta las diferencias observadas en las pruebas estadísticas y de incumplimiento de la norma, pues los valores de remoción de contaminantes dependen en gran medida de las concentraciones que se utilicen en el modelo. Así mismo, en este caso particular, se deben tener en cuenta las diferencias entre la ubicación de la barrera real y la de la estación de Kennedy. La distribución de la contaminación del aire en Bogotá no es homogénea, según se presenta en los informes anuales de calidad del aire (SDA, 2023). Por lo tanto, al hacer uso de los datos de la estación de Kennedy y no de la estación CDAR, junto con los resultados del análisis de excedencias y el ANOVA, se incurre en una sobreestimación de la cantidad de PM removido por la barrera real. Sin embargo, dado que el estudio considera una barrera modelo, se puede afirmar que los árboles allí presentes están en capacidad de remover PM cuando se exponen a concentraciones altas como las presentadas por la estación Kennedy. Lo anterior supone una oportunidad para incrementar el uso de barreras arbóreas en zonas de alta contaminación del aire. Para precisar la remoción de barreras reales, es imperativo contar con datos *in situ* de meteorología y calidad del aire.

Finalmente, a partir de los datos de la estación CDAR, se obtuvo una rosa de vientos acumulada con los datos de 2019 (Figura 5). En ella, inicialmente se buscaba una dirección predominante del viento, a fin de confirmar que los vientos que llegan a dicha estación CDAR provienen de la estación Kennedy y, de esta manera, asociar la barrera modelo a resultados más ligados a la realidad. Sin embargo, se evidenció que, más allá de un mayor

porcentaje de vientos desde el noroeste, no hay una tendencia marcada en los vientos, por lo que la estación no ofrece una tendencia marcada en todo el año. Por ello, se reafirma que los resultados de remoción de PM son representativos para una barrera modelo y no para una real.

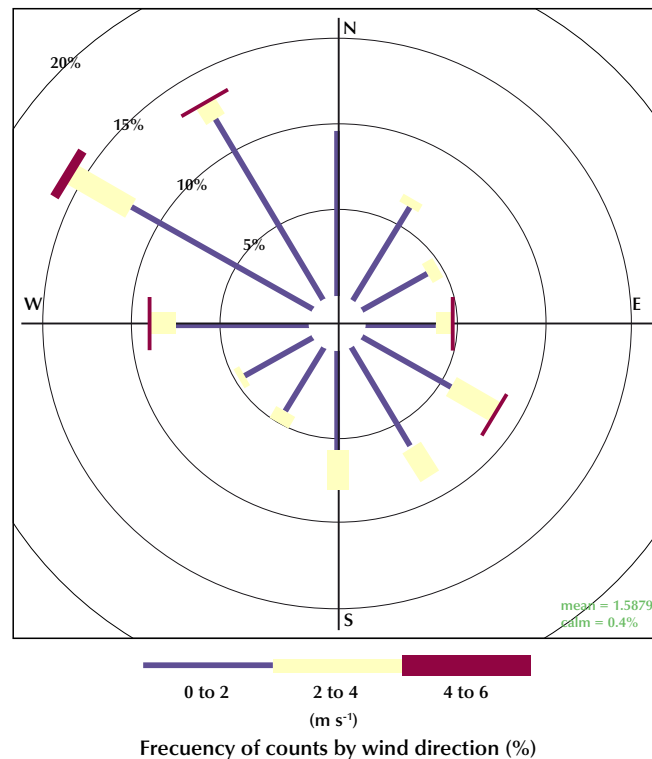


Figura 5. Rosa de vientos de la estación de CDAR con datos acumulados de 2019

Alternativas

Los modelos de dinámica de fluidos computacional (CFD) han permitido identificar la relación entre la dispersión del PM y su interacción con las coberturas vegetales. Estos análisis han examinado los efectos de los árboles en la calidad del aire urbano, mostrando que las concentraciones de contaminantes dependen de la dirección del viento y la geometría del entorno. También han revelado incrementos moderados en las concentraciones de contaminantes a nivel de peatones, así como reducciones significativas en determinadas condiciones ([Santiago et al., 2016](#); [Selmi et al., 2016](#)).

Los efectos de los árboles en la calidad del aire dependen de la interacción con la geometría y las condiciones meteorológicas. Se destaca que los efectos aerodinámicos de los árboles pueden ser más significativos que la deposición. Aunque se han propuesto estrategias para la planificación de espacios verdes en áreas urbanas, es necesario investigar más antes de tomar acciones concretas ([Jeanjean, 2017](#)). En este sentido, los resultados de este estudio pueden complementarse con otras aproximaciones que permitan robustecer los hallazgos e identificar, a través de otros modelos y monitoreos, el comportamiento del PM atmosférico y su interacción con el

arbolado. Así mismo, es necesario realizar un análisis de vientos dentro de la barrera que permita mostrar la remoción de la contaminación con frecuencias anuales, mensuales, semanales y diarias.

CONCLUSIONES

Mediante el modelado de su capacidad de remoción de PM, se identificó que una barrera arbórea modelo del PSB es capaz de remover 61.1 kg.año^{-1} . El PM es removido en mayor medida por especies exóticas dominantes de gran porte y área foliar (como cipreses y acacias) y en menor medida por especies nativas (como robles y alisos). Se debe considerar que dicho rendimiento no depende de su naturaleza exótica o nativa, sino que obedece al hecho de que las especies nativas en la ciudad son más jóvenes y tienen menores tasas de crecimiento. Por ello, se estima que, en escenarios futuros, las especies nativas tengan una mayor contribución a la remoción de PM a medida que crezcan.

Considerando que el modelo de i-Tree Eco utiliza las concentraciones de PM de la estación de calidad del aire de Kennedy para modelar la zona del PSB, en la cual las concentraciones de contaminantes son menores, la información obtenida puede generar una sobreestimación del beneficio del arbolado en cuanto a la remoción de PM. Para abordar esta limitación, es necesario que las futuras actualizaciones del *software* incluyan más estaciones, a fin de modelar con mayor precisión la calidad del aire en los diferentes sectores de la ciudad.

Sería de gran ayuda contar con estudios complementarios que utilicen modelos de dinámica de fluidos computacional o monitoreos en campo para robustecer los resultados y entender mejor la interacción entre los contaminantes atmosféricos y las barreras de vegetación arbórea.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Subdirección Técnica-Operativa del Jardín Botánico de Bogotá y al Grupo de Investigación Aplicada por su apoyo en el desarrollo de este estudio; a María del Pilar Arroyave del Servicio Forestal de los Estados Unidos por su apoyo en la actualización de la información de Bogotá en i-Tree Eco; y a la administración del Parque Simón Bolívar y al IDRD, quienes nos autorizaron a acceder al parque como área de estudio.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores de la investigación no declaran ningún conflicto de intereses con respecto a la investigación, su autoría y la publicación del artículo.

CONTRIBUCIÓN POR AUTOR

C.V.R.G. contribuyó a la revisión de literatura, la metodología, el trabajo de campo, el desarrollo de los resultados y la discusión. L.J.M.R. y L.F.L.B. contribuyeron a la revisión bibliográfica para realizar la introducción y la discusión, así como al desarrollo de la metodología, y también participaron en el inventario de la barrera y

su caracterización en los resultados. O.R. apoyó con los lineamientos metodológicos y el análisis de los datos. M.Q.A. apoyó en la georreferenciación de la información, la incorporación de la barrera modelo, la inclusión del análisis de vientos y el seguimiento de la publicación.

REFERENCIAS

- Arroyave-Maya, M. D. P., Posada-Posada, M. I., Nowak, D. J., & Hoehn, R. E.** (2019). 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>
- Brusseau, M. L., Matthias, A. D., Comrie, A. C., & Musil, S. A.** (2019). Atmospheric pollution. En M. L. Brusseau, I. L. Pepper & C. P. Gerba (Eds.), *Environmental and Pollution Science* (pp. 293-309). Academic Press.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814719-1.00017-3>
- Cardona A. K., & Bermúdez Z. V.** (2019). *Arbolado urbano como estrategia de gestión de la calidad del aire* [Tesis de especialización, Universidad de Antioquia].
<https://hdl.handle.net/10495/15906>
- Chen, L., Liu, C., Zou, R., Yang, M., & Zhang, Z.** (2016). Experimental examination of effectiveness of vegetation as bio-filter of particulate matters in the urban environment. *Environmental Pollution*, 208, 198-208.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.09.006>
- De la Riva, E. G., Pérez-Ramos, I., Fernández, C. N., Olmo, M., Arana, T. M., & Villar, R.** (2014). Rasgos funcionales en el género *Quercus*: estrategias adquisitivas frente a conservativas en el uso de recursos. *Ecosistemas*, 23(2), 82-89.
<https://doi.org/10.7818/ECOS.2014.23-2.11>
- Díaz, S., Lavorel, S., de Bello, F., Quétier, F., Grigulis, K., & Robson, T. M.** (2007). Incorporating plant functional diversity effects in ecosystem service assessments. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(52), 20684-20689.
<https://doi.org/10.1073/pnas.0704716104>
- Escobedo, F. J., Clerici, N., Staudhammer, C. L., & Corzo, G. T.** (2015). Socio-ecological dynamics and inequality in Bogotá, Colombia's public urban forests and their ecosystem services. *Urban Forestry & Urban Greening*, 14(4), 1040-1053.
<https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.09.011>
- Farrow, A., Anhauser, A., Chen, Y., & Céspedes, T.** (2022). La carga de la contaminación del aire en Bogotá, Colombia 2021. *Greenpeace*.
<https://www.greenpeace.org/static/planet4-colombia-stateless/2022/05/6521e020-la-carga-de-la-contaminacion-del-aire-en-bogota-colombia-2021.pdf>
- Garnier, E., Navas, M.-L., & Grigulis, K.** (2015). *Plant functional diversity: Organism traits, community structure, and ecosystem properties* (1ra ed.). Oxford University Press.
<https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780198757368.001.0001>

- Grote, R., Samson, R., Alonso, R., Amorim, J. H., Cariñanos, P., Churkina, G., Fares, S., Thiec, D. L., Niinemets, Ü., Mikkelsen, T. N., Paoletti, E., Tiwary, A., & Calfapietra, C. (2016). Functional traits of urban trees: Air pollution mitigation potential. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 14, 543-550.
<https://doi/10.1002/fee.1426>
- Hernández, M., Ramírez, O., Benavides, J., & Franco, J. (2021). Urban cycling and air quality: Characterizing cyclist exposure to particulate-related pollution. *Urban Climate*, 36, 100767.
<https://doi/10.1016/j.uclim.2020.100767>
- International Agency for Research on Cancer (IARC) (2013). *Air pollution and cancer*.
<https://publications.iarc.fr/Book-And-Report-Series/Iarc-Scientific-Publications/Air-Pollution-And-Cancer-2013>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) (2018). *Informe del estado de la calidad del aire en Colombia*.
<https://www.andi.com.co/Uploads/Informe%20estado%20calidad%20del%20aire%202018.pdf>.
- Jeanjean, A. P. R., Buccolieri, R., Eddy, J., Monks, P. S., & Leigh, R. J. (2017). Air quality affected by trees in real street canyons: The case of Marylebone neighbourhood in central London. *Urban Forestry & Urban Greening*, 22, 41-53.
<https://doi/10.1016/j.ufug.2017.01.009>
- Lavorel, S. (2013). Plant functional effects on ecosystem services. *Journal of Ecology*, 101(1), 4-8.
<https://doi.org/10.1111/1365-2745.12031>
- Miao, C., Li, P., Yu, S., Chen, W., & He, X. (2022). Does street canyon morphology shape particulate matter reduction capacity by street trees in real urban environments? *Urban Forestry & Urban Greening*, 78, 127762.
<https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127762>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) (2017). *Resolución 2254 del 2017*.
<https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/Resolucion-2254-de-2017.pdf>
- Morakinyo, T. E., Lam, Y. F., & Hao, S. (2016). Evaluating the role of green infrastructures on near-road pollutant dispersion and removal: Modelling and measurement. *Journal of Environmental Management*, 182, 595-605.
<https://doi/10.1016/j.jenvman.2016.07.077>
- Moreno Barreto, J. E., & Rubiano Calderón, K. D. (2020). Aproximación al uso de rasgos funcionales y gradientes ambientales para seis especies del arbolado urbano de Bogotá. *Revista Facultad De Ciencias Básicas*, 15(2), 17-33.
<https://doi/10.18359/rfcb.3901>
- Nowak, D. J., Crane, D. E., & Stevens, J. C. (2006). Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. *Urban Forestry & Urban Greening*, 4(3-4), 115-123.
<https://doi/10.1016/j.ufug.2006.01.007>

Nowak, D. J., Hirabayashi, S., Bodine, A., & Hoehn, R. (2013). Modeled PM_{2.5} removal by trees in ten US cities and associated health effects. *Environmental Pollution*, 178, 395-402.

<https://doi/10.1016/j.envpol.2013.03.050>

Organización Mundial de la Salud (OMS) (2016). *Calidad del Aire Ambiente*.

<https://www.paho.org/es/temas/calidad-aire/calidad-aire-ambiente>

Organización Mundial de la Salud (OMS) (2018). *Nueve de cada diez personas de todo el mundo respiran aire contaminado*.

<https://www.who.int/es/news/item/02-05-2018-9-out-of-10-people-worldwide-breathe-polluted-air-but-more-countries-are-taking-action>

Pope III, C. A., Turner, M. C., Burnett, R. T., Jerrett, M., Gapstur, S. M., Diver, W. R., & Brook, R. D. (2015). Relationships between fine particulate air pollution, cardiometabolic disorders, and cardiovascular mortality. *Circulation Research*, 116(1), 108-115.

<https://doi/10.1161/CIRCRESAHA.116.305060>

Rodríguez-Alarcón, S. J., Pinzón-Pérez, L., López-Cruz, J., & Cabrera-Amaya, D. (2020). Rasgos funcionales de plantas leñosas en áreas verdes de Bogotá, Colombia. *Biota Colombiana*, 21(2), 108-133.

<https://doi/10.21068/c2020.v21n02a08>

Santiago, J.-L., Martilli, A., & Martin, F. (2016). On dry deposition modelling of atmospheric pollutants on vegetation at the microscale: Application to the impact of street vegetation on air quality. *Boundary-Layer Meteorology*, 162, 451-474.

<https://doi/10.1007/s10546-016-0210-5>

Secretaría Distrital de Ambiente (SDA) (2023). *Informe anual de calidad del aire de Bogotá 2023*.

<https://www.rmcab.ambientebogota.gov.co/Pagesfiles/Informe%20anual%202023.pdf>

Secretaría Distrital de Ambiente (SDA) (2024). *Inventario de emisiones de Bogotá, contaminantes criterio y black carbon año: 2022*.

https://www.ambientebogota.gov.co/todas-las-investigaciones/-/asset_publisher/pibvwzUnZiNr/document/id/6881078

Secretaría Distrital de Planeación (SDP) (2021). *Documento técnico de soporte. Libro I Componente general. Plan de Ordenamiento Territorial. Bogotá Verdece 2022-2035*.

www.sdp.gov.co/sites/default/files/dts_libroi_componente_general.pdf

Selmi, W., Weber, C., Rivière, E., Blond, N., Mehdi, L., Nowak, D. (2016). Air pollution removal by trees in public green spaces in Strasbourg city, France. *Urban Forestry & Urban Greening*, 17, 192-201.

<https://doi/10.1016/j.ufug.2016.04.010>

- Silva, L., Schneider, I., Artaxo, P., Núñez-Blanco, Y., Pinto, D., Flores, E., Gómez-Plata, L., Ramírez, O., & Dotto, G.** (2022). Particulate matter geochemistry of a highly industrialized region in the Caribbean: Basis for future toxicological studies. *Geoscience Frontiers*, 13(1), 101115.
<https://doi/10.1016/j.gsf.2020.11.012>
- UN Environment Program (UNEP)** (2021). *Actions on air quality. Latin America and the Caribbean regional report*.
<https://www.unep.org/topics/air/multi-level-air-quality-management/actions-air-quality-report-update>
- Weerakkody, U., Dover, J. W., Mitchell, P., & Reiling, K.** (2018). Evaluating the impact of individual leaf traits on atmospheric particulate matter accumulation using natural and synthetic leaves. *Urban Forestry & Urban Greening*, 30, 98-107.
<https://doi/10.1016/j.ufug.2018.01.001>
- World Bank** (2021). *Data. GDP (current US\$) - Latin America & Caribbean*.
<https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.CD?locations=ZJ>
- Xing, Y., Brimblecombe, P., Wang, S., & Zhang, H.** (2019a). Tree distribution, morphology and modelled air pollution in urban parks of Hong Kong. *Journal of Environmental Management*, 248, 109304.
<https://doi/10.1016/j.jenvman.2019.109304>
- Xing, Y., & Brimblecombe, P.** (2019b). Role of vegetation in deposition and dispersion of air pollution in urban parks. *Atmospheric Environment*, 201, 73-83.
<https://doi/10.1016/j.atmosenv.2018.12.027>

ANEXOS

Anexo 1. Inventario forestal completo de los árboles de la barrera del Parque Simón Bolívar, y remoción de PM por árbol. *Orden de la escala: excelente, buena, aceptable, mala, crítica, muerta.

Datos de Inventario								PM reducido - g. año ⁻¹	
ID Árbol	Nombre de la especie	Origen	Latitud	Longitud	DAP (cm)	Altura(m)	Estado de la copa*	PM ₁₀ *	PM _{2.5}
1	<i>Acacia melanoxylon</i>	Exótica	4.6631504	-74.0939764	85.9	23.8	EXCELENTE	883.90	298.10
2	<i>Salix humboldtiana</i>	Nativa	4.6631415	-74.0939753	35.3	17.5	MALA	74.90	25.20
3	<i>Salix humboldtiana</i>	Nativa	4.6631876	-74.0938732	36	21.7	CRÍTICO	66.50	22.40
4	<i>Acacia melanoxylon</i>	Exótica	4.6634329	-74.0939072	54.1	30.7	EXCELENTE	756.00	255.00
5	<i>Acacia melanoxylon</i>	Exótica	4.6632665	-74.0939122	17.8	21.4	ACEPTABLE	41.90	14.10
6	<i>Acacia melanoxylon</i>	Exótica	4.6632984	-74.0939986	49.7	24.9	BUENO	408.40	137.70
7	<i>Acacia melanoxylon</i>	Exótica	4.6632707	-74.0939902	37.2	25.2	ACEPTABLE	314.10	105.90
8	<i>Ledenbergia seguierioides</i>	Nativa	4.6632278	-74.0939769	10	3.2	BUENO	27.10	9.10
9	<i>Acacia melanoxylon</i>	Exótica	4.6632407	-74.0940882	36.9	19	BUENO	400.00	134.90
10	<i>Acacia melanoxylon</i>	Exótica	4.6634168	-74.0940559	38.8	26	BUENO	512.70	172.90
11	<i>Quercus humboldtii</i>	Nativa	4.6633464	-74.0940648	8.6	6	EXCELENTE	15.20	5.10
12	<i>Acacia melanoxylon</i>	Exótica	4.6633567	-74.0941208	30.9	17.5	BUENO	238.70	80.50
13	<i>Acacia melanoxylon</i>	Exótica	4.663338	-74.0941804	48.1	19.5	BUENO	397.00	133.90
14	<i>Prunus serotina</i>	Nativa	4.6633696	-74.0940438	11.8	7.5	ACEPTABLE	19.50	6.60
15	<i>Calliandra trinervia</i>	Nativa	4.6633801	-74.0939336	7	3.5	ACEPTABLE	7.40	2.50
16	<i>Acacia melanoxylon</i>	Exótica	4.6633408	-74.0939793	50.9	20	ACEPTABLE	408.70	137.80
17	<i>Salix humboldtiana</i>	Nativa	4.6633512	-74.0939824	49.3	20.7	CRÍTICO	107.80	36.40
18	<i>Quercus humboldtii</i>	Nativa	4.6633496	-74.0939359	21	11	ACEPTABLE	100.70	34.00
19	<i>Cupressus lusitanica</i>	Exótica	4.6634028	-74.0940889	86.6	22.5	MALA	369.50	124.60
20	<i>Quercus humboldtii</i>	Nativa	4.6633788	-74.094079	32.5	14.1	BUENO	77.40	26.10
21	<i>Acacia melanoxylon</i>	Exótica	4.6633784	-74.0940765	40.1	18.4	BUENO	318.90	107.60
22	<i>Acacia melanoxylon</i>	Exótica	4.6635274	-74.0944222	31.8	20	MALA	181.70	61.30
23	<i>Acacia melanoxylon</i>	Exótica	4.6633156	-74.0941412	41.4	24.4	ACEPTABLE	329.30	111.10
24	<i>Acacia melanoxylon</i>	Exótica	4.6634647	-74.0941669	27.7	15.5	ACEPTABLE	198.30	66.90
25	<i>Acacia melanoxylon</i>	Exótica	4.6634645	-74.0942152	32.6	16.7	ACEPTABLE	225.20	76.00
26	<i>Acacia melanoxylon</i>	Exótica	4.6634498	-74.0941545	22.6	9.8	ACEPTABLE	134.60	45.40
27	<i>Acacia melanoxylon</i>	Exótica	4.6633817	-74.0941395	29.9	26.5	MALA	194.00	65.40
28	<i>Prunus serotina</i>	Nativa	4.6634969	-74.094093	21	15.4	MALA	38.90	13.10
29	<i>Quercus humboldtii</i>	Nativa	4.6636229	-74.0940138	9.6	4.5	ACEPTABLE	12.80	4.30
30	<i>Calliandra trinervia</i>	Nativa	4.6633574	-74.0939254	11.8	4	ACEPTABLE	18.90	6.40
31	<i>Acacia melanoxylon</i>	Exótica	4.6635528	-74.0939933	68.4	25.6	ACEPTABLE	708.80	239.00
32	<i>Salix humboldtiana</i>	Nativa	4.6633878	-74.0937095	30.6	11	CRÍTICO	6.30	2.10
33	<i>Salix humboldtiana</i>	Nativa	4.6633858	-74.0936894	26.4	11	CRÍTICO	16.60	5.60
34	<i>Salix humboldtiana</i>	Nativa	4.663522	-74.0936756	33.8	13.3	CRÍTICO	11.50	3.90
35	<i>Cupressus lusitanica</i>	Exótica	4.6646362	-74.092974	82.4	14.4	BUENO	400.00	134.90
36	<i>Cupressus lusitanica</i>	Exótica	4.6645193	-74.0930012	77.3	17.5	BUENO	304.10	102.60
37	<i>Cupressus lusitanica</i>	Exótica	4.6644918	-74.0930942	53	18.6	MALA	231.50	78.10

Datos de Inventario								PM reducido - g. año ⁻¹	
ID Árbol	Nombre de la especie	Origen	Latitud	Longitud	DAP (cm)	Altura(m)	Estado de la copa*	PM ₁₀ *	PM _{2.5}
38	<i>Cupressus lusitanica</i>	Exótica	4.6644406	-74.0931552	85.6	21.1	ACEPTABLE	262.90	88.70
39	<i>Cupressus lusitanica</i>	Exótica	4.6644369	-74.0931048	58.3	16.9	ACEPTABLE	276.30	93.20
40	<i>Cupressus lusitanica</i>	Exótica	4.6644747	-74.0931154	57.3	16.7	MALA	186.60	62.90
41	<i>Cupressus lusitanica</i>	Exótica	4.664499	-74.0928848	65.6	14.7	BUENO	320.00	107.90
42	<i>Cupressus lusitanica</i>	Exótica	4.6644681	-74.0929697	62.7	15.6	ACEPTABLE	309.50	104.40
43	<i>Cupressus lusitanica</i>	Exótica	4.6644485	-74.0929477	57.6	15.6	MALA	146.30	49.30
44	<i>Cupressus lusitanica</i>	Exótica	4.6644283	-74.0930583	59.8	16.3	CRÍTICO	90.70	30.60
45	<i>Cupressus lusitanica</i>	Exótica	4.6645493	-74.0930547	22	12.8	CRÍTICO	31.90	10.80
46	<i>Quercus humboldtii</i>	Nativa	4.6642592	-74.0929735	57.6	17.6	BUENO	322.40	108.70
47	<i>Quercus humboldtii</i>	Nativa	4.6642219	-74.0929122	64	19.2	EXCELENTE	327.90	110.60
48	<i>Acacia melanoxylon</i>	Exótica	4.6640602	-74.0930438	34.7	13.6	BUENO	53.00	17.90
49	<i>Quercus humboldtii</i>	Nativa	4.6639551	-74.0929679	54.1	19.3	EXCELENTE	406.50	137.10
50	<i>Cupressus lusitanica</i>	Exótica	4.6644039	-74.0932095	49.3	20.8	ACEPTABLE	351.60	118.60
51	<i>Cupressus lusitanica</i>	Exótica	4.6643941	-74.0931393	48.4	18.7	MALA	363.50	122.60
52	<i>Cupressus lusitanica</i>	Exótica	4.6643707	-74.0931863	58.3	19.1	ACEPTABLE	356.00	120.10
53	<i>Cupressus lusitanica</i>	Exótica	4.6643131	-74.0931928	46.5	17.6	MALA	103.50	34.90
54	<i>Myrcianthes fragrans</i>	Nativa	4.6643977	-74.09317	13.5	6.4	EXCELENTE	20.70	7.00
55	<i>Cupressus lusitanica</i>	Exótica	4.6643433	-74.0931093	35	16	CRÍTICO	38.40	13.00
56	<i>Cupressus lusitanica</i>	Exótica	4.6645057	-74.0932563	76.1	22.7	MALA	472.80	159.40
57	<i>Cupressus lusitanica</i>	Exótica	4.6645252	-74.0933083	77	22.9	ACEPTABLE	445.90	150.40
58	<i>Cupressus lusitanica</i>	Exótica	4.6645108	-74.0932801	45.8	16	ACEPTABLE	253.80	85.60
59	<i>Cupressus lusitanica</i>	Exótica	4.6644304	-74.09331	69.4	17.9	ACEPTABLE	322.00	108.60
60	<i>Myrcianthes fragrans</i>	Nativa	4.6644526	-74.0932672	24.2	6.4	EXCELENTE	76.90	25.90
61	<i>Myrcianthes fragrans</i>	Nativa	4.6642923	-74.0932581	18.1	4.8	EXCELENTE	44.30	15.00
62	<i>Cupressus lusitanica</i>	Exótica	4.6642701	-74.093195	51.6	18.4	ACEPTABLE	371.50	125.30
63	<i>Cupressus lusitanica</i>	Exótica	4.6642321	-74.0933596	49	20	MALA	200.00	67.40
64	<i>Cupressus lusitanica</i>	Exótica	4.6642854	-74.0933666	64.3	18.7	ACEPTABLE	323.60	109.10
65	<i>Cupressus lusitanica</i>	Exótica	4.6641259	-74.0933591	57	19.2	MALA	234.00	78.90
66	<i>Cupressus lusitanica</i>	Exótica	4.6639322	-74.0935407	56.3	21.1	ACEPTABLE	256.70	86.60
67	<i>Cupressus lusitanica</i>	Exótica	4.6641967	-74.0933887	51.2	21.4	BUENO	262.20	88.40
68	<i>Cupressus lusitanica</i>	Exótica	4.6641771	-74.0934566	47.4	19.7	MALA	218.40	73.70
69	<i>Cupressus lusitanica</i>	Exótica	4.6640235	-74.0934828	53.8	25	MALA	305.20	102.90
70	<i>Cupressus lusitanica</i>	Exótica	4.6640587	-74.0935044	34.1	23.5	CRÍTICO	148.80	50.20
71	<i>Cupressus lusitanica</i>	Exótica	4.664045	-74.0935845	71.3	20.5	MALA	213.90	72.10
72	<i>Cupressus lusitanica</i>	Exótica	4.6643927	-74.093358	52.2	14.5	MALA	186.80	63.00
73	<i>Cupressus lusitanica</i>	Exótica	4.6643465	-74.0935469	40.4	20.2	MUERTA	86.70	29.20
74	<i>Cupressus lusitanica</i>	Exótica	4.6641846	-74.093607	48.7	15.5	MUERTA	26.30	8.90
75	<i>Cupressus lusitanica</i>	Exótica	4.6642604	-74.0936609	73.2	21.9	BUENO	824.60	278.10
76	<i>Cupressus lusitanica</i>	Exótica	4.6643395	-74.0936561	74.2	21.7	BUENO	695.50	234.60
77	<i>Cupressus lusitanica</i>	Exótica	4.6643588	-74.0937049	65.3	26.7	BUENO	1030.50	347.50
78	<i>Cupressus lusitanica</i>	Exótica	4.6643293	-74.0938368	63.3	24.3	BUENO	1039.50	350.60
79	<i>Cupressus lusitanica</i>	Exótica	4.6643357	-74.0936684	64.3	23.5	BUENO	864.00	291.40
80	<i>Cupressus lusitanica</i>	Exótica	4.6643011	-74.093904	73.5	24.2	BUENO	993.30	335.00

Datos de Inventario								PM reducido - g. año ⁻¹	
ID Árbol	Nombre de la especie	Origen	Latitud	Longitud	DAP (cm)	Altura(m)	Estado de la copa*	PM ₁₀ [*]	PM _{2.5}
81	<i>Hieronyma alchorneoides</i>	Nativa	4.6641674	-74.0938548	16.4	5.4	EXCELENTE	45.10	15.20
82	<i>Erythrina rubrinervia</i>	Nativa	4.6641189	-74.0939843	13.4	7.8	EXCELENTE	31.30	10.50
83	<i>Cupressus lusitanica</i>	Exótica	4.6641425	-74.0937936	52.2	27.3	ACEPTABLE	688.50	232.20
84	<i>Cupressus lusitanica</i>	Exótica	4.6641118	-74.0936827	66.2	23.9	BUENO	762.60	257.20
85	<i>Cupressus lusitanica</i>	Exótica	4.663998	-74.0937575	48.4	20	ACEPTABLE	536.30	180.90
86	<i>Cupressus lusitanica</i>	Exótica	4.66415626	-74.09367701	42.8	20.8	BUENO	242.20	81.70
87	<i>Cupressus lusitanica</i>	Exótica	4.66407267	-74.09372672	37.2	17.2	ACEPTABLE	185.50	62.50
88	<i>Myrcianthes fragrans</i>	Nativa	4.66408774	-74.09374998	12.3	3.9	BUENO	16.80	5.70
89	<i>Cupressus lusitanica</i>	Exótica	4.6640859	-74.09375202	53.2	27.6	MALA	565.50	190.70
90	<i>Acacia melanoxylon</i>	Exótica	4.66396377	-74.09384094	60.5	22	EXCELENTE	897.50	302.70
91	<i>Acacia melanoxylon</i>	Exótica	4.66401474	-74.09395572	38.2	15.2	EXCELENTE	360.10	121.50
92	<i>Myrcianthes fragrans</i>	Nativa	4.66398265	-74.09392066	11.5	3.2	BUENO	8.70	2.90
93	<i>Cupressus lusitanica</i>	Exótica	4.6640665	-74.09363468	43	22.1	ACEPTABLE	311.90	105.20
94	<i>Acacia melanoxylon</i>	Exótica	4.66406517	-74.09360148	36.2	20	MALA	150.20	50.60
95	<i>Acacia melanoxylon</i>	Exótica	4.6639958	-74.0938196	59.5	30.2	ACEPTABLE	1069.20	360.60
96	<i>Acacia melanoxylon</i>	Exótica	4.6635173	-74.0937356	64	21.1	ACEPTABLE	543.70	183.40
97	<i>Acacia melanoxylon</i>	Exótica	4.663483	-74.0937022	35	13.5	CRÍTICO	45.20	15.20
98	<i>Acacia melanoxylon</i>	Exótica	4.6634886	-74.0936732	50	20.6	BUENO	340.70	114.90
99	<i>Acacia melanoxylon</i>	Exótica	4.6634803	-74.0937634	34.1	19.8	MALA	144.40	48.70
100	<i>Pyracantha coccinea</i>	Exótica	4.6634467	-74.0939101	8.6	7	MALA	7.70	2.60
101	<i>Acacia melanoxylon</i>	Exótica	4.6634626	-74.0939725	39.2	26.7	ACEPTABLE	370.30	124.90
102	<i>Acacia melanoxylon</i>	Exótica	4.6635824	-74.0940459	30.6	21.1	ACEPTABLE	198.10	66.80
103	<i>Prunus serotina</i>	Nativa	4.6635082	-74.0940203	34.1	16.9	MALA	55.20	18.60
104	<i>Alnus acuminata</i>	Nativa	4.6634628	-74.0940135	18.8	13.9	MALA	21.40	7.20
105	<i>Lafoensia acuminata</i>	Nativa	4.6634819	-74.0939528	36.6	17	ACEPTABLE	145.80	49.20
106	<i>Prunus serotina</i>	Nativa	4.6634765	-74.0938671	26.1	12.4	MALA	13.10	4.40
107	<i>Myrsine guianensis</i>	Nativa	4.663486	-74.0938788	24.2	9.9	ACEPTABLE	81.50	27.50
108	<i>Alnus acuminata</i>	Nativa	4.6634687	-74.0936207	19.7	13.5	ACEPTABLE	57.80	19.50
109	<i>Myrsine guianensis</i>	Nativa	4.6636437	-74.0938052	14.9	4.5	ACEPTABLE	9.00	3.00
110	<i>Myrsine guianensis</i>	Nativa	4.6635871	-74.0937068	14.6	3.5	MALA	2.20	0.80
111	<i>Quercus humboldtii</i>	Nativa	4.663469	-74.0938132	30.6	19.9	ACEPTABLE	130.20	43.90
112	<i>Quercus humboldtii</i>	Nativa	4.6635519	-74.093864	39.2	21.4	ACEPTABLE	154.90	52.20
113	<i>Quercus humboldtii</i>	Nativa	4.6636798	-74.0938804	10.8	7	ACEPTABLE	32.30	10.90
114	<i>Prunus serotina</i>	Nativa	4.6635113	-74.0939073	14	8.5	CRÍTICO	7.40	2.50
115	<i>Prunus serotina</i>	Nativa	4.6635914	-74.0939248	19.4	11.7	MALA	23.60	7.90
116	<i>Prunus serotina</i>	Nativa	4.6634003	-74.0939192	17.2	6.6	ACEPTABLE	24.40	8.20
117	<i>Alnus acuminata</i>	Nativa	4.6635145	-74.0939789	19.1	9.9	MALA	18.00	6.10
118	<i>Lafoensia acuminata</i>	Nativa	4.6635216	-74.0940838	20.7	13.1	ACEPTABLE	82.70	27.90
119	<i>Acacia melanoxylon</i>	Exótica	4.6634898	-74.0940219	61.4	22.6	ACEPTABLE	290.60	98.00
120	<i>Hieronyma alchorneoides</i>	Nativa	4.6635482	-74.0941485	14.3	7	ACEPTABLE	20.00	6.80
121	<i>Pittosporum undulatum</i>	Exótica	4.6635881	-74.0941608	22.9	11	ACEPTABLE	114.80	38.70
122	<i>Acacia melanoxylon</i>	Exótica	4.6634644	-74.0942243	49.3	18.7	ACEPTABLE	295.50	99.70
123	<i>Alnus acuminata</i>	Nativa	4.6636641	-74.0942465	27.1	19.6	ACEPTABLE	209.90	70.80

Datos de Inventario								PM reducido - g. año ⁻¹	
ID Árbol	Nombre de la especie	Origen	Latitud	Longitud	DAP (cm)	Altura(m)	Estado de la copa*	PM ₁₀ [*]	PM _{2.5}
124	<i>Pittosporum undulatum</i>	Exótica	4.6635707	-74.0941628	36.3	10.8	BUENO	215.90	72.80
125	<i>Prunus serotina</i>	Nativa	4.6635093	-74.093954	11.8	8.8	MUERTA	0.10	0.00
126	<i>Pittosporum undulatum</i>	Exótica	4.6635389	-74.0940938	27.2	14.9	ACEPTABLE	206.80	69.70
127	<i>Quercus humboldtii</i>	Nativa	4.6635524	-74.0940182	10.2	8.9	ACEPTABLE	34.00	11.50
128	<i>Alnus acuminata</i>	Nativa	4.6636533	-74.0937829	14	7.5	CRÍTICO	7.90	2.70
129	<i>Prunus serotina</i>	Nativa	4.663578	-74.0939446	22.3	11.9	CRÍTICO	6.30	2.10
130	<i>Pyracantha coccinea</i>	Exótica	4.6635055	-74.0939513	9.9	6	CRÍTICO	2.00	0.70
131	<i>Lafoensia acuminata</i>	Nativa	4.6636319	-74.0942295	31.5	19.6	ACEPTABLE	129.20	43.60
132	<i>Cupressus lusitanica</i>	Exótica	4.663905	-74.093685	46.5	25.2	MALA	309.50	104.40
133	<i>Cupressus lusitanica</i>	Exótica	4.6639304	-74.0937029	36.3	19.9	MALA	166.70	56.20
134	<i>Cupressus lusitanica</i>	Exótica	4.664018	-74.0937021	48.4	24.5	MALA	261.20	88.10
135	<i>Cupressus lusitanica</i>	Exótica	4.664117	-74.0936399	57.3	23.1	MALA	454.90	153.40
136	<i>Cupressus lusitanica</i>	Exótica	4.6640815	-74.0935143	60.1	23.5	MALA	370.80	125.10
137	<i>Cupressus lusitanica</i>	Exótica	4.6639279	-74.0936423	31.5	19.6	CRÍTICO	117.60	39.70
138	<i>Cupressus lusitanica</i>	Exótica	4.6639191	-74.0936187	76.1	21.8	ACEPTABLE	499.90	168.60
139	<i>Prunus serotina</i>	Nativa	4.6638142	-74.0935533	16.8	11	ACEPTABLE	102.60	34.60
140	<i>Cupressus lusitanica</i>	Exótica	4.6639845	-74.0935501	65.6	25.3	ACEPTABLE	735.00	247.90
141	<i>Acacia melanoxylon</i>	Exótica	4.6638707	-74.0934699	44.9	21.2	BUENO	356.90	120.40
142	<i>Acacia melanoxylon</i>	Exótica	4.663889	-74.0934112	48.1	26	EXCELENTE	755.80	254.90
143	<i>Acacia melanoxylon</i>	Exótica	4.6639652	-74.0934713	50.3	25.2	ACEPTABLE	316.60	106.80
144	<i>Pyracantha coccinea</i>	Exótica	4.6638171	-74.0934634	8.3	4.5	EXCELENTE	9.30	3.10
145	<i>Pyracantha coccinea</i>	Exótica	4.6637959	-74.0934946	8.9	3.4	MALA	5.80	2.00
146	<i>Prunus serotina</i>	Nativa	4.6638509	-74.0934828	23.2	7.6	EXCELENTE	54.70	18.40
147	<i>Acacia melanoxylon</i>	Exótica	4.663833	-74.0934626	43.3	25.4	EXCELENTE	646.80	218.10
148	<i>Myrcianthes fragrans</i>	Nativa	4.6639021	-74.0934272	10.8	4	EXCELENTE	22.80	7.70
149	<i>Cupressus lusitanica</i>	Exótica	4.6638618	-74.0933245	52.5	25.8	BUENO	748.60	252.50
150	<i>Myrcianthes fragrans</i>	Nativa	4.6641601	-74.0932971	16.1	4.8	EXCELENTE	24.40	8.20
151	<i>Cupressus lusitanica</i>	Exótica	4.6641439	-74.0934206	49.3	23.1	MALA	286.60	96.70
152	<i>Cupressus lusitanica</i>	Exótica	4.664018	-74.0933034	40.1	20.7	CRÍTICO	86.20	29.10
153	<i>Cupressus lusitanica</i>	Exótica	4.6640757	-74.0934058	58.9	28.2	BUENO	974.90	328.80
154	<i>Acacia melanoxylon</i>	Exótica	4.6638533	-74.0933117	36.6	28.5	MALA	262.50	88.50
155	<i>Acacia melanoxylon</i>	Exótica	4.6638265	-74.0934405	36.2	24.7	BUENO	328.50	110.80
156	<i>Quercus humboldtii</i>	Nativa	4.6638008	-74.0933988	47.8	25.6	EXCELENTE	399.10	134.60
157	<i>Acacia melanoxylon</i>	Exótica	4.66381	-74.093385	43.9	28.5	EXCELENTE	493.40	166.40
158	<i>Acacia melanoxylon</i>	Exótica	4.663698	-74.0932958	70	23.3	EXCELENTE	1140.50	384.60
159	<i>Acacia melanoxylon</i>	Exótica	4.6637433	-74.0933028	15.9	11	MUERTA	0.60	0.20
160	<i>Acacia melanoxylon</i>	Exótica	4.663842	-74.0933634	47.7	21.3	EXCELENTE	345.40	116.50
161	<i>Pyracantha coccinea</i>	Exótica	4.6637313	-74.0932991	10.8	5.8	EXCELENTE	27.00	9.10
162	<i>Quercus humboldtii</i>	Nativa	4.6636701	-74.0940685	40.7	21.3	ACEPTABLE	145.60	49.10
163	<i>Pittosporum undulatum</i>	Exótica	4.6637299	-74.0938993	22.9	9.7	ACEPTABLE	79.50	26.80
164	<i>Pittosporum undulatum</i>	Exótica	4.6636984	-74.0941586	28.3	12.6	ACEPTABLE	154.60	52.10
165	<i>Prunus serotina</i>	Nativa	4.6637433	-74.0942079	20.1	10	MUERTA	0.80	0.30
166	<i>Fraxinus chinensis</i>	Exótica	4.6637342	-74.0941975	23.9	16.3	MALA	142.70	48.10
167	<i>Pittosporum undulatum</i>	Exótica	4.6637105	-74.0941025	22	12.3	MALA	124.20	41.90

Datos de Inventario								PM reducido - g. año ⁻¹	
ID Árbol	Nombre de la especie	Origen	Latitud	Longitud	DAP (cm)	Altura(m)	Estado de la copa*	PM ₁₀ *	PM _{2.5}
168	<i>Pittosporum undulatum</i>	Exótica	4.6636373	-74.0939011	49.7	19.6	ACEPTABLE	271.90	91.70
169	<i>Alnus acuminata</i>	Nativa	4.6636825	-74.0939151	30.7	19.3	MALA	82.10	27.70
170	<i>Prunus serotina</i>	Nativa	4.6636385	-74.0938655	19.7	13.1	MUERTA	8.50	2.90
171	<i>Prunus serotina</i>	Nativa	4.6637393	-74.0938879	24.5	12	MALA	13.70	4.60
172	<i>Pittosporum undulatum</i>	Exótica	4.6635559	-74.093806	29	10.1	ACEPTABLE	99.40	33.50
173	<i>Alnus acuminata</i>	Nativa	4.6636031	-74.0936954	31.3	15.4	MALA	106.10	35.80
174	<i>Senna viarum</i>	Nativa	4.6636803	-74.0938674	27.6	10	MALA	43.00	14.50
175	<i>Quercus humboldtii</i>	Nativa	4.6637371	-74.0937585	30.2	18.7	ACEPTABLE	197.10	66.50
176	<i>Quercus humboldtii</i>	Nativa	4.6636986	-74.0938558	0.6	17.6	ACEPTABLE	29.10	9.80
177	<i>Lafoensia acuminata</i>	Nativa	4.6638127	-74.0941021	33.7	16.7	MALA	87.00	29.30
178	<i>Salix humboldtiana</i>	Nativa	4.6637466	-74.0940656	0.5	14.3	MUERTA	9.40	3.20
179	<i>Pittosporum undulatum</i>	Exótica	4.6638538	-74.0940815	31.6	10.6	ACEPTABLE	192.20	64.80
180	<i>Acacia melanoxylon</i>	Exótica	4.6637442	-74.0939656	53.8	18.5	BUENO	439.50	148.20
181	<i>Myrsine coriacea</i>	Nativa	4.6637821	-74.0940488	16.6	9	ACEPTABLE	61.10	20.60
182	<i>Acacia melanoxylon</i>	Exótica	4.66383	-74.0940229	68.4	19.7	ACEPTABLE	350.30	118.10
183	<i>Prunus serotina</i>	Nativa	4.6637636	-74.0937168	26.7	13.6	CRÍTICO	19.10	6.50
184	<i>Alnus acuminata</i>	Nativa	4.6637188	-74.0936174	18.5	9.6	MALA	28.30	9.50
185	<i>Alnus acuminata</i>	Nativa	4.663701	-74.0935365	21	11.2	MALA	42.60	14.40
186	<i>Alnus acuminata</i>	Nativa	4.6637258	-74.0935882	22.5	10.6	CRÍTICO	36.30	12.20
187	<i>Pittosporum undulatum</i>	Exótica	4.6636274	-74.093551	41.7	8.9	ACEPTABLE	224.20	75.60
188	<i>Alnus acuminata</i>	Nativa	4.6635896	-74.0934832	22.5	10.9	MALA	53.70	18.10
189	<i>Acacia melanoxylon</i>	Exótica	4.6636626	-74.0934554	22.3	10.70	ACEPTABLE	44.20	14.90

