DETERMINACIÓN DE LA TOLERANCIA A LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE DE 10 ESPECIES LEÑOSAS PRESENTES EN LA ZONA DE MAYOR CONCENTRACIÓN DE PM_{10} EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ.

Presentado por

Jenny Paola Betancour Leuro - 20132010018

Karen Viviana Mera Valverde - 20132010038

Trabajo de grado en modalidad de investigación- innovación como requisito para optar por el título de Ingeniera forestal.

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

FACULTAD DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES

PROYECTO CURRICULAR INGENIERÍA FORESTAL

Bogotá, D.C., Colombia

2020

AGRADECIMIENTOS

A mi familia y amigos, por su apoyo a lo largo de esta etapa de mi vida.

A aquellos que nos compartieron sus conocimientos.

A la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, por las oportunidades brindadas.

Jenny.

A mi familia, por el apoyo incondicional que me brindaron

para culminar mi carrera profesional,

a mis amigos, por la complicidad durante el recorrido de aprendizaje

y a la Universidad Distrital Francisco José de Caldas,

por ser el eje de conocimiento.

Karen.

RESUMEN

En una ciudad como Bogotá D.C., la cual es la segunda más contaminada de Colombia, y la cuarta ciudad con mayor contaminación en América Latina, se hace necesaria la siembra de plantas tolerantes a la contaminación atmosférica como una medida para su mitigación. Si bien la sensibilidad y la respuesta de las plantas a los contaminantes del aire son variables, esto se puede evaluar en los cambios a nivel fisiológico y bioquímico de la planta. El índice de tolerancia a la contaminación del aire (APTI), es la herramienta que permite conocer, por lo tanto, con base en cuatro parámetros bioquímicos en las hojas (contenido relativo de agua, ácido ascórbico, pH y la clorofila total), la tolerancia o sensibilidad que pueden presentar las plantas en determinadas condiciones. En el presente estudio se determinó la tolerancia a la contaminación del aire de diez especies leñosas presentes en la zona de mayor concentración de PM_{10} de Bogotá. Los resultados indicaron que el 30% de las especies evaluadas se encuentran dentro del rango de "Tolerancia intermedia", mientras que el 70% restante se encuentra dentro del rango "sensible" a la contaminación del aire; correspondiendo en el primero a las especies *S. nigra*, *F. soatensis*, y *A. melanoxylon*.

Palabras clave: *Índice de tolerancia a la contaminación del aire APTI, parámetros bioquímicos, contaminación atmosférica, pH, clorofila total, ácido ascórbico, contenido relativo de humedad.*

ABSTRACT

In a city like Bogotá D.C., which is the second most polluted in Colombia, and the fourth most polluted city in Latin America, it is necessary to plant atmospheric pollution tolerant plants as a way to mitigate it. Although the sensitivity and response of plants to air pollutants is variable, this can be evaluated in the changes at the physiological and biochemical level of the plant. The air pollution tolerance index (APTI), is the tool that allows us to know, therefore, based on four biochemical parameters in the leaves (relative moisture content, ascorbic acid, pH and total chlorophyll content), the tolerance or sensitivity that plants can present under certain conditions. In the present study, the air pollution tolerance of ten woody species present in the area with the highest concentration of PM_{10} in Bogotá was determined. The results indicated that 30% of the evaluated species are within the "intermediate tolerance" range, while the remaining 70% are within the "sensitive" range to air pollution; corresponding in the first to the species *S. nigra*, *F. soatensis*, and *A. melanoxylon.*

Keywords: *Air pollution tolerance index APTI, biochemical parameters, air pollution, pH, total chlorophyll content, ascorbic acid, relative moisture content.*

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN 1

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 2

3. JUSTIFICACIÓN 3

4. MARCO TEÓRICO 4

4.1. Estado del arte 4

4.2. Marco conceptual 8

4.2.1. Contaminación atmosférica en las ciudades. 8

4.2.2. PM_{10} (Particulate matter) 9

4.2.3. Contaminación atmosférica en Bogotá 9

4.2.4. PM_{10} en Bogotá: 10

4.2.5. Los árboles como sumideros. 11

4.2.6. Tolerancia ambiental 11

4.2.7. Índice de Tolerancia a la Contaminación del Aire (APTI) 12

4.2.8. Especies seleccionadas 14

5. OBJETIVOS 19

5.1. General 19

5.2. Específicos 19

6. ÁREA DE ESTUDIO 20

6.1. Delimitación del área de mayor contaminación en Bogotá. 20

6.2. Descripción del área de estudio 21

7. METODOLOGÍA 22

7.1. Selección de los puntos de muestreo 22
7.2. Selección de especies y diseño de muestreo. 23
7.3. Determinación de las variables del APTI (Índice de tolerancia a la contaminación del aire) 25
7.3.1. Determinación de la clorofila total. 25
7.3.2. Determinación del pH. 26
7.3.3. Determinación del contenido relativo de agua. 26
7.3.4. Determinación del ácido ascórbico. 27
7.3.5. Determinación del índice de tolerancia a la contaminación del aire (APTI). 28
7.4. Análisis de los datos. 29
8. RESULTADOS 30
8.1 Contenido relativo de agua 30
8.2 pH 31
8.3 Contenido de ácido ascórbico 31
8.4 Clorofila total. 33
8.5 Índice de tolerancia a la contaminación del aire. 33
8.5 Análisis de datos 35
9 DISCUSIÓN 37
10 CONCLUSIONES 41
11 RECOMENDACIONES 42
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 43

Índice de tablas

Tabla 1. Índice de tolerancia a la contaminación del aire 34

Tabla 2. Diferencias significativas entre las especies..... 35

Tabla 3. Correlación entre los parámetros bioquímicos y el índice de tolerancia a la contaminación del aire (APTI) 36

Índice de gráficas

Gráfica 1. Contenido relativo de agua. (%) 30

Gráfica 2. pH 31

Gráfica 3. Ácido ascórbico (mg/g) 32

Gráfica 4. Clorofila total. (mg/g)..... 33

Gráfica 5. Índice de tolerancia a la contaminación del aire por especie 34

Gráfica 6. Diferencias significativas entre las especies estudiadas. 36

1. INTRODUCCIÓN

El arbolado urbano juega un papel importante en el mantenimiento de la calidad del aire al funcionar como sumidero, tanto de contaminantes gaseosos, como de material particulado; gracias a su capacidad de acumular contaminantes en la superficie de sus hojas, y a la absorción de éstos durante intercambios gaseosos (Ram et al., 2014). Se ha demostrado que los contaminantes atmosféricos pueden ser perjudiciales en todos los organismos vivos, ocasionando particularmente en las plantas, cambios en la anatomía, fisiología, y en sus componentes bioquímicos (Kaur, Sharma, Katnoria, & Nagpal, 2017)

Como mecanismo de defensa, algunas plantas pueden adaptarse al entorno realizando ajustes bioquímicos, como en los contenidos de clorofila, ácido ascórbico, pH de la hoja y contenido relativo de agua (Bharti, Trivedi, & Kumar, 2018). La combinación de dichos ajustes bioquímicos da como resultado el índice de tolerancia a la contaminación del aire, interpretándose como el nivel de tolerancia o sensibilidad de las plantas a la contaminación atmosférica.

El presente estudio se realizó para conocer el nivel de tolerancia a la contaminación del aire de diez especies pertenecientes al arbolado urbano de Bogotá D.C, ubicadas en la zona de mayor concentración de PM_{10}, más exactamente en el sur occidente de la ciudad, en las localidades de Ciudad Bolívar y Bosa, donde la concentración de PM_{10} oscila en un rango de 70-90 $\mu g/m^3$,

Para ello, se utilizó el índice APTI propuesto por Singh y Rao (1983), evaluando en las muestras colectadas de las especies leñosas seleccionadas cuatro parámetros bioquímicos (contenido relativo de agua, clorofila total, contenido de ácido ascórbico y pH foliar), dando como resultado el nivel de tolerancia o sensibilidad de las especies estudiadas, y, por lo tanto, información para la selección de especies adecuadas para el arbolado urbano, según los niveles de contaminación atmosférica.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En Colombia la contaminación atmosférica urbana afecta la salud de las personas y el ecosistema urbano en general. Según el Observatorio Nacional de Salud se registran aproximadamente 11.152 muertes prematuras de personas cada año por la continua exposición a contaminantes que provocan enfermedades de tipo respiratorio y cánceres de pulmón.

Bogotá, siendo la capital de Colombia es la segunda ciudad más contaminada del país y la cuarta ciudad con mayor contaminación del aire en América Latina. (Korc, 2014). Según la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá el principal contaminante del aire en la ciudad es el material particulado, ya que desde el año 2001 se incumple la norma anual local de PM_{10} (50 $\mu g/m^3$) en más del 40% de los días del año. Es decir, que, durante un tiempo representativo del año, las personas que habitan en la ciudad se encuentran expuestas a niveles de PM_{10} que son considerados como inadecuados por entidades como la Organización Mundial de la Salud. (Gaitan et al., 2007)

Una medida de mitigación para la contaminación atmosférica que se ha implementado mundialmente es la siembra de árboles en las ciudades. El arbolado urbano de Bogotá es un elemento fundamental en la estructura ecológica principal de la ciudad ya que funciona como sumidero de las concentraciones atmosféricas de material particulado; no obstante, según, Molina et al., 2014, el metabolismo de los árboles se ve afectado por el efecto de la contaminación, pudiendo sufrir alteraciones químicas y fisiológicas. Chen et al., (1991), explica que algunas de las alteraciones que corresponden a atributos químicos y físicos de las hojas, son la concentración de pigmentos, la cantidad de antioxidantes, la composición de lípidos y el contenido relativo de agua, lo que puede ocasionar que los servicios ambientales que brindan los árboles se limiten, al igual que su vida útil. (Ramos, 2014)

Por tal motivo, es necesario realizar investigaciones que permitan responder interrogantes sobre la toma de decisiones para la selección de especies de plantas que puedan ser resistentes a los altos niveles de contaminación del aire en la ciudad. Si bien, existe el Manual de silvicultura urbana para Bogotá, y otros documentos de carácter científico,

Alberto et al., 2018, menciona que desde hace varias décadas no se ha considerado el hecho de que no todas las especies arbóreas son funcionales en todos los espacios, lo que constituye una limitación actual para la realización de los planes de arborización y/o reforestación urbana.

Uno de los interrogantes a responder seria ¿Cuáles atributos químicos que conforman el APTI, les confieren, a determinados arboles de la ciudad, una mayor tolerancia a la contaminación atmosférica?, y ¿Cuáles especies son más tolerantes o más susceptibles a niveles altos de contaminación?

3. JUSTIFICACIÓN

El Índice de Tolerancia a la Contaminación del Aire (APTI) es una de las herramientas que se han estado empleando en las últimas décadas con el fin de controlar y/o disminuir la creciente problemática de la contaminación atmosférica, especialmente en las ciudades; esto gracias a que tiene como objeto de estudio a las plantas, organismos conocidos por brindar grandes beneficios al ser humano, entre los que se encuentra el servicio de regulación atmosférica.

El APTI evalúa cuatro factores bioquímicos presentes en las plantas (Ácido ascórbico, Clorofila total, pH y Contenido relativo de agua), lo que permite conocer la tolerancia de las mismas a la contaminación del aire (Singh, Rao, Agrawal, Pandey, & Naryan, 1991); funcionando así, como herramienta para la toma de decisiones en cuanto al arbolado urbano. Para su estudio es ideal llevar a cabo el análisis de individuos ubicados en zonas con altas concentraciones de contaminación, puesto que el APTI varía según la concentración de contaminantes en el aire, por lo que las especies con un mayor índice, es decir, las categorizadas como tolerantes en éstas zonas son las más aptas como receptoras de contaminantes.

Si bien la tolerancia de las plantas a la contaminación del aire se ha evaluado mediante el análisis a la actividad superóxido dismutasa (SOD, por sus siglas en inglés, Superoxide dimutase) (Han;, Wang;, & Han, 1995), el APTI representa una mayor confiabilidad,

puesto que se basa en cuatro parámetros bioquímicos en conjunto, mientras que el SOD se basa en la actividad de una sola enzima (Liu & Ding, 2007).

Bogotá D.C. siendo la capital de la República y una de las principales ciudades del país, funcionando por lo tanto como epicentro político, administrativo, industrial, y económico, no se encuentra exenta de la problemática referente a la contaminación atmosférica, presentando incluso una de las mayores concentraciones de contaminación, no sólo del país, sino de Latinoamérica (Franco R, 2012). Dentro de la cual, la zona que históricamente ha presentado la mayor concentración de contaminantes atmosféricos, principalmente PM_{10}, es la sur occidental, abarcando las localidades de Bosa, Kennedy, Tunjuelito y Ciudad Bolívar.

Teniendo en cuenta lo anterior, sumado a que el APTI no es un índice estándar, dependiente, por lo tanto, de factores climáticos y geográficos de una zona específica, y que en Alcaldía Mayor de Bogotá & Jardín Botánico José Celestino Mutis, (2011), se resalta la importancia de llevar a cabo investigaciones rigurosas para entender el comportamiento de las especies en los diferentes niveles de contaminación del aire de la ciudad; es de importancia llevar a cabo el estudio del APTI en las especies presentes en la ciudad de Bogotá, generando así, información para la toma de decisiones frente al arbolado urbano como alternativa de regulación de los contaminantes atmosféricos.

4. MARCO TEÓRICO

4.1. Estado del arte

Según Ram et al., (2015), la segunda mitad del siglo XIX se vio dominada por investigaciones en torno al reconocimiento y descripción de los diferentes contaminantes atmosféricos, y, a su vez, en la búsqueda de herramientas y técnicas que permitiesen reducir y controlar la contaminación del aire; de allí surgieron posteriormente las herramientas “verdes”, cuya denominación viene del empleo biológico, es decir, de la vegetación. Una de éstas herramientas la idearon Singh y Rao en 1983, conocida como

el Índice de Tolerancia a la Contaminación del Aire: APTI (Por sus siglas en inglés *Air Pollution Tolerance Index*).

Uno de los primeros trabajos en torno al APTI fue "Air pollution tolerance index of certain plants of Hyderabad " elaborado por S. N. Raza, Vijaykumari, & Murthy, (1985) donde se evaluó el APTI de algunas especies en Heyderadab (India); y, en 1988, nuevamente en ésta ciudad, S. H. Raza, Murthy, & Ahmed evaluaron el APTI de especies dentro de una zona industrial, lo cual se convertiría en una constante de futuras investigaciones.

Para 1991, Singh y Rao, en esta ocasión junto con Agrawal, Pandey, & Naryan, llevaron a cabo un análisis del APTI de 69 especies, incluyendo hierbas, arbustos y árboles, en una zona industrial urbana en Varanasi, India. Luego, en 1993, nuevos autores (Rayappa & Charya) contribuyeron con la publicación de "Pollution tolerance index in some common plants around some major industries in Warangal City, Andhra Pradesh", India. Por último, finalizando el siglo XX, Agrawal & Tiwari, (1997), publicaron "Susceptibility Level of Few Plants on Basis of Air Pollution Tolerance Index", nuevamente en India.

En el siglo XXI uno de los primeros trabajos fue "Anticipated Air Pollution Tolerance of some plant species Considered for green belt Development in and around an Industrial/urban area in India: An Overview", publicado por Shannigrahi, Fukushima, & Sharma, (2004), en el cual evaluaron el APTI de 30 especies dentro de un área industrial/urbana, y, además, es uno de los primeros trabajos donde se menciona y emplea el Índice de Rendimiento Anticipado (API por sus siglas en inglés *Anticipated performance index*), el cual toma el APTI, junto con cinco variables biológicas y socioeconómicas con el fin de determinar un puntaje que permitirá categorizar las especies según su nivel de recomendación, desde "mejor" (best), hasta "No recomendada" (Not recommendation for plantation) para el arbolado urbano; aunque en éste estudio el APTI no es uno de los objetivos principales, se demuestra que, las especies de mayor APTI no necesariamente serán las que presenten un mayor API; de las 30 especies evaluadas, las de mayor APTI fueron *Mangifera indica, Moringa*

pterydosperma, Cassia renigera y *Ailanthus excelsa*, donde *Cassia renigera* fue la que presentó un menor API, siendo clasificada dentro de las "Pobres". Prajapati & Tripathi, (2008) evalúan igualmente el API, en Varanasi, India, sin embargo, en este caso las especies que presentan un mayor APTI, a su vez, se encuentran dentro de las que presentan un mayor API.

Para el año 2007 se registra el primer estudio fuera de la India; Liu & Ding publicaron "Variation in Air Pollution Tolerance Index of plants near a steel factory: Implications for landscape-plant species selection for industrial áreas", llevado a cabo en China; su objetivo principal fue el analizar la variación estacional de los parámetros que influyen en la tolerancia a la contaminación del aire, esto por medio de la evaluación del APTI de 23 especies aledañas a la Fábrica de Hierro y Acero de Beijín, desde el verano hasta el otoño de 2001; en la metodología incluyeron mediciones propias tanto de la temperatura como de la humedad, y modificaron los rangos del APTI, teniendo en cuenta la media y la desviación estándar. Finalmente encontraron que los arbustos tienden a ser más tolerantes que los árboles, conjuntamente a que el APTI presenta una variación estacional, con especies categorizadas como sensibles en las primeras muestras, y tolerantes en las últimas; Liu & Ding además comparan la tolerancia de algunas especies con respecto a otros estudios elaborados con métodos diferentes, mencionando cómo el APTI es más confiable puesto que combina varios parámetros. En el 2010 en India, Jissy Jyothi & Jaya igualmente analizaron el APTI de varias especies durante la variación climática transcurrida entre 2006 y 2007, encontrando igualmente que el APTI varía dependiendo de los factores climáticos, sin embargo, la variación no es tan significativa como en el estudio hecho en China, ya que los cambios en el clima no son tan abruptos, puesto que, en Kerala, India, no hay estaciones marcadas. Cabe mencionar que éste estudio se llevó a cabo a lo largo de las márgenes de carreteras altamente concurridas, por lo que las especies se encuentran expuestas a contaminantes diferentes de las que se encuentran en áreas industriales.

En 2008, Lakshmi, Sravanti, & Srinivas publicaron "Air Pollution Tolerance Index of Various Plant Species Growing in Industrial Areas", en el cual evaluaron el APTI de 24

especies en diferentes lugares dentro de áreas con una alta actividad industrial en Visakhapatnam, India; dentro de la metodología, en el análisis de los datos incluyeron la evaluación de la correlación entre cada variable y el APTI, encontrándo que el Ácido ascórbico, y la clorofila total presentan altos valores de correlación con el APTI, con un valor de 0,83 y 0,71 respectivamente, mientras que el pH y el CRA no presentan una correlación significativa; por lo tanto, entre mayor sean el Ácido ascórbico y la clorofila, mayor será el APTI. Finalmente, las especies que recomiendan debido a su alto APTI, son *Ficus religiosa, Zizypus jujuba, Phyllantus emblica* y *Cassia fistula*. En un trabajo similar, publicado por Mondal, Gupta, & Datta, (2011), se encontró nuevamente una alta correlación entre el Ácido ascórbico y el APTI, sin embargo, en esta ocasión el CRA fue el que presentó una correlación significativa, con un valor de 0,2556; mientras que la clorofila presentó tan sólo una correlación de 0,0258.

En el 2009 se registra el primer trabajo realizado en África, más exactamente en Nigeria, publicado por Agbaire & Esiefarienrhe, titulado "Air Pollution tolerance index (APTI) of some plants around Otorogun Gas Plant in Delta State, Nigeria", en donde evidenciaron que el APTI varía dependiendo del nivel de contaminación al que se encuentran expuestas las plantas, obteniendo un APTI mayor en el área de mayor concentración, para todas las especies evaluadas, que en la zona "control" de menor contaminación ; sin embargo el nivel de incremento varía entre especies. Para el 2013 se publicó nuevamente un trabajo realizado en Nigera, titulado "Evaluation of Air Pollution Tolerance Index of Plants and Ornamental Shrubs in Enugu City: Implications for Urban Heat Island Effect" por Enete, Chukwudeluzu, & Okolie, en el cual comparan el APTI entre árboles y arbustos ornamentales, encontrando que los árboles presentan una mayor tolerancia a la contaminación que los arbustos.

En Colombia la evaluación del APTI en especies de plantas se registra en un proyecto de investigación realizado por el Jardín Botánico de Bogotá, donde se encontró que la especie nativa *Lafoensia acuminata*, conocida comúnmente como guayacán de Manizales, se encuentra en el rango de "tolerante" a la contaminación del aire, al tener un APTI entre 47-72, determinándose como una de las especies vegetales indispensables

en el arbolado urbano por su contribución en la mejora de calidad del aire de la capital y soportar la contaminación de material particulado PM10 (Jardín Botánico José Celestino Mutis, 2019). Existe otro estudio de la autoría de Vargas, 2016, realizado en Bogotá, que aunque no evaluó el APTI, determinó tres de los cuatro parámetros bioquímicos del índice, en las especies *Lafoensia acuminata*, *Prunus serotina* y *Croton bogotanus*, documentando las diferencias del ácido ascórbico, pH y clorofila total de árboles ubicados en diferentes localidades de la ciudad.

4.2. Marco conceptual

4.2.1. Contaminación atmosférica en las ciudades.

Entendiéndose la contaminación atmosférica como la presencia de materias o formas de energía en la atmósfera que puedan representar riesgo o perjuicio para la vida (Aránguez et al., 1999); se trata de una problemática creciente en las urbes desde la revolución industrial y el uso masivo de los combustibles fósiles, sumado en la actualidad al constante y desordenado crecimiento urbano (Lacasaña-Navarro, Aguilar-Garduño, & Romieu, 1999), lo cual a su vez incrementa las actividades industriales, las tasas de motorización, y el consumo de combustible (Franco R, 2012). Así, los principales contaminantes presentes en las urbes son precisamente los provenientes de los vehículos, cuyo funcionamiento depende de los combustibles fósiles, y de fuentes fijas dentro de las cuales se encuentran las industrias, los dispositivos de climatización, y los procesos de eliminación de residuos. Como bien menciona Ballester, (2005) dichos contaminantes son, el material particulado (PM), el dióxido de azufre (SO_2), el dióxido de nitrógeno (NO_2), el monóxido de carbono (CO), los compuestos orgánicos volátiles (COVs), el plomo (Pb), y el ozono troposférico (O_3); de los cuales, el que causa una mayor afección en los humanos, según la Organización Mundial de la Salud, (2018) es el PM, puesto que consiste en una compleja mezcla de partículas, tanto sólidas como líquidas, de sustancias orgánicas e inorgánicas; como lo son los sulfatos, los nitratos, el amoniaco, el hollín, el cloruro de sodio, además de metales como el aluminio, el manganeso, el cadmio, el cromo, el cobre, el hierro, plomo, zinc y níquel.

4.2.2. PM_{10} (Particulate matter)

Según Ram et al., (2015) uno de los principales contaminantes del aire en las ciudades es el material particulado (PM por sus siglas en inglés *Particulate matt*er), el cual se divide en PM_{10} y $PM_{2,5}$, correspondientes a partículas con diámetro menor de 10µm y menor de 2,5µm respectivamente; estas partículas pueden llegar a generar graves problemas de salud en los humanos, debido precisamente a su fino tamaño, lo cual les permite alcanzar fácilmente los pulmones e incluso, el torrente sanguíneo. Sus principales fuentes son los motores de combustión interna como los de los automóviles y los camiones, procesos industriales, el polvo resuspendido, el polvo de construcciones, el humo de cigarrillos, y la combustión de madera (Kaur et al., 2017). Cabe mencionar que factores meteorológicos como la humedad relativa, la velocidad y la dirección del viento influyen en los niveles de PM_{10} y $PM_{2,5}$ de un lugar determinado (Ram et al., 2015).

Como lo menciona Arciniégas, (2012), la presencia de PM ocasiona diversos impactos tanto a la vegetación, como al hombre, donde en este último se encuentra relacionado con el incremento en el riesgo de muerte por enfermedades cardiopulmonares. Incluso, siendo el contaminante más estudiado, según Ballester, (2005) se ha descubierto que un incremento de 10 $\mu g/m^3$ en la concentración de PM_{10} aumentaría a su vez de un 0,5 a 2% la mortalidad por causas cardiorrespiratorias, y de un 0,2 a 1% la mortalidad por otras enfermedades ligadas a éste contaminante.

4.2.3. Contaminación atmosférica en Bogotá

Siendo Bogotá una de las ciudades más grandes de América Latina, se encuentra ligada a la problemática anteriormente expuesta de la contaminación atmosférica (Franco R, 2012), debida principalmente al transporte, el cual genera el 96,7% de emisiones de CO, el 77% de NOx y el 89,4% de COVNM; y a la creciente actividad económica, donde las fuentes fijas emiten 64,4% de PM_{10} y 82,4% de CO dentro del perímetro urbano (Moreno, 2008)

Si bien Bogotá ha sido catalogada, como lo menciona Franco R, (2012), como una de las ciudades con mayor contaminación atmosférica en América Latina, Gaitán, Behrentz, & Cancino, (2007) y García & Rojas, (2016), después de análisis en las concentraciones de

los diferentes contaminantes de la ciudad, afirman que, el SO_2, el NO_2, el CO y el O_3, no representan un problema en la calidad del aire de Bogotá, puesto que las concentraciones registradas en la red de monitoreo tienden a ser inferiores a los límites establecidos

4.2.4. PM_{10} en Bogotá:

Ahora bien, desde que se inició el monitoreo de contaminantes en el aire de Bogotá, como bien mencionan García & Rojas, (2016), el contaminante al que mayor importancia se le ha dado, es al PM_{10}, puesto que su concentración ha superado varias veces los límites de la normatividad existente; así mismo, Gaitán et al., (2007) evidenciaron que el PM_{10} es el contaminante crítico en Bogotá.

Según el estudio elaborado por García & Rojas, (2016), el origen del PM_{10} en Bogotá es tanto externo como interno, el primero, el cual presenta una mayor magnitud, proviene de los municipios aledaños al occidente de la ciudad, como lo son Soacha, Funza, Mosquera y Madrid, y el segundo es generado por las fuentes que emplean carbón como combustible, y las fuentes móviles que circulan sobre las vías principales de la ciudad, las cuales se concentran principalmente en la localidad de Kennedy. Ahora bien, la composición de PM, aunque difiere entre sectores dentro de la ciudad, en general, las fracciones que presentan un mayor aporte son las carbonáceas, las cuales aportan entre el 37 y el 42%, las geológicas, es decir, las asociadas al polvo fugitivo y resuspendido, la materia orgánica, y la fracción iónica con un aporte entre el 5 y el 8% (F. A. Vargas & Rojas, 2010).

En cuanto a los perjuicios que el PM_{10} genera a la salud humana, según Solarte et al., (1999), existe una relación significativa entre el incremento de la concentración de dicho contaminante, y el aumento en el número de consultas por enfermedades respiratorias en menores de 14 años en la ciudad de Bogotá, en donde, a partir de los resultados, se predice que una disminución del $10\mu g/m^3$ provocaría a su vez una disminución del 17% en el número de consultas por enfermedades respiratorias.

4.2.5. Los árboles como sumideros.

Como bien lo mencionan Ram et al., (2014), los árboles funcionan como sumideros, tanto de contaminantes gaseosos, como de material particulado, debido a la capacidad que presentan de acumular contaminantes en la superficie de sus hojas, y a la absorción de éstos durante intercambios gaseosos, razón por la que se les ha empleado en las últimas décadas en la mitigación de la contaminación del aire en las ciudades.

La eficacia de intercepción y retención depende de varios factores como la altura de la planta, la forma y área superficial de las hojas, la proximidad de la planta a avenidas, y el tipo de vehículos que transcurren por éstas (a base de diésel o gasolina) (Kaur et al., 2017); así como de factores climáticos, en donde la humedad y la luz juegan un papel importante, puesto que al estar húmedas las superficies de la planta, la tasa de absorción de contaminantes mejora hasta un 10%, debido a que en estas condiciones, tanto el tallo, las ramas, y las hojas se dedican al proceso de absorción, y, cuando se encuentran expuestas a la luz, ésta estimula la apertura de estomas y los procesos fisiológicos (Shannigrahi et al., 2004). Sin embargo, los contaminantes atmosféricos pueden ser perjudiciales para las plantas, las cuales pueden presentar cambios agudos y crónicos morfológicamente, anatómicamente, fisiológicamente, e incluso bioquímicamente (Kaur et al., 2017), además, según Das, Chatterjee, & Mukherjee, (2018), el material particulado suspendido se incrusta en la cutícula de la hoja, lo cual puede reducir la intensidad de la luz, y por ende interferir en el proceso fotosintético y el equilibrio térmico de la hoja; de igual manera, los contaminantes gaseosos y en partículas se depositan en la superficie de la hoja, y a través de los estomas se mueven a lo largo de la corriente de transpiración, acumulándose por lo tanto a niveles tóxicos en las puntas y márgenes.

4.2.6. Tolerancia ambiental

Dado que todos los organismos requieren diferentes condiciones ambientales para su óptimo desarrollo, según Escolástico et al., 2013; la tolerancia ambiental puede definirse como el límite de un rango en el que un organismo puede crecer, reproducirse y en general sobrevivir a un factor ambiental en un rango establecido; en otras palabras, es la brecha máxima en el que los organismos pueden sobrevivir dentro de un cierto rango de un factor

determinado, pero no pueden sobrevivir o desarrollarse adecuadamente si hay demasiado o muy poco de ese factor.

4.2.7. Índice de Tolerancia a la Contaminación del Aire (APTI)

Como bien menciona Ram et al., (2015) la contaminación del aire afecta la fisiología de las plantas, degradando los pigmentos, dañando las membranas celulares, alterando la producción de metabolitos antioxidantes y modificando las actividades de las enzimas antioxidantes; en donde la respuesta entre especies e individuos difiere, según su tolerancia a la contaminación atmosférica. Por lo tanto, la tolerancia o susceptibilidad de las plantas a la contaminación del aire puede ser evaluada por medio de parámetros bioquímicos, de donde surge el Índice de Tolerancia a la Contaminación del Aire (APTI por sus siglas en inglés: *Air Pollution Tolerance Index*), el cual toma cuatro parámetros bioquímicos, que en su conjunto reflejan el nivel de tolerancia, y los cuales se ha demostrado se ven afectados por la contaminación del aire en zonas urbanas (Swami, Bhatt, & Joshi, 2004).

4.2.7.1. Ácido ascórbico

Se trata de una molécula antioxidante presente naturalmente en las plantas, la cual es de gran importancia en la síntesis de la pared celular (manteniendo su estabilidad), la fijación de carbono fotosintético (protegiendo las enzimas involucradas en el ciclo de fijación de CO_2), la defensa y la división celular (Das et al., 2018). Siendo por lo tanto considerado como elemento determinante de la tolerancia de las plantas a la contaminación atmosférica, e incluso, en diversos estudios como los elaborados por Lakshmi et al., (2008) y Mondal et al., (2011) se ha demostrado la alta correlación existente entre el ácido ascórbico y el APTI, con valores de R^2 de 0,83 y 0,95 respectivamente, donde, entre mayor sea el valor de ácido ascórbico, mayor será la tolerancia de la planta a la contaminación atmosférica.

4.2.7.2. Clorofila

Según Das et al., (2018), se trata de un elemento primordial en las plantas, puesto que refleja la productividad de las mismas, jugando un importante rol en las fotosíntesis. Ésta

puede variar de una especie a otra, dependiendo de factores climáticos, edáficos, así como del nivel de contaminación atmosférica (Ramírez, Cilia, & Flores-Ramírez, 2017). La clorofila suele verse fuertemente afectada por la contaminación atmosférica, principalmente por altas concentraciones de SO_2 (dióxido de azufre) y NO_2 (óxidos de nitrógeno), los cuales son los contaminantes más fitotóxicos, generando la reducción de pigmentos fotosintéticos, lo que a su vez genera un efecto inhibitorio en el intercambio fotosintético de CO_2. Por lo tanto, si una planta presenta valores altos de clorofila total bajo condiciones de alta contaminación atmosférica, es tolerante a la contaminación (Kaur et al., 2017).

4.2.7.3. pH

El pH del extracto foliar se encuentra fuertemente ligado a las dos variables anteriormente mencionadas, puesto que un pH alto, es decir, alcalino, aumenta la eficiencia de conversión de un azúcar hexosa en ácido ascórbico (Das et al., 2018); además, según lo mencionado por Liu & Ding, (2007) el pH juega un rol importante en la eficiencia fotosintética, en donde, si el pH es bajo, es decir, ácido, el proceso de fotosíntesis se ve reducido.

Como menciona Kaur et al., (2017), el pH foliar se encuentra fuertemente ligado al tipo de contaminantes que hay en un lugar determinado, puesto que la presencia de un contaminante ácido provoca un pH bajo (ácido) en las hojas, mientras que el polvo al acumularse en la lámina foliar se disuelve en la savia celular provocando un pH foliar alcalino.

4.2.7.4. Contenido relativo de agua (CRA)

También conocido como RWC (por sus siglas en inglés: *Relative Water Content*), según Villalobos, Umaña, & Sterling, (1990) es una integración tanto de componentes aéreos como subterráneos, lo cual le confiere a la planta la capacidad de tolerar el déficit hídrico, siendo, por lo tanto, considerado como un indicador de tolerancia a la desecación. Éste se encuentra asociado a la permeabilidad protoplasmática de las células, por lo que un bajo CRA resulta en una temprana senescencia de las hojas (Krishnaveni, Chandrasekar, Amsavalli, Madhiyan, & Durairaj, 2013).

El APTI entonces se calcula con la fórmula generada por Singh and Rao (1983) citado en Gholami, Mojiri, & Amini, (2016):

$$APTI = [A(T + P) + R]/10$$

Ecuación 1. Air Pollution Tolerance Index.

Donde:

A = Ácido ascórbico (mg/g)

T = Clorofila total (mg/g)

P = pH del extracto foliar

R = Contenido relativo de agua (%)

Éste se mide dentro de un rango del 0-100, en donde un valor menor a 1 (< 1) equivale a muy sensible, un valor entre 1-16 a sensible, uno entre 16.1-29 a intermedio, y uno entre 29.1-100 a tolerante (Kaur et al., 2017).

4.2.8. Especies seleccionadas

***Ficus soatensis*.**

Comúnmente conocido en la ciudad de Bogotá como **Caucho Sabanero**, es un árbol de la familia Moraceae, el cual, como lo mencionan CAR, Barrero, Camelo, Ovalle, & Rozo, (2012) es originario de Santander y Boyacá, más específicamente de Soatá, de donde recibe su nombre; puede alcanzar alturas de hasta 20 m, su copa es amplia, globosa, con ramas gruesas extendidas, las cuales a su vez presentan hojas simples, elípticas de 10cm de largo y 6cm de ancho, alternas, lisas, coriáceas, de color verde oscuro brillante.

Según Alcaldía Mayor de Bogotá, et al., (2010) es una especie apta para el arbolado urbano, presentando una resistencia “media” a la contaminación , además de dar estabilidad al suelo, ayudar en la regulación climática y el control de la temperatura. Además, se encuentra recomendada para la arborización urbana de Bogotá en el Manual de silvicultura Urbana del Distrito (Alcaldía Mayor de Bogotá & Jardín Botánico José Celestino Mutis, 2011)

Lafoensia acuminata.

Conocido comúnmente como **Guayacán de Manizales** en la ciudad de Bogotá, es un árbol de la familia Lythraceae que habita entre los 1.300 y 2.900 msnm, encontrándose por lo tanto en las tres cordilleras del país y en la Sierra Nevada de Santa Marta; puede alcanzar hasta 25 m de altura, su copa es densa y de forma cónica a ovalada, con ramas de crecimiento horizontal, cuyas hojas son simples, opuestas, de 10 cm de largo y 4 cm de ancho aproximadamente, las cuales son brillantes, y se tornan rojizas al madurar (CAR et al., 2012).

Según La Alcaldía Mayor de Bogotá et al., (2010) es una especie apta para el arbolado urbano, generando un aporte estético, cultural y simbólico, estabilidad al suelo, alimento y nicho a la avifauna, además de aportar a la regulación climática, y presentar una resistencia "media" a la contaminación del aire; incluso, según Amaya, (2019) ser considerado por el Jardín Botánico de Bogotá como el árbol más resistente a la contaminación del aire de la ciudad, por lo que se ha intensificado su siembra en todo el Distrito. Al igual que el Caucho sabanero es una de las especies recomendadas en el Manual de silvicultura Urbana (Alcaldía Mayor de Bogotá & Jardín Botánico José Celestino Mutis, 2011)

Tecoma stans.

Conocido en Bogotá como **Chicalá, Chirlobirlo** o **Flor Amarillo**, según CAR et al., (2012) es un árbol de la familia Bignoniaceae, que se encuentra en Centro y Suramérica, habitando entre los 1.600 y 2.800 msnm; puede alcanzar hasta los 20 m de altura, sin embargo, en la ciudad tiende a presentar alturas hasta los 5m, con una copa aparasolada, densa, de ramificación abundante, cuyas hojas son compuestas, opuestas, de aproximadamente 25 cm de largo con 15 cm de ancho, conformadas por 5 a 7 foliolos de borde aserrado envés pubescente y nervadura reticulada.

Según La Alcaldía Mayor de Bogotá et al., (2010) es una especie apta para el arbolado urbano, presentando una resistencia "media" a la contaminación del aire, generando además un aporte estético gracias a su llamativa floración, y cumpliendo una función de atenuación de partículas, vientos y olores. Al igual que las especies anteriores, se

recomienda su implementación en el arbolado urbano de Bogotá (Alcaldía Mayor de Bogotá & Jardín Botánico José Celestino Mutis, 2011).

Dodonaea viscosa.

Conocido comúnmente como **Hayuelo** en Bogotá, es un arbusto de la familia Sapindaceae que habita entre los 2.200 y 2.900 msnm, encontrándose en Colombia en las tres cordilleras y en las islas de San Andrés y Providencia; puede llegar a alcanzar los 7m de altura, sin embargo, en Bogotá tiende a presentar alturas de 1-3m, su copa es aparasolada, densa, con abundantes ramas, cuyas hojas, simples, alternas y lisas, miden aproximadamente 7cm de largo y 2,5 cm de ancho (CAR et al., 2012).

Según La Alcaldía Mayor de Bogotá et al., (2010) es una especie apta para el arbolado urbano, presentando una resistencia "media" a la contaminación del aire, además de estabilizar el suelo, provisionar de nicho y alimento a la avifauna, y aportar en la regulación climática. Nuevamente se trata de una especie recomendada según el Manual de Silvicultura Urbana para Bogotá (Alcaldía Mayor de Bogotá & Jardín Botánico José Celestino Mutis, 2011)

Citharexylum subflavescens.

Comúnmente conocida en Bogotá como **Cajeto, Garagay** o **Urapo**, es un árbol de la familia Verbenaceae, el cual como mencionan CAR et al., (2012) habita entre 1.800 y 2.800 msnm, encontrándose en Colombia en las cordilleras Central y Oriental; Puede alcanzar hasta 20m de altura, sin embargo, en Bogotá se registran alturas máximas de 10m, su amplia copa va desde redondeada hasta piramidal, con ramas escasas de forma cuadrangular, cuyas hojas simples, opuestas, cartáceas, de haz verde oscuro y envés ferrugíneo debido a las cortas y suaves vellosidades presentes en él, son de 20cm de largo y 8cm de ancho aproximadamente.

Es una de las especies recomendadas en el Manual de Silvicultura para Bogotá (Alcaldía Mayor de Bogotá & Jardín Botánico José Celestino Mutis, 2011), además, se encuentra catalogada como especie apta para el arbolado urbano según La Alcaldía Mayor de Bogotá et al., (2010), cumpliendo una función de atenuación de partículas, vientos y

olores, de captura de CO_2, además de brindar estabilidad al suelo, no obstante, su resistencia a la contaminación del aire es baja.

Acacia melanoxylon.

Conocida en Bogotá como **Acacia japonesa**, es un árbol de la familia Fabaceae-Mimosoideae, originario del Este de Australia, cultivada alrededor del mundo (Romero, 2015), en Colombia habita entre los 2.000 y 2.800 msnm, en las cordilleras Central y Oriental; Puede llegar a alcanzar alturas de 20m, con una copa cónica, presenta follaje distribuido en aglomerados, sus hojas nacen recompuestas y posteriormente se transforman en "simples", denominadas filodios, éstos son alternos, de aproximadamente 10cm de largo y 2cm de ancho, son lisos, con nerviación paralela (CAR et al., 2012).

Aunque esta especie se encuentra ampliamente distribuida en la ciudad de Bogotá (con 43.836 individuos al 2010), y presenta una alta resistencia a la contaminación del aire, se encuentra catalogada como no apta para el arbolado urbano, puesto que presenta susceptibilidad a volcamiento y desgarre de sus ramas (Alcaldía Mayor de Bogotá et al., 2010), así mismo, no se encuentra dentro de las especies recomendadas por el Jardín Botánico en el Manual de Silvicultura Urbana para Bogotá (Alcaldía Mayor de Bogotá & Jardín Botánico José Celestino Mutis, 2011)

Ligustrum lucidum.

Conocida como **Jazmín de la China** es un árbol de la familia Oleaceae, originario, precisamente, del Oeste y Sur de China, siendo introducida y naturalizada en los trópicos (Bernal, 2015a).

Según La Alcaldía Mayor de Bogotá et al., (2010) presenta alturas menores a los 10m, su copa cónica, densa, presenta ramas extendidas, cuyas hojas son simples, opuestas, coriáceas, y brillantes; se encuentra catalogado como especie apta para el arbolado urbano, presentando una alta resistencia a la contaminación del aire, además de proveer de nicho y alimento a las aves, y cumpliendo funciones de regulación climática y captación de CO_2. Se encuentra entre las especies recomendadas en el Manual de

Silvicultura para Bogotá (Alcaldía Mayor de Bogotá & Jardín Botánico José Celestino Mutis, 2011)

Pittosporum undulatum.

Conocido en Bogotá como **Jazmín de Cabo** o **Laurel Huesito**, es un árbol de la familia Pittosporaceae, originario del este de Australia, y cultivada en climas templados alrededor del mundo (Bernal, 2015b). En Colombia habita entre los 1.700 y 2.800 msnm, en la cordillera Oriental; puede alcanzar una altura de hasta 15m, sin embargo, en Bogotá se han registrado alturas máximas de 10m, su copa puede ser piramidal a aparasolada, muy densa, con ramificación así mismo abundante, cuyas hojas son simples, alternas, de borde ondulado, coriáceas y lisas.

Según La Alcaldía Mayor de Bogotá et al., (2010) es una especie apta para el arbolado urbano, siempre y cuando se tengan en cuenta criterios de emplazamiento, puesto que debe ser sembrada únicamente en separadores anchos y zonas verdes amplias; presenta una alta resistencia a la contaminación del aire, además de brindar funciones de regulación climática, provisión de nicho y alimento a la avifauna y de captación de CO_2.

Cotoneaster pannosus.

Conocido comúnmente en Bogotá como **Holly liso** es un arbusto de la familia Rosaceae, originario de China y cultivado en todo el mundo (Pérez, 2015); en Colombia habita entre los 2.000 y 3.000 msnm, en la cordillera Oriental. Puede alcanzar alturas de hasta 7 m, sin embargo, en la ciudad se registran alturas menores de 5 m, su copa es amplia, de densidad media, con ramas ascendentes cuyas hojas son simples, alternas, de 4 cm de largo y 3 cm de ancho aproximadamente, de envés blancuzco, y haz verde a rojizo, coriáceas (CAR et al., 2012)

Según La Alcaldía Mayor de Bogotá & Jardín Botánico José Celestino Mutis, (2011) es una de las especies recomendadas para el arbolado urbano de Bogotá, puesto que presenta una alta resistencia a la contaminación del aire, un aporte estético, que incluso aporta a la valorización de la propiedad privada y el espacio público, y provee de nicho y alimento

a la avifauna, cabe mencionar que según Alcaldía Mayor de Bogotá et al., (2010) es una especie apta para el arbolado urbano de Bogotá, acorde con criterios de emplazamiento.

Sambucus nigra.

Conocido en Bogotá como **Sauco**, es un arbusto de origen europeo según Muñoz, Montes, & Wilkomirsky, (2001); En Colombia habita entre los 1.800 y 3.000 msnm, en las cordilleras Oriental y Central. Puede llegar hasta los 6 m de altura, no obstante, en la ciudad se reportan alturas menores a los 5 m, su copa es globosa, densa, cuyas hojas son compuestas, opuestas, de aproximadamente 35 cm de largo y 25 cm de ancho, con foliolos aserrados, y coriáceos (CAR et al., 2012).

Es una de las especies recomendadas para el arbolado urbano de Bogotá (Alcaldía Mayor de Bogotá & Jardín Botánico José Celestino Mutis, 2011); además es considerada como apta para el arbolado urbano por La Alcaldía Mayor de Bogotá et al., (2010), puesto que presenta una alta resistencia a la contaminación del aire, además de aportar estética, gracias a su denso follaje e inflorescencias abundantes, y proveer de nicho y alimento a la avifauna

5. OBJETIVOS

5.1. General

Determinar la tolerancia a la contaminación del aire de 10 especies leñosas presentes en la zona de mayor concentración de PM_{10} en la ciudad de Bogotá.

5.2. Específicos

- Identificar el nivel de tolerancia o sensibilidad a la contaminación atmosférica, de las especies evaluadas, con base en el índice de tolerancia a la contaminación del aire (APTI)
- Analizar la influencia de los parámetros bioquímicos que conforman el APTI sobre la tolerancia a la contaminación atmosférica de las especies estudiadas.
- Determinar las especies más tolerantes a los altos niveles de contaminación atmosférica en la ciudad de Bogotá.

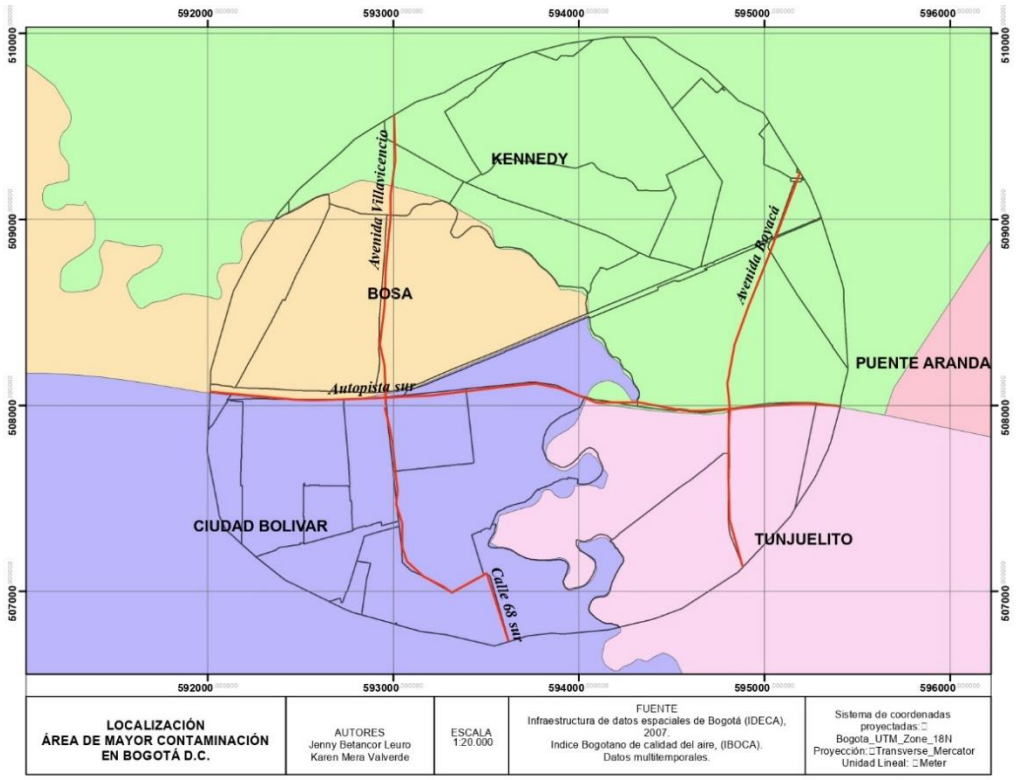
6. ÁREA DE ESTUDIO

6.1. Delimitación del área de mayor contaminación en Bogotá.

Para llevar a cabo la delimitación del área de mayor contaminación en Bogotá se tuvieron en cuenta los datos de PM_{10} recopilados por las estaciones de calidad del aire de Bogotá en el período de tiempo 2012-2018. La información se obtuvo del Visor Geográfico Ambiental de la ciudad (Secretaria Distrital de Ambiente, 2019), donde se encuentra disponible en formato .xlsx y .shp.

Los datos del .xlsx fueron ordenados de manera descendente, para así obtener los puntos máximos de PM_{10} que se han dado en la ciudad; de la totalidad de los datos se obtuvieron cuartiles, donde se tomaron los valores pertenecientes al 50% superior, y, nuevamente se obtuvieron cuartiles de éstos, para finalmente tomar el 25% donde se encontraban los valores más altos de concentración de PM_{10} (70-90 $\mu g/m^3$) registrados en el periodo 2012-2018.

Posteriormente en el software ArcMap de ArcGIS se separaron los valores obtenidos anteriormente, y se cruzaron los shapes correspondientes a cada año, dando como resultado el área que se observa en el mapa No 1, correspondiente a 8,65 Km^2; siendo ésta la que mayor concentración de PM_{10} ha presentado en la ciudad durante el periodo 2012-2018.



Mapa 1. Zona de mayor concentración de PM_{10} entre el año 2012 y 2018 en Bogotá D.C. Fuente: Propia.

6.2. Descripción del área de estudio

El área de estudio se encuentra dentro de la zona de mayor contaminación de Bogotá, donde las concentraciones de PM_{10} en el periodo 2012-2018 presentaron valores dentro del rango 70-90 $\mu g/m^3$. Con la finalidad de tener un mejor control sobre las condiciones atmosféricas que se presentan en dicha zona, el área de estudio se reduce a un sector situado en el sur occidente de la ciudad, en las localidades de Ciudad Bolívar y Bosa, más exactamente en los barrios Madelena, Villa de río y Olarte.

Se caracteriza por ser un área residencial con barrios en su mayoría estrato 3 y proximidad a vías principales como la autopista sur, que constituye la vía principal de salida de Bogotá por el sur occidente. Por consiguiente, presenta un tránsito constante de buses, volquetas, camiones de carga pesada y dos vías destinadas al sistema de transporte público Trasmilenio, los cuales, en su mayoría, funcionan con diésel sin ningún sistema de control de sus emisiones.

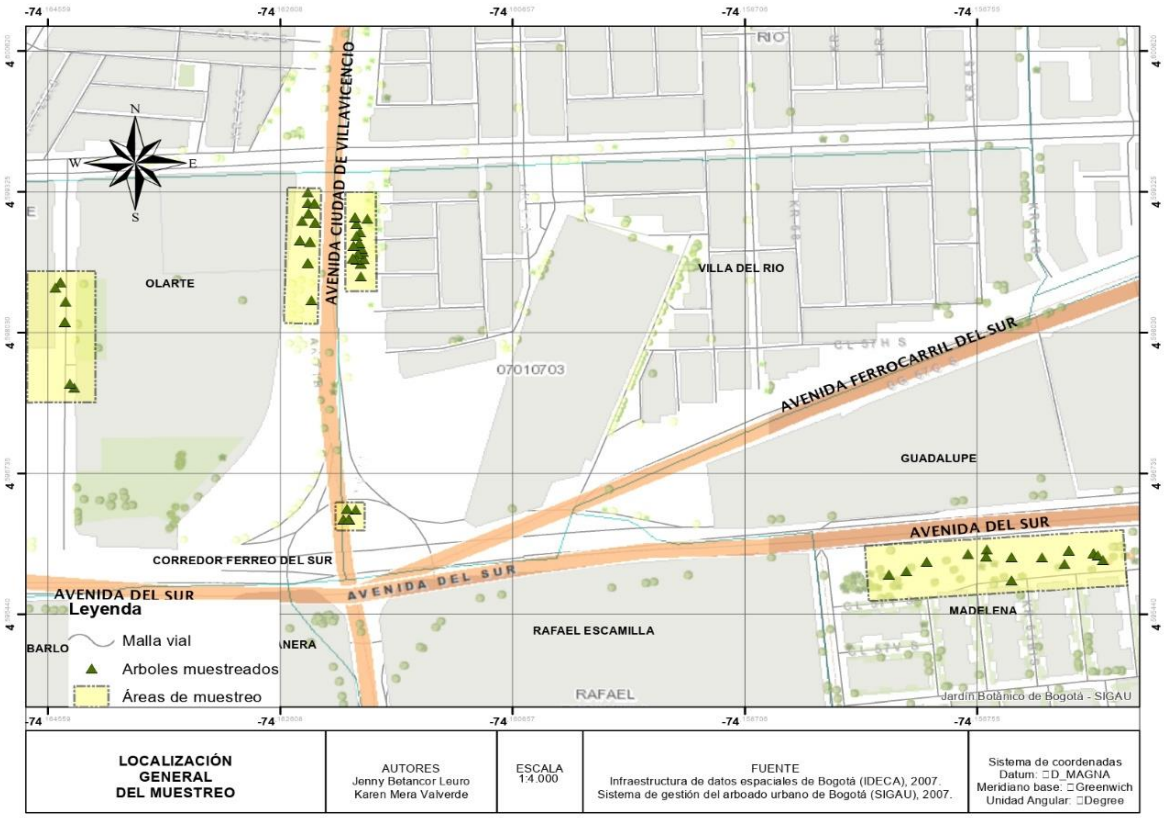
El clima de Bogotá es moderadamente frío, con cerca de 14ºC en promedio. El comportamiento de la precipitación es bimodal, presentándose dos épocas secas y dos de mayores lluvias; la del primer semestre tiene como meses lluviosos abril y mayo, y en el segundo semestre el mes más lluvioso es octubre seguido por noviembre; la precipitación de la zona delimitada con mayor contaminación es de 700 a 800 mm anuales, con una humedad relativa semi seca. (Alcaldía Mayor de Bogotá & Jardín Botánico José Celestino Mutis, 2011). Típicamente se presentan vientos en sentido oriente-occidente en horas de la mañana mientras que en las horas de la tarde los vientos predominantes viajan hacia el norte de la ciudad. La velocidad media del viento es de 1 m/s, siendo comúnmente el mes de agosto la época más fuerte de vientos en la ciudad. (Behrentz, 2009)

7. METODOLOGÍA

La metodología implementada en este estudio es de carácter investigativo, la obtención de información secundaria se realizó mediante motores de búsqueda académicos, como Google scholar y Science direct, donde se encontraron publicaciones indexadas a diversas revistas científicas, tales como: Journal of Environmental Biology, World Environment, The EcoScan, Territorios, entre otras. La información primaria corresponde a los resultados obtenidos tras aplicar la metodología descrita a continuación.

7.1. Selección de los puntos de muestreo

Los criterios que se tuvieron en cuenta para seleccionar los puntos de muestreo fueron, en primer lugar, la proximidad a vías principales como la Autopista sur y la Avenida Villavicencio, las cuales mantienen un tráfico vial alto durante las horas pico de la mañana. En segundo lugar, la diversidad de especies nativas y foráneas sembradas en la zona, con alturas y diámetros similares que dieran indicios de tener la misma edad.



Mapa 2. Localización del área de estudio, mostrando en color amarillo los puntos de muestreo. Fuente: Propia

7.2. Selección de especies y diseño de muestreo.

A partir de una base de datos proporcionada por el Jardín Botánico de Bogotá se realizó un listado de las especies sembradas en el área delimitada de mayor contaminación de Bogotá; posteriormente, haciendo uso del software ArcMap de ArcGIS, se contabilizó el número de individuos existentes por cada una de las especies, haciendo grupos de más de 1000 individuos, de 500 a 999 individuos y otro de 5 a 459 individuos, de esta forma se establecieron las especies opcionales por su abundancia en el área.

Finalmente, para hacer la selección definitiva de las especies, se visitó el área de estudio y se escogieron las que cumplieran los siguientes criterios:

- Mínimo 10 especies leñosas sembradas en el área de estudio, con el fin de abarcar ampliamente el área de estudio.
- Mínimo 5 individuos por especie, para que sea estadísticamente representativo.

- Individuos sembrados en las aceras que limitan con la Autopista sur y la Avenida Villavicencio, o a una distancia menor de 500 metros.
- Individuos sin problemas fitosanitarios a la vista.

Especies seleccionadas:

- *Ficus soatensis*
- *Lafoensia acuminata*
- *Tecoma stans*
- *Dodonaea viscosa*
- *Citharexylum subflavescens*
- *Acacia melanoxylon*
- *Ligustrum lucidum*
- *Pittosporum undulatum*
- *Cotoneaster pannosus*
- *Sambucus nigra*

El muestreo se llevó a cabo el día 22 de agosto de 2019 en las horas de la mañana, iniciando a las 6:30 am hasta las 8:30 am. El número de muestras se estableció acorde a lo sugerido en los estudios expuestos en el estado del arte, en donde el número de individuos muestreados por especie correspondía a mínimo 3 y máximo 5, con 4 réplicas por individuo. De tal modo, En el presente estudio se muestrearon 5 individuos por especie, con 4 réplicas por individuo, para un total de 200 muestras. Las muestras se tomaron a la altura de la mitad de las copas y desde cada punto cardinal (N, S, E, O). La equivalencia de una muestra correspondió a varias hojas (entre 5 a 30 hojas, dependiendo del tamaño), a excepción de las especies con hojas compuestas, en las que una muestra correspondió a 2 hojas.

Los individuos muestreados se georreferenciaron con un GPS Garmin, y las muestras colectadas se introdujeron en bolsas herméticas de plástico, rotuladas, y trasladadas en hieleras al laboratorio de química y calidad de aguas de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Posteriormente, se realizaron los análisis de las muestras disponiendo de

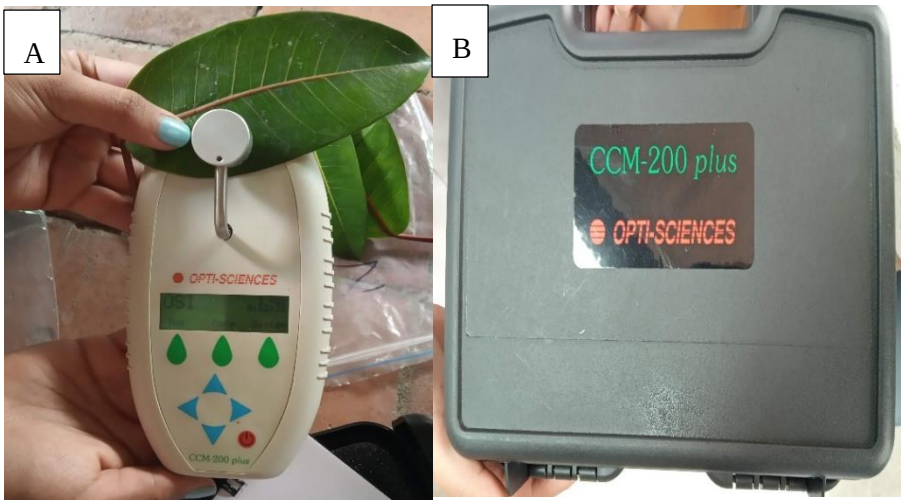
a 50 muestras por variable: pH, clorofila total, contenido relativo de agua y contenido de ácido ascórbico, para un total de 200 muestras analizadas.

7.3. Determinación de las variables del APTI (Índice de tolerancia a la contaminación del aire)

7.3.1. Determinación de la clorofila total.

Para conocer la clorofila total de la hoja de cada especie, se utilizó el equipo medidor de clorofila CCM-200 plus de la marca Opti-sciences, el cual mide la transmitancia de una longitud de onda que cae dentro del rango de absorbancia de clorofila, y calcula un valor de CCI (Índice de contenido de clorofila) que es proporcional a la cantidad de clorofila de la muestra. Para obtener los datos en unidades de mg/g se realizó una interpolación lineal, para lo cual se relacionaron los valores arrojados por el clorofilómetro con 2 puntos mínimos y 2 puntos máximos de referencia bibliográfica. Las mediciones se realizaron en el laboratorio de silvicultura de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

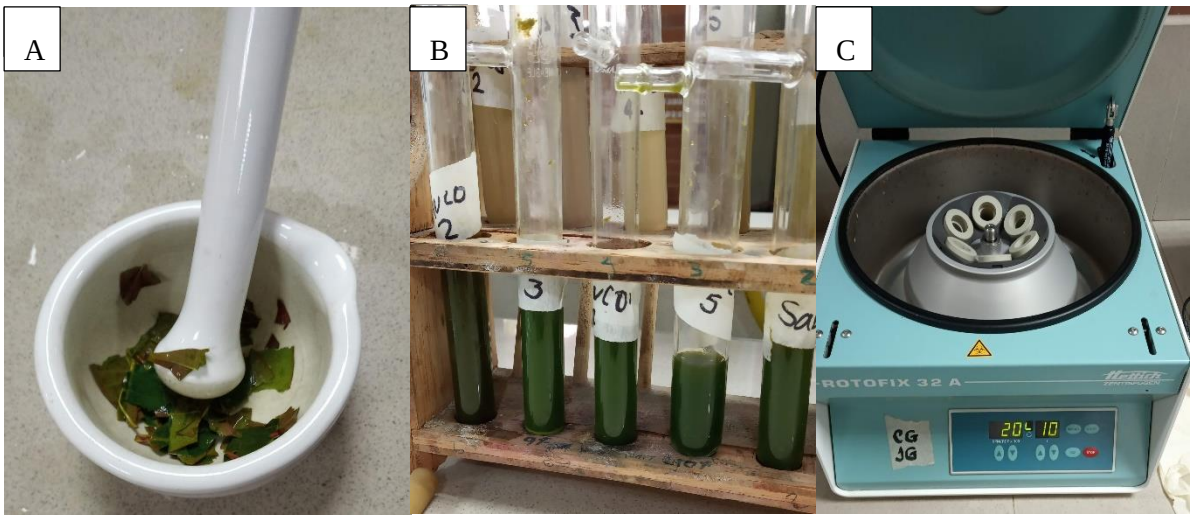
Para poder obtener una media por individuo, se midieron tres hojas, ubicando el medidor en el primer tercio de la lámina foliar, como se observa en la fotografía 1. En el caso de las especies *T. stans* y *S. nigra,* que son de hojas compuestas, se midieron únicamente tres foliolos.



Fotografía 1. A. Equipo medidor de clorofila en funcionamiento. B. especificaciones del equipo. Fuente: Propia

7.3.2. Determinación del pH.

La determinación del pH de las muestras se realizó siguiendo el procedimiento descrito por Ogunkunle et al., (2015) con algunas modificaciones. Se maceraron 2,5 g de cada muestra y posteriormente se incorporó 10 ml de agua destilada en el macerador, se continuó macerando hasta que la solución presentara la tonalidad más verde posible. Inmediatamente, se centrifugó durante 10 minutos a 2000 rpm para obtener el sobrenadante de la solución. El pH se determinó utilizando un medidor de pH de electrodo de vidrio, calibrado.



Fotografía 2. A. Maceración de la muestra. B. Solución de tejido fresco de las hojas. C. Centrifugador utilizado. Fuente: Propia

7.3.3. Determinación del contenido relativo de agua.

El contenido relativo de agua se realizó siguiendo el método estandarizado y descrito por Agbaire & Esiefarienrhe, (2010), con algunas modificaciones.

Para obtener el peso fresco de las muestras las hojas se pesaron el mismo día que se realizó la colecta, en el laboratorio de química y calidad de agua de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, utilizando una balanza analítica (KERN & SOHN). El número de hojas a pesar fue variante según el tamaño de las mismas, así pues, para las especies *D. viscosa* y *A. melanoxylon* se pesaron 10 hojas, para *L. acuminata*, *P. undulatum*, y *C. Pannosus* se pesaron 5 hojas, para *L. lucidum* se pesaron 3 hojas, para *F. soatensis* y *C. subflavescens* se pesó 1 hoja, y para las especies con hojas compuestas;

T. stans y *S. nigra* se pesaron los foliolos que conforman una hoja, es decir, 5 foliolos y 7 foliolos, respectivamente.

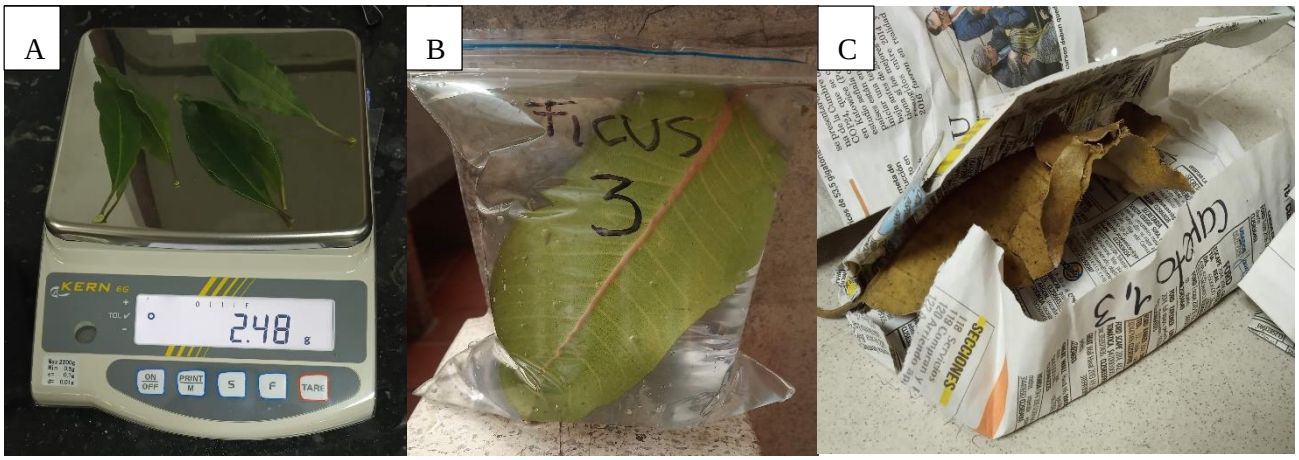
Posteriormente, para determinar el peso turgente, se guardaron las hojas de cada muestra en bolsas Ziploc, las cuales se llenaron de agua y se dejaron durante 5 horas. Luego, con papel absorbente se secó la superficie de las hojas y se pesaron nuevamente en la misma balanza. Cada muestra se guardó en sobres de papel periódico y se llevaron a un horno a 70ºC, programando el tiempo a 5 horas. Finalmente, se pesaron y se realizaron los cálculos, según la ecuación:

$$Contenido\ relativo\ de\ agua\ (\%) = \frac{FW - DW}{TW - DW} * 100$$

Ecuación 2. CRA

Donde:

- FW es el peso fresco (g)
- DW es el peso seco de las hojas (g)
- W es el peso turgente (g)



Fotografía 3. A. Pesaje de muestra de P. undulatum en fresco, B. Muestra de F. soatensis en turgencia, C. Muestras en estado seco. Fuente: Propia

7.3.4. Determinación del ácido ascórbico.

Para la determinación del ácido ascórbico de las muestras colectadas se extrajo la cantidad necesaria de hojas para que pesara 1 gramo y se guardaron en bolsas Ziploc pequeñas debidamente etiquetadas. Posteriormente, se llevaron al Laboratorio de Análisis

Instrumental del Laboratorio de Química de la Facultad de Ciencias y Educación de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, quienes se encargaron de la cuantificación del ácido ascórbico.



Fotografía 4. Empaque por 1 gramo de algunas de las especies para análisis del ácido ascórbico. Fuente: Propia

7.3.5. Determinación del índice de tolerancia a la contaminación del aire (APTI).

El valor del APTI se calculó mediante la fórmula dada a conocer por Singh y Rao en el año 1983:

$$APTI = \frac{(A\ (T + P) + R)}{10}$$

Donde:

- A es el contenido de ácido ascórbico (mg / g)
- T es la clorofila total (mg / g)
- P es el pH del extracto de la hoja
- R es el contenido relativo de agua de la hoja (%)

7.4. Análisis estadístico.

Los análisis estadísticos se llevaron a cabo con el software R, versión 3.6.1, por medio de R studio versión 1.1.463, y, se asignó un nivel de significancia $\alpha = 0.05$ en todos los casos.

Inicialmente se llevaron a cabo la prueba de normalidad de Shapiro, y la prueba de homogeneidad de varianzas de Barlett, las cuales indicaron el uso de pruebas no paramétricas según la naturaleza de los datos. Posterior a esto, se llevó a cabo la prueba Kruskal-Wallis, en la cual se planteó lo siguiente:

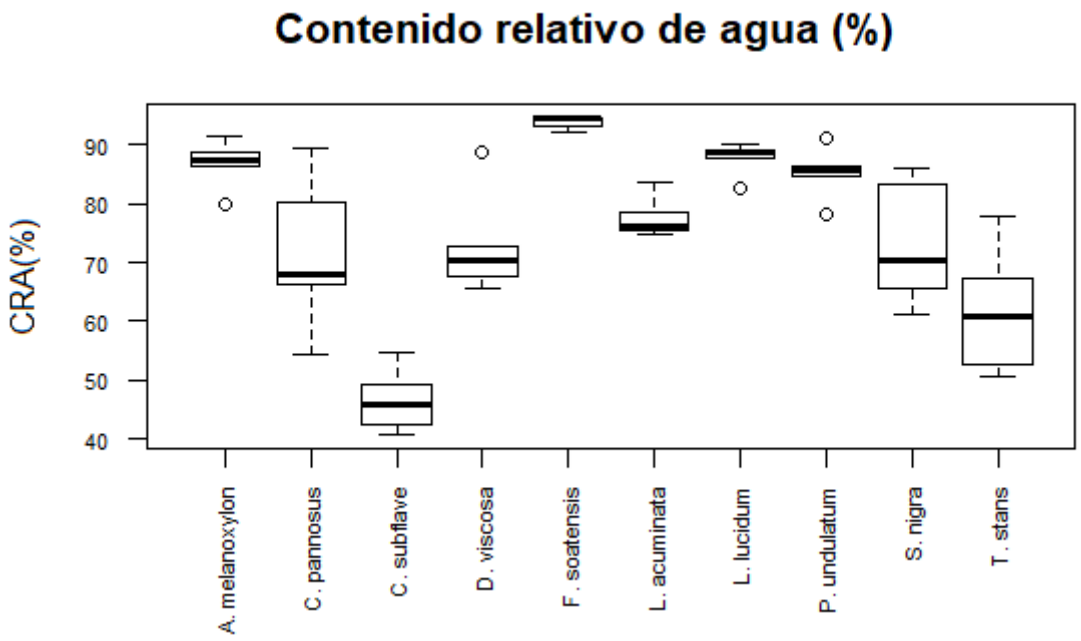
- Ho = Todas las especies presentan un APTI igual.
- H1 = Al menos una especie es significativamente diferente.

Donde se rechazó Ho, y, por lo tanto, se pasó a emplear la prueba posthoc de Conover, con un ajuste del p valor por el método de Holm.

Por último, se determinó el coeficiente de correlación de Pearson para cada uno de los parámetros bioquímicos entre sí, y, de éstos con los valores obtenidos del APTI.

8. RESULTADOS

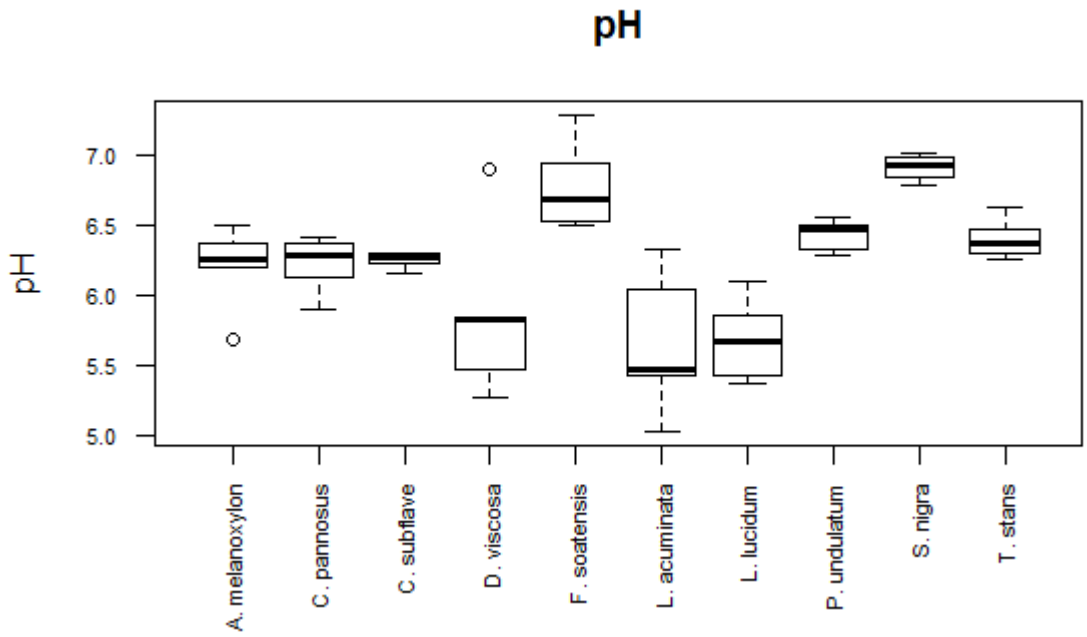
8.1 Contenido relativo de agua



Gráfica 1. Contenido relativo de agua. (%). Fuente: Propia

El mayor contenido relativo de agua se registró para la especie *F. soatensis* con 93.85%, seguido de *L. lucidum* con 87.73%, las cuales, además, junto con *A. melanoxylon*, fueron las que menos variabilidad de los datos por individuo presentaron. En contraste las especies con menor contenido relativo de agua fueron *C. subflavescens* con 46.58 y *T. stans* con 61.86%. Como se muestra en la gráfica No 1, las especies que mayor dispersión de datos presentaron, en orden descendente corresponden al *C. pannosus*, *S. nigra* y *T. stans.*

8.2 pH



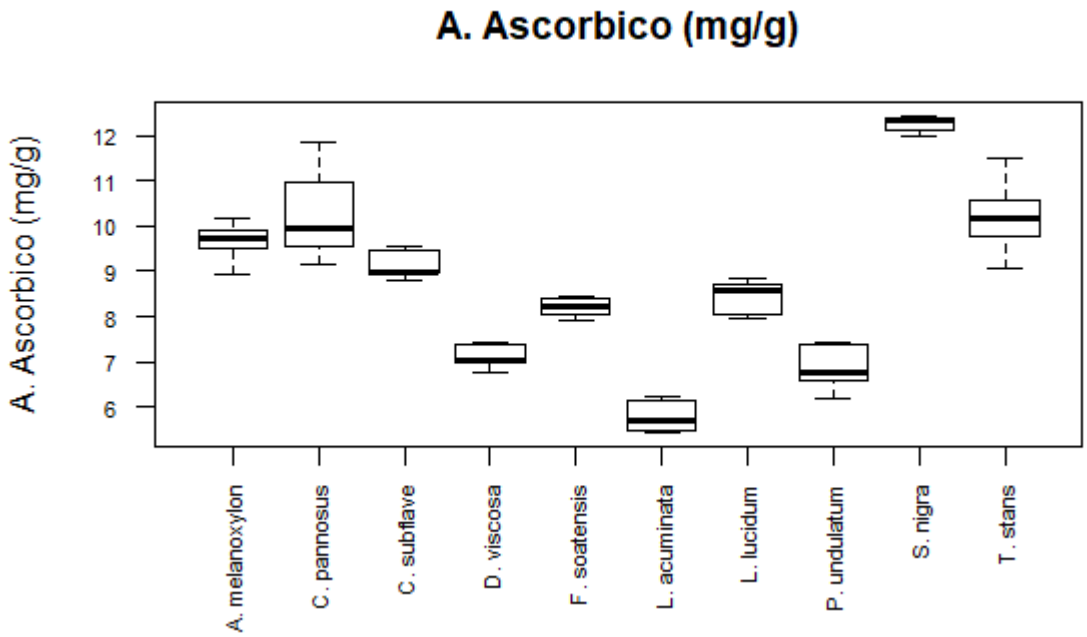
Gráfica 2. pH. Fuente: Propia

El valor promedio de pH para la mitad de las especies evaluadas se encuentra dentro del rango ligeramente ácido (6.1 – 6.6), con dispersiones y simetría similares de los valores; mientras que tres de las especies restantes presentan un pH ácido, con valores entre 5.7 a 5.9, donde la especie *L. acuminata* presentó el valor más ácido; y dos especies presentan un pH neutro, con un valor de 6.8 y 6.9 para *F. soatensis* y *S. nigra* respectivamente.

8.3 Contenido de ácido ascórbico

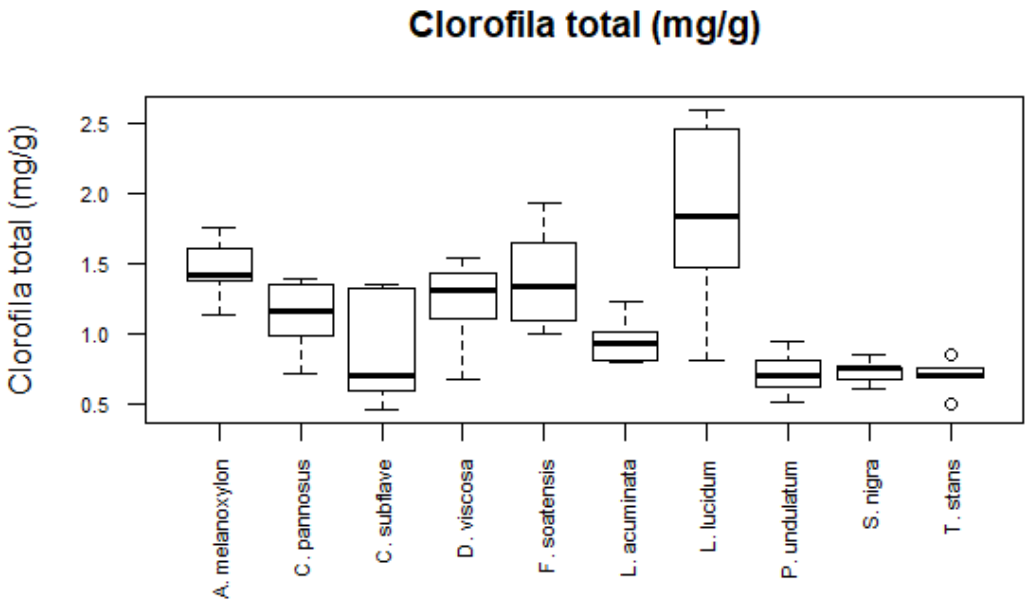
El mayor contenido de ácido ascórbico se registró para la especie *S. nigra* con 12.26 mg/g, además de presentar la menor variabilidad de los datos con respecto a las otras especies evaluadas. La siguiente especie en presentar el mayor contenido de ácido ascórbico es *C. pannosus* con 10.30 mg/g. Por otro lado, las especies con menor contenido de ácido ascórbico fueron *L. acuminata y P. undulatum* con 5.79 mg/g y 6.86 mg/g respectivamente. En la gráfica No 3, se observa que la mayoría de las especies

presentan una dispersión similar de sus datos a excepción de la especie *C. pannosus* que posee el mayor rango, con individuos que presentan valores que van desde 9.15 mg/g a 11.87 mg/g, y la especie *T. stans*, que presenta un rango de 9.05 mg/g a 11.52 mg/g.



Gráfica 3. Ácido ascórbico (mg/g). Fuente: Propia

8.4 Clorofila total.



Gráfica 4. Clorofila total. (mg/g). Fuente: Propia

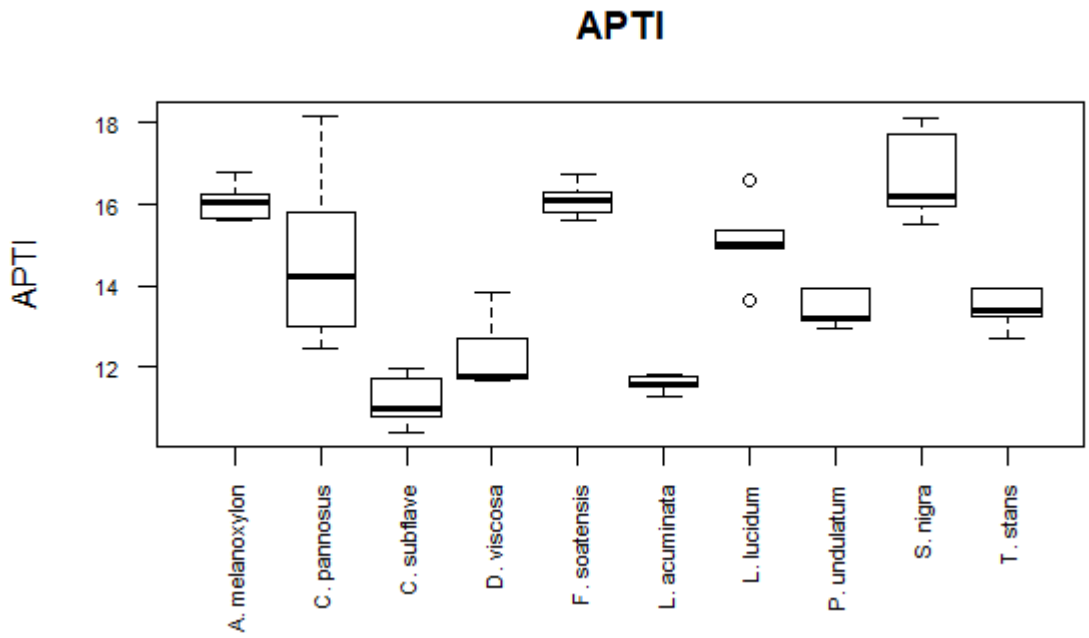
En cuanto a la clorofila total, la especie *L. lucidum* fue la que registró los mayores contenidos de clorofila en las hojas muestreadas, además, fue la que mayor dispersión de sus datos registró; con un rango que va desde 0.81 mg/g a 1.83 mg/g. Por otro lado, los menores contenidos de clorofila total se presentaron en la especie *T. stans*, con un valor promedio de 0.70 mg/g. (Gráfica No 4)

8.5 Índice de tolerancia a la contaminación del aire.

El valor del índice de tolerancia a la contaminación del aire de las diez especies estudiadas se presenta en la tabla No 1, en la cual se muestra que tres de las 10 especies evaluadas, es decir, lo correspondiente al 30% se encuentran dentro del rango de "tolerancia intermedia" con un valor medio de su APTI superior entre 16.1 y 29, y las siete restantes, es decir, el 70%, se encuentra dentro del rango "sensible" a la contaminación del aire. La media del APTI de las especies estudiadas varia de 11.19 para *C. subflavescens* con el valor más bajo y 16.70 para *S. nigra* con el valor más alto.

Nombre científico	Clorofila total (mg/g)	pH	Ácido ascórbico (mg/g)	Contenido relativo de humedad (%)	APTI	Índice de tolerancia
Sambucus nigra	0,73	6,91	12,26	73,29	16,7	I
Ficus soatensis	1,4	6,79	8,21	93,85	16,11	I
Acacia melanoxylon	1,45	6,2	9,66	86,84	16,10	I
Ligustrum lucidum	1,83	5,68	8,43	87,73	15,11	S
Cotoneaster pannosus	1,12	6,22	10,3	71,7	14,72	S
Tecoma stans	0,7	6,4	10,22	61,86	13,44	S
Pittosporum undulatum	0,72	6,43	6,86	85,27	13,43	S
Dodonaea viscosa	1,21	5,86	7,12	73,01	12,34	S
Lafoensia acuminata	0,95	5,66	5,79	77,71	11,6	S
Citharexylum subflavescens	0,88	6,24	9,16	46,58	11,19	S

Tabla 1. Índice de tolerancia a la contaminación del aire. T: Tolerante. I: Intermedia. S: Sensible. MS: Muy sensible. Fuente: Propia



Gráfica 5. Índice de tolerancia a la contaminación del aire por especie. Fuente: Propia

La gráfica de cajas y bigotes del APTI (gráfica 5), permite ver, que además de las especies, *S. nigra*, *F. soatensis, y A. melanoxylon*, algunos individuos de las especies *C. pannosus* y *L. lucidum* se ubican en el rango de "tolerancia intermedia" a la contaminación del aire, al presentar individuos con un APTI superior a 16. Por otro lado, la mayoría de las especies presentan una dispersión similar de sus datos a excepción de la especie *C. pannosus* que posee el mayor rango, con individuos que presentan un índice de tolerancia de la contaminación del aire que van desde 12.52 a 18.20; y la especie *S. nigra*, la cual tiene un rango de 15.61 a 18.19. Las especies con menor variabilidad en los individuos muestreados son *L. acuminata*, seguido de *L. lucidum y F. soatensis.*

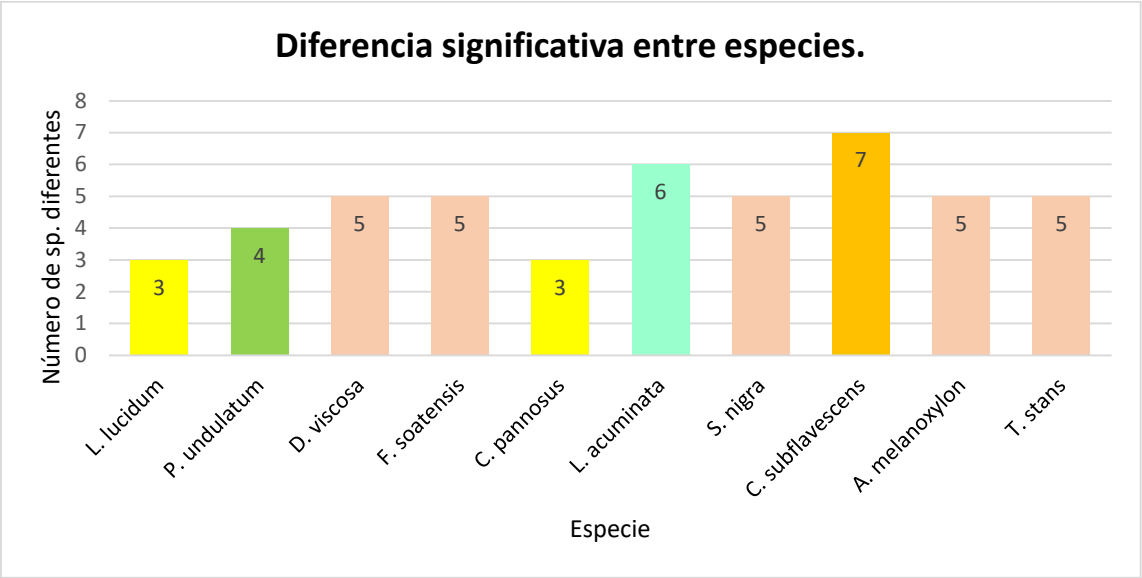
8.5 Análisis estadístico

La prueba de Shapiro arrojó un valor p de 0.06441, indicando que los datos se comportan de forma normal, sin embargo, la prueba de Barlett indicó, con un valor p de 0.0005151, que los datos no presentan homogeneidad de varianzas.

Por otro lado, la prueba Kruskal-Wallis arrojó un valor p = 8.798e-06, indicando que hay por lo menos una especie significativamente diferente de las demás, puesto que se rechaza Ho, y se acepta H1.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2	0,36046	-	-	-	-	-	-	-	-
3	0,00347	0,87931	-	-	-	-	-	-	-
4	0,79068	0,00272	0,00000097	-	-	-	-	-	-
5	1	0,87931	0,01655	0,30636	-	-	-	-	-
6	0,000068	0,06651	1	0,00000016	0,00042	-	-	-	-
7	0,48778	0,00109	0,0000036	1	0,14624	0,000000062	-	-	-
8	0,000019	0,02344	0,87931	0,000000048	0,00012	1	0,000000018	-	-
9	0,87931	0,00441	0,000017	1	0,42099	0,00000028	1	0,000000081	-
10	0,56039	1	0,57797	0,00559	0,99382	0,03294	0,00245	0,0116	0,00924

Tabla 2. Diferencias significativas entre las especies, resultados de la prueba posthoc de Conover. *1* = L. lucidum, *2* = P. undulatum, *3* = D. viscosa, *4* = F. soatensis, *5* = C. pannosus, *6* = L. acuminata, *7* = S. nigra, *8* = C. subflavescense, *9* = *A.* melanoxylon, *10* = T. stans.



Gráfica 6. Diferencias significativas entre las especies estudiadas.

En la prueba posthoc de Conover se obtuvo lo que se observa en la tabla No 2, evidenciándose las especies que son significativamente diferentes entre sí de color verde, con valores $p < 0.005$. Así mismo, en la gráfica No 6 se observa que *C. subflavescens* es la especie que más difiere de las demás, presentando una diferencia significativa con siete de las demás especies; seguida de *L. acuminata* con seis; mientras que las especies que menos difieren son *L. lucidum* y *C. pannosus*, presentando en ambos casos una diferencia significativa con tres de las demás especies.

	Clorofila total (mg/g)	pH	Ácido ascórbico (mg/g)	Contenido relativo de humedad (%)	APTI
Clorofila total (mg/g)	1.0000000	-0.41877301	-0.1602775	0.56106973	0.3622956
pH	-0.4187730	1.00000000	0.6012818	0.01043339	0.5439501
Ácido ascórbico (mg/g)	-0.1602775	0.60128177	1.0000000	-0.28986016	0.5843487
Contenido relativo de humedad (%)	0.5610697	0.01043339	-0.2898602	1.00000000	0.6017794
APTI	0.3622956	0.54395006	0.5843487	0.60177936	1.0000000

Tabla 3. Correlación entre los parámetros bioquímicos y el índice de tolerancia a la contaminación del aire (APTI)

En la tabla No 3, se puede apreciar que el CRA es el parámetro que más influye en el resultado final del APTI, con un valor p de 0.6017794, seguido muy de cerca por el ácido ascórbico, el cual presentó un valor p con el APTI de 0.5843487. Por otro lado, la clorofila es el parámetro que menor influencia presenta con el APTI, con un valor p de 0.3622956. Se evidencia, además, la alta correlación existente entre el pH y el ácido ascórbico, donde se observa un valor p de 0.60128177.

9 DISCUSIÓN

De las 10 especies evaluadas, ocho presentaron un CRA superior al 70%, por lo cual, según Swami, Bhatt, & Joshi, (2004), mantienen un equilibrio fisiológico cuando se encuentran en condiciones de estrés, como lo es un nivel alto de contaminación del aire. En contraste, las 2 especies restantes, *C. subflavescens* y *T. stans*, al tener un bajo CRA promedio de 46.58% y 61.86%, respectivamente, son susceptibles al estrés ambiental.

Aunque en el estudio elaborado por Argentel, Ávila, Aguilera, & González, (2006), se evidencia que un suelo con alta salinidad no permite una adecuada absorción del agua por parte de la planta y, por lo tanto, un bajo contenido relativo de agua, éste no es el caso, puesto que, todos los individuos muestreados se ubicaban en un área próxima entre sí, y sólo el 20% de las especies estudiadas presentó éste comportamiento.

Analizando un aspecto más específico como la morfología de las hojas, el contenido relativo de agua puede variar según la presencia de pubescencia en las mismas, ya que regula la temperatura y, por lo tanto, la perdida de agua por transpiración, lo que indicaría que una especie con pubescencia presentaría un CRA mayor que una especie con hojas glabras (Molina Montenegro, 2008). Sin embargo, esto no se cumple todas las veces, puesto que, de las especies estudiadas, las que mayor CRA presentaron fueron especies de hojas glabras y glabrescentes, tales como, *F. soatensis* y *L. lucidum*, y las que presentaron un CRA inferior al 70%, tienen hojas pubescentes.

Teniendo en cuenta lo anterior, los bajos valores de CRA en *C. subflavescens* y *T. stans* pueden deberse a factores genéticos, ya que el CRA es una característica altamente hereditable. (Schonfeld, Johson, Carver, & Mornhinweg, 1988)

En cuanto al pH de las especies estudiadas se observa una alta correlación con el ácido ascórbico, con un valor P de 0.60, donde a mayor pH, mayor contenido de ácido ascórbico. Esto se puede evidenciar en el comportamiento de *S. nigra* siendo la especie que presentó el pH más neutro, con un promedio de 6.91, que, a su vez, registró el valor más alto de ácido ascórbico promedio, correspondiente a 12.26 mg/g. De igual forma, *L. acuminata* siendo la especie con pH más ácido promedio (5.66), presentó el contenido de ácido ascórbico más bajo. La relación observada entre éstas dos variables coincide con lo reportado en otros estudios, donde se expone que un pH alto aumenta la eficiencia de conversión de un azúcar hexosa en ácido ascórbico (Das et al., 2018). Así mismo, se ha expuesto que el pH está ligado a la actividad fotosintética, puesto que un pH alcalino produce altos contenidos de ácido ascórbico, el cual juega un rol importante en la fijación del carbono. (Lakshmi et al., 2008). Por otro lado, en diversos estudios (Klisura, Paric, Subasic, & Karalija, 2017; Rai, Panda, Chutia, & Singh, 2013), se compara el pH de extractos foliares de plantas en zonas de baja y alta contaminación , obteniéndose valores de pH ácidos en las zonas de alta contaminación del aire; coincidiendo esto con los resultados obtenidos en el presente estudio, puesto que todas las especies evaluadas presentaron un pH menor a 7, es decir, que tienden a tener un pH ácido, al encontrarse en la zona de mayor concentración de PM_{10} en Bogotá.

Dando continuidad a la variable correspondiente al ácido ascórbico, según Klisura et al., (2017), cuando las plantas se encuentran en condiciones de estrés ambiental, los mecanismos de defensa pueden ser los causantes del incremento del contenido del ácido ascórbico, por lo que, entre mayor sea el valor de éste, mayor será la tolerancia de la planta a la contaminación atmosférica. Lo anterior se ve reflejado en la alta correlación del ácido ascórbico con el índice de tolerancia a la contaminación del aire (APTI) obtenida en el presente estudio, con un valor P de 0.58, por lo tanto, es determinante para evaluar la tolerancia de las plantas a la contaminación del aire. De las especies evaluadas

las que mayor ácido ascórbico mostraron fueron en orden descendente, *S. nigra*, *C. pannosus* y *T. stans*, siendo así, las que tienden a tener una mayor defensa frente a la contaminación atmosférica.

Con respecto a la clorofila, ésta puede variar de una especie a otra o incluso entre individuos de la misma especie, dependiendo del nivel de contaminación atmosférica al que se encuentren expuestas (Ramírez et al., 2017); donde una mayor concentración de contaminantes puede reducir los pigmentos fotosintéticos, hecho confirmado en lo expuesto por (Giri, Shrivastava, Deshmukh, & Dubey, 2013), donde la clorofila presentó valores inferiores en la zona de alta contaminación con respecto a la zona de control (baja contaminación). Lo mismo ocurre con una de las especies evaluadas en el presente estudio, en donde *L. acuminata* presentó una clorofila total promedio de 0.95 mg/g siendo inferior al valor de 3.88 mg/g registrado por J. Vargas, (2016) en una zona de menor contaminación atmosférica en Bogotá. La reducción de la clorofila total en zonas de contaminación del aire también se puede explicar por el hecho de que el material particulado suspendido se incrusta en la cutícula de la hoja, reduciendo la intensidad de la luz, y por ende interfiriendo en la actividad fotosintética. (Das et al., 2018).

La ecuación del APTI resulta de las relaciones que se mencionaron anteriormente entre las cuatro variables bioquímicas, por ello en su conjunto representan la tolerancia a la contaminación del aire de las especies evaluadas.

Aunque sólo tres de las especies evaluadas se encuentran dentro del rango "Tolerancia intermedia", dos de las siete especies dentro del rango "sensible" presentaron individuos con un APTI dentro del rango de "Tolerancia intermedia", siendo estas *C. pannosus*, y *L. lucidum*. Cabe resaltar que la especie *S. nigra*, presenta el APTI promedio más alto, así como el mayor número de individuos dentro del rango de "Tolerancia intermedia", siendo clasificada como la especie más tolerante dentro de las especies estudiadas.

Según Liu & Ding, (2007) el valor del APTI puede variar de acuerdo a las condiciones climáticas a las que se encuentre expuesta la planta, situación que se evidencia en la especie *A. melanoxylon*, la cual, en Bengaluru, India, presentó un APTI de 28.5, mientras que en el presente estudio se obtuvo un valor medio de 16.08. Incluso, el índice puede

variar según los niveles de contaminación atmosférica (Agbaire & Esiefarienrhe, 2009) como la diferencia encontrada con un estudio que evalúa el APTI de *L. acuminata* igualmente en la ciudad de Bogotá, en el cual se encontró un valor del índice entre 47 y 72 (Jardín Botánico José Celestino Mutis, 2019), siendo en ese caso clasificada como tolerante, con un valor superior al obtenido en el presente estudio.

Por otro lado, se resalta en primer lugar *C. pannosus* y en segundo lugar *S. nigra* por presentar los rangos más amplios del APTI, indicando una posible variabilidad intraespecífica, lo que de acuerdo a Joshi et al., (2001) les confiere una mayor capacidad de sobrevivir, crecer y reproducirse en nuevas condiciones ambientales, en este caso en condiciones de contaminación atmosférica.

Gracias a la prueba Kruskal Wallis en conjunto con la prueba potshoc de Conover se determinó que hay diferencias significativas entre las especies, donde *C. subflavescens* y *L. acuminata* son las que más difieren del grupo de especies evaluadas, siendo estas, además, las únicas que presentan valores de APTI por debajo de 12, es decir, las que son más sensibles a la contaminación del aire; sumado a esto, en el caso de *L. acuminata* dicha diferencia puede deberse a la baja variabilidad en sus datos. Cabe mencionar que *C. subflavescens*, con el valor más bajo de tolerancia (11.19), coincide con lo reportado por (Alcaldía Mayor de Bogotá et al., 2010), en donde se expone que ésta especie tiene una resistencia baja a la contaminación atmosférica.

En contraste, las especies que menos difieren del grupo de especies evaluadas, es el *C. pannosus*, debido al amplio rango en su índice de tolerancia a la contaminación del aire; y el *L. lucidum*, debido a los valores atípicos que presenta, ya que, la prueba Conover los toma como límites de un rango, por esta misma razón, no se puede asegurar que exista una variabilidad intraespecífica de la especie.

Si bien todas las especies presentan una alta similitud en su APTI, con por lo menos otra especie, se resalta la encontrada entre *P. undulatum* y *T. stans*, (Véase grafica No 5), las cuales presentan similitud tanto en su media como en su rango; esto puede deberse a su semejanza en la clorofila total y el pH, evidenciándose de esta forma que, aunque éstas

variables son las que presentan menor correlación con el APTI, igualmente pueden influir bastante sobre el resultado final del mismo.

10 CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos mostraron que el índice de tolerancia a la contaminación del aire (APTI) promedio del 30% de las especies se encuentra en el rango de "tolerancia intermedia", correspondientes a *S. nigra, F. soatensis* y *A. melanoxylon*, mientras que el 70% restante se encuentra dentro del rango "sensible" a la contaminación del aire, donde se destacan las especies *C. pannosus* y *L. lucidum* por presentar individuos con un APTI mayor a 16, encontrándose por lo tanto en el rango de "Tolerancia intermedia". La especie clasificada como la más tolerante, dentro de las especies evaluad, es *S.* nigra, con la mayor cantidad de individuos dentro del rango "Tolerancia intermedia", así como el APTI promedio más alto, con un valor de 16.7. Por otro lado, las más sensibles a la contaminación del aire, fueron *C. subflavescens*, *L. acuminata* y *D. viscosa*, con valores medios de 11.19, 11.6 y 12.34, respectivamente.

La alta correlación entre el APTI y cada uno de los parámetros bioquímicos demostró la influencia de éstos en la determinación de la tolerancia a la contaminación del aire, ya que cumplen funciones vitales en las plantas, y a su vez, se ven fácilmente afectados por la contaminación atmosférica. Así pues, la mayor correlación se observó en el contenido relativo de agua (CRA), seguido por el contenido de ácido ascórbico, el pH y la clorofila total; donde las especies que presentaron altos valores de CRA, y/o ácido ascórbico, tienden a ser las más tolerantes a la contaminación del aire.

La prueba Kruskal Wallis, en conjunto con la prueba Conover permitieron conocer que el APTI varía entre especies, puesto que, aunque las especies se encontraran en similitud de condiciones, se evidenciaron diferencias significativas entre las mismas.

Teniendo en cuenta los valores obtenidos, se sugiere la siembra, en zonas de contaminación intermedia (con concentraciones de PM_{10} menores a 60µg/m^3), de las tres especies que presentaron un mayor APTI, y, por lo tanto, una mayor tolerancia a la

contaminación del aire; en el caso de la *A. melanoxylon*, se deben tomar medidas especiales, puesto que presenta susceptibilidad al volcamiento.

Dependiendo del ambiente, en zonas de déficit hídrico se sugieren *L. lucidum* y *P. undulatum*, las cuales presentaron altos valores de CRA, y, por ende, una alta resistencia a la sequía; así como las especies *T. stans* y *C. pannosus* por su alto contenido de ácido ascórbico, el cual les confiere defensa en condiciones de estrés ambiental. Cabe mencionar que este último se recomienda además por su amplia variabilidad en los resultados del APTI, significando esto una mayor adaptabilidad a diferentes condiciones del ambiente.

Si bien el APTI es in índice que presenta una alta variabilidad, esto debido a su vez a la variabilidad de los factores a los que la planta se encuentra expuesta, a la fecha es la herramienta más confiable para evaluar la tolerancia de las plantas a la contaminación del aire.

11 RECOMENDACIONES

Teniendo en cuenta que la mayoría de las especies evaluadas (70%) son sensibles a la contaminación del aire, se hace necesario el replantear la ubicación en futuras siembras, para que las mismas puedan brindar adecuadamente su servicio de regulación de la contaminación atmosférica, y que su vida útil no se vea limitada.

Es necesario que el índice de tolerancia a la contaminación del aire (APTI) se tenga en cuenta en la selección de especies del arbolado urbano, por lo tanto, se recomienda a las entidades competentes llevar a cabo vinculaciones con entidades educativas, e institutos de investigación, para así realizar las investigaciones referentes al tema.

Continuar con el estudio de las especies evaluadas en la presente investigación, y de las demás especies pertenecientes al arbolado urbano de la ciudad, relacionado aspectos fisiológicos, morfológicos y fenológicos, con el índice de tolerancia a la contaminación del aire.

Puesto que el APTI varía según los niveles de contaminación atmosférica, así como a las condiciones climáticas, se recomienda realizar estudios en diferentes zonas de Bogotá.

Se recomienda un estudio enfocado en la variabilidad intraespecífica de las especies con amplios rangos del APTI, para conocer su comportamiento de adaptabilidad en diferentes grados de contaminación del aire.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agbaire, P., & Esiefarienrhe, E. (2009). Air Pollution tolerance indices (apti) of some plants around Otorogun Gas Plant in Delta State, Nigeria. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, *13*(1), 11–14. https://doi.org/10.4314/jasem.v13i1.55251

Agrawal, S., & Tiwari, S. L. (1997). Susceptibility Level of Few Plants on Basis of Air Pollution Tolerance Index. *Indian Forester*, *123*(4). Retrieved from http://www.indianforester.co.in/index.php/indianforester/article/view/5938

Alberto, J., Suarez, L., Liney, E., Hurtado, M., Planificación, L. A., Arbolado, D. E. L., … Leal-suárez, J. A. (2018). Urban tree planning in BOGOTÁ and its impact on the quality of life.

Alcaldía Mayor de Bogotá, Carreño, H. G. C., Guerra, J. A. C., Vega, G. E. M., & Hurtado, F. S. (2010). *Arbolado urbano de Bogotá identificación, descripción y bases para su manejo* (Primera ed). Bogotá, D.C.: Alcaldía Mayor de Bogotá, D.C., Secretaría Distrital de Ambiente, SDA - Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis.

Alcaldía Mayor de Bogotá, & Jardín Botánico José Celestino Mutis. (2011). *Manual de silvicultura urbana para Bogotá*. Bogotá, D.C. Retrieved from http://www.jbb.gov.co/documentos/planeacion/2018/mayo/manual_silvicultura_distrito.pdf

Amaya, J. (2019). El árbol que ayudaría a descontaminar Bogotá. Retrieved September 4, 2019, from https://conexioncapital.co/arbol-ayudaria-descontaminar-bogota/

Aránguez et al. (1999). Contaminantes atmosféricos y su vigilancia. *Revista Especialzada En Salud Pública*, *73*, 123–132.

Arciniégas, C. A. (2012). DIAGNÓSTICO Y CONTROL DE MATERIAL

PARTICULADO: PARTÍCULAS SUSPENDIDAS TOTALES Y FRACCIÓN RESPIRABLE PM10. *Revista Luna Azul [En Linea]*, *34*, 195–213. Retrieved from http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=321727348012

Argentel, L., Ávila, C., Aguilera, R., & González, L. (2006). COMPORTAMIENTO DEL CONTENIDO RELATIVO DE AGUA Y LA CONCENTRACIÓN DE PIGMENTOS FOTOSINTÉTICOS DE VARIEDADES DE TRIGO CULTIVADAS EN CONDICIONES DE SALINIDAD. *Cultivos Tropicales*, *27*, 49–53.

Ballester, F. (2005). Contaminación atmosférica, cambio climático y salud. *Revista Especialzada En Salud Pública*, *79*, 159–175. Retrieved from https://www.scielosp.org/pdf/resp/2005.v79n2/159-175/es

Behrentz, E. (2009). Evaluación del estado de la calidad del aire en la ciudad de Bogotá.

Bernal, R. (2015a). Catálogo de plantas y líquenes de Colombia: Ligustrum lucidum. Retrieved September 4, 2019, from http://catalogoplantasdecolombia.unal.edu.co/es/resultados/especie/Ligustrum lucidum/

Bernal, R. (2015b). Catálogo de plantas y líquenes de Colombia: Pittosporum undulatum. Retrieved September 4, 2019, from http://catalogoplantasdecolombia.unal.edu.co/es/resultados/especie/Pittosporum undulatum/

Bharti, S. K., Trivedi, A., & Kumar, N. (2018). Air pollution tolerance index of plants growing near an industrial site. *Urban Climate*, *24*(October 2015), 820–829. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.10.007

CAR, Barrero, D., Camelo, D., Ovalle, A., & Rozo, A. (2012). *Vegetación del territorio CAR, 450 especies de sus llanuras y montañas* (Segunda ed). Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, CAR. Retrieved from http://sie.car.gov.co/handle/20.500.11786/34055

Carolina Ramos. (2014). FLUJO VEHICULAR Y RESPUESTAS ECO-FISIOLÓGICAS DEL ARBOLADO I Congreso Latinoamericano de Ecología Urbana, (June 2012).

Chen, Y.-M., Lucas, P. W., & Wellburn, A. R. (1991). Relationship between foliar injury

and changes in antioxidant levels in red and Norway spruce exposed to acidic mists. *Environmental Pollution*, *69*(1), 1–15. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0269-7491(91)90159-T

Das, M., Chatterjee, M., & Mukherjee, A. (2018). Air Pollution Tolerance Index (APTI) Used for Assessing Air Quality to Alleviate Climate Change: A Review. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*, *9*(45), 45–54.

Enete, I. C., Chukwudeluzu, V. U., & Okolie, A. O. (2013). Evaluation of Air Pollution Tolerance Index of Plants and Ornamental Shrubs in Enugu City : Implications for Urban Heat Island Effect. *World Environment*, *3*(3), 108–115. https://doi.org/10.5923/j.env.20130303.06

Escolástico, C., Cabildo, M., Claramunt, R., & Claramunt, T. (2013). Ecología I: Introducción a organismos y poblaciones. In *Ecología I* (pp. 45–46). Madrid.

Franco R, J. F. (2012). Contaminación atmosférica en centros urbanos. Desafío para lograr su sostenibilidad: caso de estudio Bogotá. *Revista EAN*, (72), 193–204. Retrieved from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-81602012000100013&lng=en&nrm=iso&tlng=es

Gaitán, M., Behrentz, E., & Cancino, J. (2007). Revista de ingeniería. *Revista de Ingeniería*, *26*, 81–92. Retrieved from https://www.redalyc.org/html/1210/121015050011/

García, P., & Rojas, N. (2016). Análisis del origen de PM 10 y PM 2.5 en Bogotá usando gráficos polares. *Mutis*, *6*(2), 47–58. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.21789/22561498.1150

Gholami, A., Mojiri, A., & Amini, H. (2016). Investigation of the Air Pollution Tolerance Index (APTI) using some plant species in Ahvaz region. *Journal of Animal and Plant Sciences*, *26*(2), 475–480. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/301678187_Investigation_of_the_Air_Pollution_Tolerance_Index_APTI_using_some_plant_species_in_Ahvaz_region

Giri, S., Shrivastava, D., Deshmukh, K., & Dubey, P. (2013). Effect of Air Pollution on Chlorophyll Content of Leaves, *1*(X), 93–98.

Han;, Y., Wang;, Q., & Han, G. (1995). The analysis about SOD activities in leaves of plants

and resistance classification of them. *J Liaoning Univ (Natural Sciences Edition)*, *22*, 71–74.

Jardín Botánico José Celestino Mutis. (2019). Reciente estudio revela importancia de plantar guayacán de Manizales. Retrieved January 27, 2020, from http://www.jbb.gov.co/index.php/noticias-del-jardin/item/377-reciente-estudio-revela-importancia-de-plantar-guayacan-de-manizales

Jissy Jyothi, S., & Jaya, D. S. (2010). Evaluation of air pollution tolerance index of selected plant species along roadsides in Thiruvananthapuram, Kerala. *Journal of Environmental Biology*, *31*(3), 379–386.

Joshi, J., Schmid, B., Caldeira, M., Dimitrakopoulos, P., Good, J., Harris, R., … Minns, A. (2001). Local adaptation enhances performance of common plant species. *Ecology Letters*, *46*, 536–544.

Kaur, M., Sharma, A., Katnoria, J. K., & Nagpal, A. (2017). Air Pollution Tolerance Index (APTI): An Important Determinant for the. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/324970454_Air_Pollution_Tolerance_Index_APTI_An_Important_Determinant_for_the_Development_of_Green_Space_in_and_Around_IndustrialUrban_Areas

Klisura, T., Paric, A., Subasic, M., & Karalija, E. (2017). University of Sarajevo, Faculty of Science, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina University of Sarajevo, Faculty of Forestry, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina. *Genetic & Applications*, *1*(1).

Korc, M. (2014). Monitoreo de la calidad del aire en América Latina., (June).

Krishnaveni, M., Chandrasekar, R., Amsavalli, L., Madhiyan, P., & Durairaj, S. (2013). Air pollution tolerance index of plants at Perumalmalai hills, Salem, Tamil Nadu, India. *International Journal of Pharmaceutical Sciences Review and Research*, *20*(1), 234–239. Retrieved from https://pdfs.semanticscholar.org/d491/c457f7b856ea5f5a46e1c479a910a4f69695.pdf?_ga=2.154418808.1797549594.1567470781-1621787458.1567470781

Lacasaña-Navarro, M., Aguilar-Garduño, C., & Romieu, I. (1999). Evolucion de la contaminacion del aire e impacto de los programas de control en tres megaciudades de

América Latina. *Salud Publica de Mexico*, *41*(3), 203–215.

Lakshmi, P. S., Sravanti, K. L., & Srinivas, N. (2008). Air Pollution Tolerance Index of Various Plant Species Growing in Industrial Areas. *The Ecoscan*, *2*(2), 203–206.

Liu, Y.-J., & Ding, H. (2007). Variation in air pollution tolerance index of plants near a steel factory: Implications for landscape-plant species selection for industrial areas. *WSEAS Transactions on Environment and Development*, *4*(1), 24–32. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/228470182_Variation_in_air_pollution_tolerance_index_of_plant_near_a_steel_factory_Implications_for_landscape_plant_species_selection_for_industrial_areas

María Ferriol Molina, S. Muñoz, Hugo Merle Farinós, A. Garmendia Salvador, C. L. (2014). Papel de los árboles ornamentales como bioindicadores de la contaminación atmosférica urbana. *Dialnet*, 292–298.

Mauricio Gaitan, Juliana Cancino, E. B. (2007). Análisis del estado de la calidad del aire en Bogotá.

Molina Montenegro, M. . (2008). Variación de la pubescencia foliar en plantas y sus implicaciones funcionales a lo largo de gradientes altitudinales, *17*(1), 146–154.

Mondal, D., Gupta, S., & Datta, J. (2011). Anticipated performance index of some tree species considered for green belt development in an urban area. *International Research Journal of Plant Science*, *2*, 099–106. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.07.002

Moreno, M. (2008). La gestión ambiental urbana. El caso de la contaminación atmoférica en Bogotá. *Revista Escuela de Administración de Negocios*, *62*, 29–39. Retrieved from http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=20611457003

Muñoz, O., Montes, M., & Wilkomirsky, T. (2001). *Plantas medicinales de uso en Chile: química y farmacología*. Universidad de Chile, Vicerrector{\'\i}a de Asuntos Académicos, Comité de Publicaciones Cient{\'\i}ficas. Retrieved from https://books.google.com.co/books?id=cuviT1SKao8C

Ogunkunle, C. O., Suleiman, L. B., Oyedeji, S., Awotoye, O. O., & Fatoba, P. O. (2015). Assessing the air pollution tolerance index and anticipated performance index of some tree species for biomonitoring environmental health. *Agroforestry Systems*, *89*(3), 447–

454. https://doi.org/10.1007/s10457-014-9781-7

Organización Mundial de la Salud. (2018). Calidad del aire ambiente (exterior) y salud. Retrieved September 6, 2019, from https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health

Pérez, J. A. (2015). Catálogo de plantas y líquenes de Colombia: Cotoneaster pannosus. Retrieved September 4, 2019, from http://catalogoplantasdecolombia.unal.edu.co/es/resultados/especie/Cotoneaster pannosus/

Prajapati, S. K., & Tripathi, B. D. (2008). Anticipated Performance Index of some tree species considered for green belt development in and around an urban area: A case study of Varanasi city, India. *Journal of Environmental Management*, *88*(4), 1343–1349. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.07.002

Rai, P. ., Panda, L., Chutia, B., & Singh, M. (2013). Comparative assessment of air pollution tolerance index (APTI) in the industrial area (Aizawl) of India: an ecomanagement approach. *Afr J Environ Sci Tech*, *7*, 944–948.

Ram, S. S., Majumder, S., Chaudhuri, P., Chanda, S., Santra, S. C., & Chakraborty, A. (2015). A Review on Air Pollution Monitoring and Management Using Plants With Special Reference to Foliar Dust Adsorption and Physiological Stress Responses. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, *45*(23), 2489–2522. https://doi.org/10.1080/10643389.2015.1046775

Ram, S. S., Majumder, S., Chaudhuri, P., Chanda, S., Santra, S. C., Maiti, P. K., … Chakraborty, A. (2014). Plant canopies: Bio-monitor and trap for re-suspended dust particulates contaminated with heavy metals. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, *19*(5), 499–508. https://doi.org/10.1007/s11027-012-9445-8

Ramírez, A., Cilia, G., & Flores-Ramírez, R. (2017). *EL ÍNDICE DE TOLERANCIA A LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA (APTI) COMO HERRAMIENTA EN EL USO DE BIOMONITORES PASIVOS DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA POR QUEMA DE BIOMASA*. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26884.63360

Rayappa, M., & Charya, S. (1993). Pollution tolerance index in some common plants around

some major industries in Warangal City, Andhra Pradesh. *Pollution Research*, *12*(1), 57–59.

Raza, S. H., Murthy, M. S. R., & Ahmed, A. (1988). Air pollution tolerance index of certain plants of Nacharam industrial area, Hyderabad. *Indian J. Bot*, *11*(1), 91–95.

Raza, S. N., Vijaykumari, N., & Murthy, M. S. (1985). Air pollution tolerance index of certain plants of Hyderabad. In *Symp Biomonitoring State of Environment, New Delhi: Indian National Science Academy* (pp. 243–245).

Romero, C. (2015). Catálogo de plantas y líquenes de Colombia: Acacia melanoxylon. Retrieved September 4, 2019, from http://catalogoplantasdecolombia.unal.edu.co/es/resultados/especie/Acacia melanoxylon/

Schonfeld, M. ., Johson, R. ., Carver, B. ., & Mornhinweg, D. . (1988). Water relations in winter wheat as drought resistance indicators. *Cropscience*, *28*, 526–531.

Secretaria Distrital de Ambiente. (2019). Visor Geográfico Ambiental. Retrieved December 20, 2019, from http://visorgeo.ambientebogota.gov.co/?lon=-74.088180&lat=4.661370&z=11&l=5:1&descargarCapa=19

Shannigrahi, A. S., Fukushima, T., & Sharma, R. C. (2004). Anticipated air pollution tolerance of some plant species considered for green belt development in and around an industrial/urban area in India: An overview. *International Journal of Environmental Studies*, *61*(2), 125–137. https://doi.org/10.1080/0020723032000163137

Singh, S. K., Rao, D. N., Agrawal, M., Pandey, J., & Naryan, D. (1991). Air pollution tolerance index of plants. *Journal of Environmental Management*, *32*(1), 45–55. https://doi.org/10.1016/S0301-4797(05)80080-5

Solarte, I., Caicedo, M., Restrepo, S., Pascual, G., Londoño, D., & Lozano, J. (1999). *Contaminación atmosférica y enfermedad respiratoria en niños menores de 14 años en Santa Fe de Bogotá*. Bogotá, Colombia: Pontificia Universidad Javeriana.

Swami, A., Bhatt, D., & Joshi, P. (2004). Effect of automobile pollution on sal (Shorea robusta) and Rohini (Mallotus phillipensis) at Asarori Dehradun. *Himalayan Journal of Environment Zoology*, *8*, 57–61.

Vargas, F. A., & Rojas, N. Y. (2010). Chemical composition and mass closure for airborne particulate matter in Bogotá. *Ingeniería e Investigación*, *30*(2), 105–115. Retrieved from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-56092010000200011&lng=en&nrm=iso&tlng=es

Vargas, J. (2016). *Determinación de parámetros bioquímicos como indicadores del efecto de la contaminación en Lafoensia acuminata, Prunus serotina y Croton bogotanus presentes en el arbolado urbano de Bogotá D.C.* Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Villalobos, E., Umaña, C. H., & Sterling, F. (1990). DETERMINACION DEL CONTENIDO RELATIVO DE AGUA EN PROGENIES DE PALMA ACEITERA (Elaeis guineensis), DURANTE LA EPOCA SECA EN QUEPOS, COSTA RICA! *Agronomía Costarricense*, *14*(1), 73–78.