



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**ARBOLADO URBANO COMO ESTRATEGIA DE
GESTIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE**

**KARLA CRISTINA CARDONA ARANGO
VERÓNICA BERMÚDEZ ZAPATA**

**Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental
Especialización en Gestión Ambiental
Medellín, Colombia
2019**



**ARBOLADO URBANO COMO ESTRATEGIA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD DEL
AIRE**

Karla Cristina Cardona Arango

Verónica Bermúdez Zapata

Monografía presentada como requisito parcial para optar al título de: Especialización en
Gestión Ambiental

Asesor:

James Londoño Valencia

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental, Especialización en Gestión Ambiental

Medellín, Colombia

2019

ARBOLADO URBANO COMO ESTRATEGIA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE

Tabla de contenido

| | |
|---|----|
| RESUMEN..... | 4 |
| INTRODUCCIÓN..... | 4 |
| OBJETIVOS..... | 6 |
| OBJETIVO GENERAL..... | 6 |
| OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 6 |
| METODOLOGÍA..... | 6 |
| MARCO TEÓRICO..... | 9 |
| ESTADO DEL ARTE..... | 12 |
| CONTEXTO GENERAL DEL VALLE DE ABURRA..... | 16 |
| PROBLEMÁTICA URBANA..... | 16 |
| CARACTERÍSTICAS FUNCIONALES DEL ARBOLADO URBANO..... | 18 |
| CONTRIBUCIONES O POTENCIALES DE LA VEGETACIÓN..... | 18 |
| CARACTERÍSTICAS Y ATRIBUTOS..... | 19 |
| ESPECIES..... | 22 |
| DISTRIBUCIÓN Y LOCALIZACIÓN EN ZONAS URBANAS PARA MAXIMIZAR EL BENEFICIO..... | 26 |
| VÍAS..... | 26 |
| MICROCLIMA..... | 27 |
| RUIDO..... | 31 |
| INFRAESTRUCTURA..... | 32 |
| INFRAESTRUCTURA VERDE COMO ESTRATEGIA DE EQUIPAMIENTO URBANO Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO. | 33 |
| PLANES Y PROGRAMAS..... | 36 |
| RESULTADOS Y ANÁLISIS..... | 37 |
| CONCLUSIONES..... | 40 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 41 |

Listado de figuras

| | |
|--|----|
| FIGURA 1: ESTRUCTURA DE LA MATRIZ DE BÚSQUEDA PARA EL ANÁLISIS Y SÍNTESIS DE INFORMACIÓN RELEVANTE..... | 8 |
| FIGURA 2: DESARROLLO CRONOLÓGICO DE LA METODOLOGÍA..... | 8 |
| FIGURA 3: ORIENTACIÓN DE TEMÁTICAS PARA LA BÚSQUEDA DE INFORMACIÓN | 9 |
| FIGURA 4: LOCALIZACIÓN DEL VALLE DE ABURRA. FUENTE: ADAPTADO PROPIA. | 16 |
| FIGURA 5: ZONAS CRÍTICAS POR CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA | 18 |
| FIGURA 6 : DISTRIBUCIÓN MÁS EFICIENTE PARA LA DISMINUCIÓN DE MATERIAL PARTICULADO EN VÍAS TRANSITADAS. | 26 |
| FIGURA 7 ESQUEMA EFECTOS DEL ARBOLADO URBANO EN LA TEMPERATURA LOCAL | 28 |
| FIGURA 8: CARACTERÍSTICAS ESENCIALES EN LAS ESPECIES PARA MITIGACIÓN DE LAS TEMPERATURAS EN AMBIENTES URBANOS | 29 |
| FIGURA 9 TEMPERATURAS SUPERFICIALES EN EL VALLE DE ABURRÁ. | 31 |
| FIGURA 10: ESQUEMA BARRERA ADECUADA PARA ATENUACIÓN DE RUIDO EN VÍAS | 32 |
| FIGURA 11: ESQUEMA APLICATIVO DE INFRAESTRUCTURA VERDE COMO UN PROCESO SISTÉMICO DE FACTORES QUE POTENCIAN LOS BENEFICIOS DE LOS BOSQUES URBANOS. | 35 |
| FIGURA # 12: ESQUEMA DE FACTORES PARA LA APLICACIÓN HOLÍSTICA DE LA INFRAESTRUCTURA VERDE CON FINES DE FUNCIONALIDAD ECOLÓGICA DE LAS CIUDADES. | 36 |
| FIGURA 13: CARACTERÍSTICAS DE LA VEGETACIÓN REQUERIDOS PARA LA MITIGACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA, ACORDE A LOS FINES Y OBJETIVOS | 38 |

Listado de Tablas

| | |
|--|----|
| TABLA # 1. ESPECIES QUE DEMOSTRARON SER EFICIENTES EN LA MEJORA DE CONDICIONES AMBIENTALES EN LOS ARTÍCULOS ANALIZADOS. | 23 |
|--|----|

Resumen

El arbolado urbano y las zonas verdes a nivel de ciudad contribuyen de manera ecosistémica y social al entorno, el problema que se enfrenta de calidad del aire y altas concentraciones en los niveles de contaminantes en las ciudades nos invita a pensar estrategias de mejora, en este documento se realiza una revisión bibliográfica del aporte del arbolado urbano y las zonas verdes a la calidad del aire desde diferentes aspectos, tales como disminución de material particulado y elementos contaminantes, ruido, microclima, cierta protección ante la infraestructura existente y aporte al bienestar psicológico de la población y sobre las características funcionales y espaciales de las especies que maximizan sus servicios prestados. La reducción de material particulado y otros contaminantes es evidenciada, sin embargo el nivel de toneladas removidas es bajo con respecto al nivel de concentración de los contaminantes en las ciudades, el identificar puntos críticos con niveles altos de contaminantes como vías de alto tráfico para implementar individuos arbóreos con características descritas en el cuerpo de la investigación y vegetación que se encuentre a nivel de la emisión reducirá los niveles de concentración a nivel puntual. La presencia de cobertura vegetal es representada con un aporte significativo al entorno, la apropiación del espacio por parte de los habitantes se maximiza al generar espacios públicos verdes que brindan sensación de bienestar, es por esto que se deben planificar adecuadamente los lugares disponibles con el fin de potencializar los servicios prestados hacia un beneficio integral y poblacional.

Palabras claves: Calidad del aire, Arbolado urbano, Índice de calidad

Introducción

La contaminación del aire es una temática de gran interés público, actualmente es objeto de una amplia investigación científica debido a sus efectos sobre la vida, la salud humana, la productividad y la propiedad. La contaminación del aire urbano afecta a casi mil millones de personas en el mundo, exponiéndolas a grandes problemas de salud y su costo en prevención, control y atención es muy significativo para los estados (Brusseau et al.,2019).

En Colombia, el monitoreo y control de la contaminación atmosférica ha tomado gran relevancia debido a que, según cifras de la Organización Mundial de la Salud, una de cada nueve muertes ocurridas a nivel mundial es ocasionada por contaminación o mala calidad del aire (Organización Panamericana de la Salud, 2019). Según el Instituto de Hidrología,

Meteorología y Estudios Ambientales (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2016), el contaminante con mayor potencial de afectación en el territorio nacional es el material particulado menor a 2.5 micras (PM2.5), debido a su capacidad de ingreso en el tracto respiratorio de los seres vivos, alcanzando la cavidad alveolar e incluso llegando al torrente sanguíneo, causando graves consecuencias a salud de la población expuesta.

La Autoridad Ambiental del Valle de Aburrá (Área Metropolitana del Valle de Aburrá) ha venido declarando estados de prevención y emergencia ambiental por la mala calidad del aire, a partir de la medición en tiempo real de las concentraciones de contaminantes reportadas por el Sistema de Vigilancia de la Calidad del Aire establecido en todo el territorio de jurisdicción, que han dado cuenta de los niveles de contaminación a los que se expone la población, los cuales causan una afectación directa a la salud de la misma y disminuyen la calidad ambiental de todo el territorio (Area Metropolitana del Valle de Aburrá,2019).

Los árboles pueden capturar partículas del aire (Beckett, Freer-Smith, & Taylor, 1998) y actuar como obstáculos para la dispersión de la contaminación por partículas, eliminando una cantidad significativa de material particulado de la atmósfera (Räsänen, et al., 2012), se plantea durante el desarrollo de esta propuesta establecer la contribución de los arboles urbanos en las mejoras de las condiciones ambientales y la calidad del aire de un territorio, partiendo de los servicios que por naturaleza prestan algunas especies existentes en la zona y las características físicas y funcionales que las hacen aptas para la mitigación de la contaminación.

Para promover el desarrollo de planes, políticas y estratégicas que contribuyan a la descontaminación del aire, a partir de la siembra adecuada de especies arbóreas, adicional al conocimiento de las contribuciones del arbolado en la retención de contaminantes, se proyecta un análisis de los lineamientos y criterios importantes a tener en cuenta para el éxito de procesos de siembra en territorios urbanos con fines del mejoramiento de la calidad del aire, buscando no ser afectadas variables ambientales propias de la función ecológica y las dinámicas naturales.

Objetivos

Objetivo general

Identificar las contribuciones de los árboles urbanos y su capacidad de retención de material particulado y otros compuestos en la mejora de la calidad del aire en ciudades con problemas de contaminación.

Objetivos específicos:

- Reconocer y describir las características de las especies vegetales que potencian su eficiencia y eficacia, para la disminución de contaminantes y el mejoramiento de condiciones ambientales en las zonas urbanizadas.

- Identificar los criterios que deben ser considerados en un proceso de siembras urbanas para el mejoramiento de la calidad del aire.

Metodología

Con el fin de establecer la contribución del arbolado urbano en la mejora de las condiciones de calidad del aire en ciudades con problemas de contaminación, en relación con su capacidad de retención de material particulado y otros compuestos contaminantes, partiendo de la caracterización y los atributos específicos de las especies que las identifican como aptas y eficientes en los procesos de siembra urbana con fines de mejoramiento de condiciones ambientales locales.

Para el logro de los objetivos se plantea una revisión bibliográfica y de información relacionada y de interés, que conlleve al análisis general de conceptos, lineamientos, casos aplicativos, normas, políticas y aportes representativos del arbolado urbano sobre la calidad del aire, que permita establecer los lineamientos necesarios para su aplicabilidad en el territorio latinoamericano. El desarrollo y el análisis de la información es llevado a cabo en las siguientes fases:

Fase 1: Estrategia de búsqueda: consiste en establecer una ecuación de búsqueda que permita abarcar la mayor parte de las temáticas a tratar a partir del uso de operadores booleanos y tesauros aplicados por la UNESCO, que limiten el campo búsqueda y faciliten el análisis de

artículos de interés que cumplen con los requerimientos fijados para cumplimiento de los objetivos.

Con el fin de analizar información actualizada, se fija un periodo de tiempo comprendido por los últimos 5 años (2013-2019). La ecuación de búsqueda que resulta del análisis de tesauros y palabras clave es la siguiente:

ESPAÑOL

(Calidad del aire OR Polución atmosférica OR Smog) AND (Reforestación urbana OR Forestación OR Arbolado urbano) AND (Índice de calidad OR indicador de calidad) AND (ciudades OR áreas urbanas OR metrópoli)

Ecuación 1

INGLÉS

(Air pollution OR atmospheric pollution) AND (forest management OR reforestation) AND (quality air OR quality indicator) AND (Cities OR population centers)

Ecuación 2

Fase 2: Revisión de bibliografía artículos indexados: se plantea el análisis de como mínimo 40 artículos indexados relacionado con la temática a desarrollar en el periodo establecido para la actualidad de la información encontrada. El análisis se realiza de manera global, abarcando estudios realizados en países de diferentes continentes y niveles de desarrollo en investigación, que permitan ampliar el panorama de la aplicabilidad casos de éxito, metodologías y resultados de investigación diferenciados que conlleven a realizar un análisis detallado en los territorios latinoamericanos.

Fase 3: Revisión de información oficial e institucional: consiste en analizar información proveniente de instituciones oficiales y autoridades ambientales, teniendo en cuenta la normatividad, políticas y programas aplicados en el país con fines de un mejoramiento de la calidad ambiental de los territorios. Dicha información es el fundamento, la motivación y el objetivo final de la aplicabilidad de procesos que estén orientados plantear soluciones a las condiciones actuales de contaminación en las grandes ciudades con problemáticas en este caso de calidad del aire.

Fase 4: Análisis de información: La información analizada en las fases anteriores es consignada en una matriz de Excel que permite clasificar la información de acuerdo a criterios como fuente de búsqueda, año, autores, temática (diagrama #2) y contenido relevante, esto con el fin de sintetizar y facilitar el posterior análisis y desarrollo de los objetivos planteados.

| Tipo | Título | Autores | Fuente | Año | Resumen | Objetivos | Resultados | Conclusiones |
|------|--------|---------|--------|-----|---------|-----------|------------|--------------|
|------|--------|---------|--------|-----|---------|-----------|------------|--------------|

Figura 1: Estructura de la matriz de búsqueda para el análisis y síntesis de información relevante

Fase 5: Desarrollo y elaboración de la monografía: consiste en la clasificación de información relevante y su análisis general, dando lugar al desarrollo de la temática y el documento final. Se incluye como parte fundamental el listado de características de las especies aptas para la remoción de contaminantes en el aire y todos aquellos lineamientos identificados en las bibliográfica que son importantes y necesarios en los procesos de siembras urbanas con fines del mejoramiento de la calidad de aire y las condiciones bioclimáticas, sin causar afectación a otras variables ambientales indispensables de la función ecológica principal de las mismas.

A continuación, en la figura 2 se muestra cronológicamente el desarrollo de la metodología aplicada en cada una de sus fases, la cual abarca desde el planteamiento de la temática hasta el análisis de información que conlleva al establecimiento del listado de características y lineamientos requeridos para los procesos de siembra urbana con fines de mejoramiento de la calidad del aire.

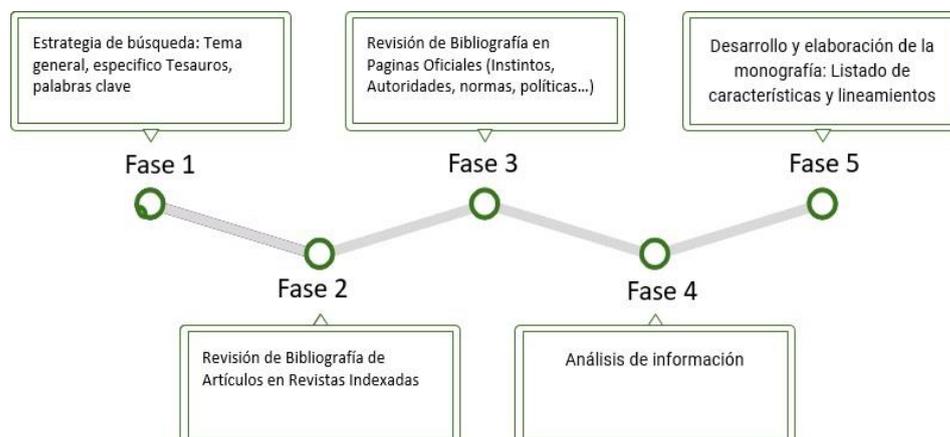


Figura 2: Desarrollo cronológico de la metodología.

En la figura 3 se identifican todas las temáticas que serán revisadas durante el desarrollo de esta propuesta, con el fin de abarcar un campo amplio de información que conlleve al logro de los objetivos establecidos.



Figura 3: Orientación de temáticas para la búsqueda de información

Marco Teórico

A nivel mundial existe gran cantidad de literatura sobre bosques urbanos, contaminación y promoción de la sostenibilidad que dan cuenta de las contribuciones positivas de los árboles para el mantenimiento de la calidad ambiental (Escobedo, Kroeger, & Wagner, 2011). En grandes ciudades afectadas por problemas de contaminación del aire, los bosques urbanos y los espacios verdes hacen parte de soluciones naturales que pueden contribuir a lograr metas establecidas para la mitigación de la problemática (Krajter Ostoić, Salbitano, Borelli, & Verlič, 2018) Los árboles y los parches de bosque en la ciudad ayudan a mitigar las islas de calor urbano, reducir la contaminación del aire, mejorar la longevidad de la infraestructura, retener y ralentizar las agua pluviales y reducir las necesidades de energía en estructuras construidas (Steenberg, Duinker, & Nitoslawski, 2019).

De acuerdo a lo anterior, se introduce dentro de las estrategias de mitigación de la contaminación atmosférica el término de bosques urbanos, Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), en sus informes para la evaluación de los recursos forestales mundiales (Organización de las Naciones Unidad para la Agricultura y la Alimentación, 2015) el término hace referencia a la presencia de árboles en ausencia de otros usos predominantes de la tierra. Las practicas forestales como la reforestación y la silvicultura urbana plantean la regeneración natural o restablecimiento de zonas vegetales a través de la plantación o de la siembra deliberada en tierra que implica una transformación del uso del suelo, excluyendo la regeneración natural del bosque. Los bosques urbanos son la suma de todos los árboles urbanos, arbustos, céspedes y suelos permeables que están ubicados en ecosistemas altamente alterados y extremadamente complejos, en donde los humanos son los principales responsables de sus tipos, cantidades y distribución dentro del territorio (Escobedo, Kroeger, & Wagner, 2011).

Para la aplicación de prácticas de siembras urbanas, se debe cumplir con criterios de planificación relacionados con la selección de especies, espacios adecuados, funciones a cumplir y objetivos a desarrollar. Según los objetivos de la siembra, el proceso puede clasificarse en los siguientes cuatro tipos, estética, investigativa o experimental, moderadora de ruido o control de sombras, cada una como su nombre lo dice corresponde a objetivos paisajísticos, mejoramiento de calidad del aire y reducción de contaminantes, amortiguación del impacto de ondas sonoras y mejoramiento de condiciones bioclimáticas respectivamente (Comisión Nacional Forestal, 2010).

La contaminación atmosférica se puede entender, según el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, como la presencia de pequeñas partículas en el aire o productos secundarios gaseosos que pueden implicar riesgo, daño o molestia para las personas, plantas y animales que se encuentran expuestas a dicho ambiente (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2019) También establece que un contaminante con alto potencial de afectación es el material particulado menor a 2,5 micras (PM2.5), debido a su capacidad de ingreso en el tracto respiratorio de los seres vivos, alcanzando la cavidad alveolar e incluso llegando al torrente sanguíneo, causando graves consecuencias a salud de la población expuesta. Según cifras de la Organización Mundial de la Salud, una de cada ocho muertes ocurridas a nivel mundial es ocasionada por contaminación o mala calidad del aire.

Ciertos factores naturales influyen en la concentración de los contaminantes presentes en la atmósfera, ya que en esta se dan procesos naturales e interacción de condiciones meteorológicas, por ejemplo, la velocidad y dirección del viento, que dan paso a fenómenos como el transporte, la dispersión y la deposición. El transporte se caracteriza por el cambio espacio temporal de las concentraciones de contaminantes, la dispersión es causada por flujos turbulentos y factores de fricción y finalmente la deposición que se da por efectos de la gravedad se presenta en dos formas; deposición seca, la cual se da por procesos de turbulencias y por sedimentación de las partículas y la deposición húmeda en la cual la precipitación captura los contaminantes y los fija en la superficie (Leelossy, et al., 2014).

Múltiples investigaciones y estrategias se han llevado a cabo a nivel mundial con respecto a prácticas adecuadas que sean viables a la hora de medir y mejorar las condiciones de calidad del aire, es entonces cuando el concepto de gestión de la calidad del aire se hace un eje

fundamental o proceso que permite a largo plazo la protección y un adecuado uso del recurso natural afectado y brinda herramientas de decisión para determinar acciones en pro del mejoramiento de las condiciones actuales. El concepto de gestión por sí solo hace referencia a las acciones que se llevan a cabo para resolver un asunto o que hacen posible la administración y dirección de un proyecto, compañía o negocio. En este sentido, el uso del término en el ámbito de la calidad del aire de un territorio, basa su accionar en estrategias de medición, evaluación, seguimiento y control de la contaminación atmosférica del territorio de jurisdicción, estableciendo procedimientos estandarizados por normas internacionales que permitan mediante un trabajo interdisciplinario generar conocimiento, entregar información oportuna y periódica y tomar decisiones en función del mejoramiento de las condiciones ambientales del aire, el entorno y la disminución de la problemática de salud pública de la población.

Colombia enmarca su accionar inicialmente en la Política de Prevención y Contaminación del Aire expedida en el año 2010, la cual parte de un diagnóstico de la situación y los niveles de contaminación, para el establecimiento de los objetivos y el plan de acción en pro de alcanzar los niveles adecuados para la salud humana en el marco del desarrollo sostenible. La resolución 2254 de 2017, la cual comenzó a regir en el año 2018 establece la normatividad de calidad del aire, sus niveles máximos permisibles y los niveles de prevención, alerta y emergencia para la declaración de los episodios de contingencia en el territorio nacional. Por su parte, para garantizar la prevención y control de la contaminación atmosférica y la aplicación de las estrategias que mejoren el recurso, el Gobierno Nacional aprobó la Política para el Mejoramiento de la Calidad del Aire por medio del documento CONPES 3943, con el fin de obtener los recursos para el cumplimiento de los objetivos establecidos para el país en materia de calidad atmosférica. (Departamento Nacional de Planeación, 2019)

Por su parte, a nivel metropolitano se tiene establecido el Plan Integral de Gestión de la Calidad del Aire PIGECA, el cual es un *“plan de acción por el aire pensado al año 2030, que contiene un conjunto de estrategias para reducir los niveles de contaminación y mejorar la calidad del aire del Valle de Aburrá a corto, mediano y largo plazo; además contiene medidas, metas e instrumentos de medición; para mantener un aire limpio, proteger la salud de la población y propiciar un desarrollo metropolitano sostenible”*(Area Metropolitana del Valle de Aburrá,2019).

Como una estrategia adicional, el Área Metropolitana crea y adopta el plan denominado “Plan Siembra”, el cual nace como una estrategia que atiende el déficit de árboles que en la actualidad se encuentra en un aproximado de 700.000 árboles. El plan se encuentra respaldado por un sistema metropolitano que al mismo tiempo genera las condiciones de articulación de las políticas ambientales, de tal manera que cada acción puntual, cada siembra, es coherente con las acciones integrales orientadas a la producción de material vegetal, manejo, conservación y mantenimiento de las especies arbóreas que embellecen y mejoran el ecosistema del Valle de Aburrá, para beneficio de toda la ciudadanía (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, s.f.).

Estado del Arte

Para la selección de especies adecuadas en la captura de material particulado PM2.5, estudios realizados identifican a partir de la medición en el sitio de PM2.5, el tipo de sistema vegetal que más capacidad tiene de reducir la concentración del contaminante en el aire dentro de un área con diferentes sistemas forestales, partiendo de una estación de control. Los resultados evidencian que el sistema forestal con mayor captura de PM 2.5 fue el de Coníferas de hoja ancha en su estado desarrollo, relacionados con la capacidad que tiene la especie de mantener las hojas en su estructura por más tiempo y debido a la superficie y textura de las mismas (Nguyen, Yu, Zhang, Liu, & Liu, 2015).

A partir de la identificación de las especies más comunes existentes en ambientes urbanos, parques, zonas de alto tráfico vehicular en 328 ciudades del mundo, dichas especies se jerarquizan de acuerdo a la capacidad de remoción del contaminante y acorde a criterios biofísicos y estructurales como el tipo, tamaño, tasa de crecimiento, estructura del dosel, complejidad de la hoja, tamaño de la hoja y características superficiales de la hoja, los impactos negativos en la calidad del aire (especies alergénicas y tóxicas) y su adaptabilidad en ambientes contaminados. De este estudio, los autores evidencian el incremento de especies adaptables a ambientes urbanos con altas capacidades y eficiencia en la remoción de PM2.5. De un total de 100 especies más comunes en las 328 ciudades evaluadas, nuevamente las coníferas se catalogan como las más eficientes en el control de la contaminación por material particulado, resaltando el criterio del tamaño de las hojas (especies de hojas ancha) en el aumento de la capacidad de adaptación en ambientes urbanos y remoción del contaminante (Yang, Chang, & Yan, 2015.).

Adicional a la selección de especies adecuadas y eficientes en la retención de material particulado, criterios como la ubicación y distribución en el espacio urbano toma importancia en la mitigación de la problemática. Una de las fuentes de emisión significativas de PM_{2.5} en las zonas urbanas es proporcionada por la combustión de los vehículos y el transporte, generalmente, dichas emisiones son expulsadas a nivel de piso por medio de los tubos de escape, razón por la cual se evalúa la efectividad de cinturones verdes a borde de vía con diferentes distribuciones y tamaños de especies con el fin de conocer cómo cambia el gradiente horizontal de dispersión de los contaminantes emitidos en la vía. Las categorías elegidas son corredores compuestos de sólo árboles, solo arbustos, solo pastos y la combinación de sistemas árbol césped, árbol arbusto y árbol césped pasto. Los resultados indican como la dispersión de los vientos favorece los fenómenos de deposición de las partículas contaminantes, evidenciando que el sistema o configuración árbol-césped resulta más eficiente en prevenir la transmisión horizontal de material particulado, logrando atrapar la mayor cantidad del material en niveles bajos antes de ser dispersados por efectos de viento (Chen, Liu, Zou, Yang, & Zhiqiang, 2016)..

Otros estudios adicionan el componente densidad de siembra, a partir del establecimiento de escenarios diferentes en franjas a borde de carreteras concurridas por alto flujo vehicular, tomando como base un escenario sin árboles, uno con una distancia de siembra de 0.8 metros y finalmente uno en donde no hay distancia entre individuos arbóreos, realizando mediciones diarias en el sitio y comparando con las concentraciones medidas por una estación del Ministerio de Ambiente de la localidad. Adicional al material particulado, se midió la eficacia de la vegetación en la remoción de metales como el Níquel, Cobre, Plomo, Manganeso y Zinc, estimados por medio de la técnica de lavado de hojas con respecto a hojas sin lavar. Los resultados arrojan disminuciones de un 20.83% en el escenario de árboles establecidos sin espacios con respecto a las medidas de la estación base. El escenario en el cual los árboles se separaron a una distancia de 0.8m, se encontró un incremento de la concentración de PM_{2.5} relacionados con el incremento de vehículos en el tiempo de muestreo y en el efecto dispersivo que los espacios que impedía la deposición del material. La remoción de materiales pesados se vio representada por un porcentaje de remoción más alto en el escenario con mayor densidad y una remoción más efectiva del Níquel, seguido por el Plomo y por último el Cobre (Ozdemir, 2019).

Otros métodos para la determinación de la capacidad de remoción de contaminantes parte de la modelación del efecto aerodinámico causado por los árboles y el efecto en el fenómeno de deposición de PM_{2.5} por árboles, césped y edificios en temporadas de verano, evaluados tanto en la zona urbana como suburbana. Los resultados muestran en un análisis global una reducción del 11% de PM 2.5, mientras que en la zona suburbana en donde hay mayor presencia de vegetación la reducción fue de 14%, demostrando la influencia de los árboles en el favorecimiento de deposición del material en la superficie. Con respecto a la deposición, se obtuvo una disminución de 2.5% de la concentración por efecto de los árboles, en comparación con el césped y las construcciones que no representaron valores significativos (Jeanjean, Monks, & Leigh, 2016)).

Distintos autores para la medición de la retención de material particulado, se basan en la recolección de hojas de los árboles en evaluación para determinar por medio de un balance de masas la concentración de PM_{2.5} acumulado en las mismas durante un periodo de tiempo determinado y antes diferentes condiciones meteorológicas (sol, tiempo seco, lluvia) (Lixin Chen, 2015). Por el contrario, los autores Thithanhthao Nguyen y Xinxiao, basan su estudio en la medición del material particulado en el sitio por medio de equipos de muestreo de la calidad del aire. Ambos métodos han logrado captar y proporcionar datos de qué tipo de especies y sistemas vegetales son más eficientes en la remoción del contaminante en los diferentes ambientes de aplicación (Nguyen, Yu, Zhang, Liu, & Liu, 2015).

Existe una metodología poco conocida en donde se incluye la creación de un equipo capaz de convertir el material particulado en partículas de aerosol, para posteriormente ser cuantificadas y llevadas a concentración removida. El método cuantifica la adsorción foliar de PM 2.5 y otras partículas mediante la agitación y el soplado, con el fin de remover la electricidad estática y convertir el material particulado presente en la hoja en aerosol y así medir la masa de PM 2.5 aerosolizado y calcular la tasa de adsorción de PM 2.5 de la hoja (Lua, et al., 2018).

Para resaltar las bondades y beneficios que prestan los árboles en las zonas urbanas, sin establecer criterios de especies y distribución en el espacio, algunos autores a partir de validación de un modelo, buscan conocer cuánto cambia el gradiente de la concentración de PM_{2.5} entre un punto de alto flujo vehicular y a medida que se ingresa ciertas distancias en el interior de un parque de la ciudad de Madrid. El estudio realiza la medición en el sitio en puntos fijos dentro del parque a diferentes distancias de la vía, muestreos móviles cerca de parque y en

la zona de flujo vehicular, tanto en épocas de verano como en invierno. Los resultados identifican altos gradientes en la reducción de la concentración de material particulado a medida que los puntos de medición se encuentran más al interior del parque respecto a la línea de flujo de tráfico, debidos a la presencia de vegetación que actúan como barrera. A una distancia de 200 metros, el porcentaje de reducción del contaminante es del 50 % y a una de 20 metros la reducción es del 25 %, lo cual da cuenta de la importancia de la presencia de material vegetal en la mitigación de la problemática de calidad del aire (Gómez et al, 2018).

Como parte de un proceso natural de las especies vegetales, la absorción de Dióxido de Carbono CO₂ es uno de los servicios vitales prestados por los árboles que permiten el desarrollo de la vida. (Baraldi, et al., 2019) demuestran la capacidad de algunas especies vegetales de remover del aire partículas contaminantes y gases como ozono y CO₂ por medio de la aplicación de modelos y a partir del análisis de 25 especies de árboles frondosos y de hoja ancha que se encontraban sembrados en macetas, analizando la capacidad de cada una de las especies de remover tanto partículas como gases contaminantes. Encontraron entonces que las especies con mayor porcentaje de remoción de PM10 fueron la *Liriodendron tulipifera* con una remoción de 139.70 gramos por planta por año, seguido por el *Celtis australis* con un valor de 132.07g, y el *Acer campestre* y *Acer platanoides* con 104,40g. Las que presentaron mayor captura de CO₂ fueron *Prunus cerasifera* con un valor de 789.10 kilogramos por planta, seguido por *Quercus cerris* con 784.70kg, *Acer campestre* con 772,63kg y *Acer platanoides* con un valor de 738.59kg (Baraldi, et al., 2019).

En una ciudad con problemas de contaminación del aire, generalmente tienden a tener poco espacio disponible para el establecimiento de cobertura vegetal. Estudios aplicados identifican por medio de sistemas de información geográfica, las áreas disponibles y potenciales para el establecimiento de vegetación, encontrando las áreas circundantes a las vías como los espacios menos aprovechados y con mayor potencial para las siembras. Adicional, realizan un análisis por medio de modelos de las capacidades de remoción de PM10 y la disminución de las temperaturas máximas en épocas de verano. Como resultado importante se identifica una correlación positiva entre la presencia de vegetación con la remoción de material particulado y el mejoramiento de las condiciones bioclimáticas del territorio, representadas en temperaturas más bajas en épocas de verano (Kroegera, McDonald, Bouchera, Zhangc, & Wang, 2018).

Finalmente, existen estudios en donde a partir de percepciones de las comunidades se identifican las bondades o atributos más valorados de espacios naturales o sistemas vegetales, logrando identificar qué servicios proveen en un entorno y cuáles son las necesidades que demanda la población. Dichos estudios promueven y sustentan el desarrollo de políticas y proyectos de inversión multipropósito que generen mejoras en las condiciones ambientales y proporcionen servicios y beneficios a la población de un territorio (Miller & Montalto, 2019)).

Contexto general del Valle de Aburra

El Valle de Aburra forma parte de la cuenca natural de Río Medellín y se encuentra localizado sobre la Cordillera Central Andina en el centro-sur del Departamento de Antioquia. Tiene una longitud aproximada de 60 kilómetros y amplitud entre crestas de unos 10 km promedio. Su topografía es irregular y pendiente, las laderas ascienden a alturas de 2.800 msnm y posee elementos naturales topográficos que sobresalen, tales como el Cerro Nutibara, el Volador y el Picacho (Correa, Zuluaga, Palacio, Pérez, & Jiménez, 2008).)

Dadas las características geomorfológicas de la zona, el nivel de pluviosidad se encuentra entre 1000 y 2500 mm/año (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2005), y la temperatura promedio anual es de 17°C en las partes altas de las laderas y entre 20°C y 24°C en las partes bajas. Los patrones de los vientos superficiales son predominantes en el sentido del segmento sur del valle entrando por el noreste, girando más arriba con dirección sureste y finalmente convirtiéndose en vientos del este (Correa, Zuluaga, Palacio, Pérez, & José, 2008).)

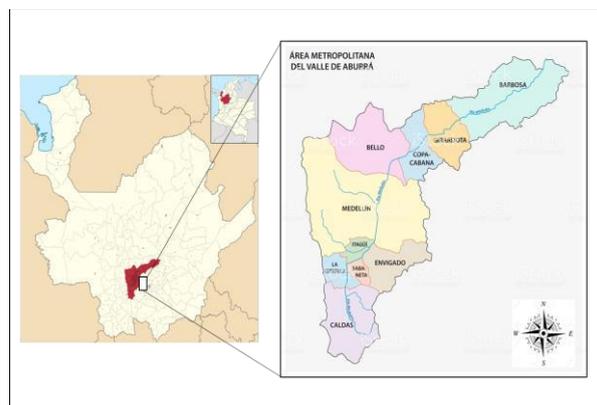


Figura 4: Localización del Valle de aburra. Fuente: Adaptado propia.

Problemática urbana

Con respecto a su configuración urbana, el Valle de Aburra es su parte más plana se encuentra completamente urbanizado, lo cual ha ocasionado que la población crezca hacia las laderas occidental y oriental, dándole al territorio una configuración en la que en la superficie se entremezclan bosques aislados con una malla urbana densa. La calidad y cantidad de la vegetación natural ha experimentado deterioro y cambios severos en las partes altas debido a la fuerte presión urbanística que se ha configurado hacia esas zonas, ocasionando problemas ambientales serios, déficit de zonas verdes, espacio público y zonas marginales en la ciudad que han venido siendo objeto de los planes de planificación del territorio y de gestión para el mejoramiento de las condiciones ambientales.

Debido a la configuración del valle y el aumento de las fuentes de emisión de contaminantes en la atmosfera, Medellín es considerada la segunda ciudad más contaminada del país y sus concentraciones de material particulado son mayores a las ciudades con mayor producción industrial (Área Metropolitana del Valle de Aburra, 2007). A partir de lo anterior y teniendo como base las mediciones realizadas por la red de monitoreo de calidad del aire del Sistema de Alertas Tempranas SIATA, se han identificado algunas zonas críticas dentro del valle por contaminación con material particulado, monóxido de carbono y ozono troposférico (figura 5). El Área Metropolitana del Valle de Aburra ha identificado dichas zonas como ZUAP “Zonas Urbanas de Aire Protegido”, las cuales, por su probabilidad de causar daños en la salud humana por niveles de inmisión de contaminantes, ameritan medidas de control ambiental por parte de las autoridades competentes.

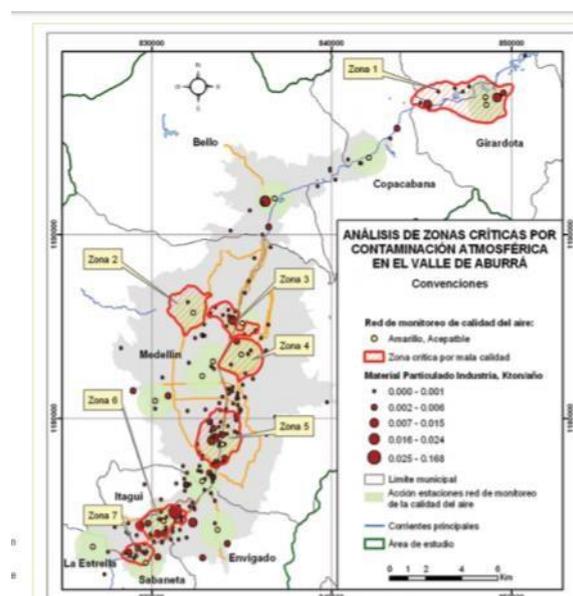


Figura 5: Zonas críticas por contaminación atmosférica Fuente: (Area Metropolitana del Valle de Aburra , 2007)

Finalmente, algunas de las causas principales de la emisión de contaminantes a la atmosfera también inciden en gran medida en los niveles de ruido del Valle de Abura, excediendo los niveles máximos permisibles establecidos por la normatividad para las zonas clasificadas.

Características Funcionales del Arbolado Urbano

Contribuciones o potenciales de la vegetación

La conexión de la población con su entorno y la forma de ver su alrededor muchas veces se encuentra representada por emociones, el conocimiento de los beneficios que se desprenden de este es importante transmitirlo para incorporar elementos del entorno en la cotidianidad y evidenciar los aportes a nuestra realidad, en este sentido queremos evidenciar los beneficios que prestan las zonas verdes urbanas, la presencia focalizada de cobertura arbórea genera en su entorno múltiples beneficios, la implementación de zonas verdes con alta densidad, o lugares como parques con alta presencia de árboles ha representado beneficios en la reducción de material particulado PM 2.5 como lo exponen los autores (Nguyen, Yu, Zhang, Liu, & Liu, 2015) en el cual se relaciona la disminución en la concentración a medida que se establece cercanía a la cobertura arbórea.

La cobertura vegetal como los árboles, arbustos y césped presentan múltiples beneficios hacia al entorno actuando como sumidero de CO₂ por medio de la fotosíntesis y el almacenamiento carbono como lo expresan los autores (Weissert, Salmond, & Schwendenmann, 2014).

En el entorno urbano se presenta alta emisión de diferentes tipos de sustancias y compuestos que afectan la salud de los habitantes y afectan la calidad ambiental de la zona, los árboles por medio de la absorción de los estomas de las hojas eliminan los gases contaminantes presentes en el aire y según los autores (Wissal Selmi, Christiane, Emmanuel, Nadege, Lotfi & David, 2016) estos pueden ser absorbidos por películas de agua para formar ácidos o reaccionar

con las superficies internas de la hoja, sin embargo cierta parte de las partículas se resuspende a la atmósfera, o es fijada por el agua y por efecto de gravedad al suelo.

Las barreras de vegetación pueden darse como un beneficio no solo para las personas que habitan el territorio, sino también como protección a la infraestructura por su funcionalidad de depósito y protección contra material particulado, metales pesados y polvo como lo expresan los autores (Kocica, Spasic, Urosevic, & Tomasevic, 2014).

El aporte de los árboles a la frescura de los sitios es percibida por muchos de nosotros al transitar por una vía con presencia de estos y notamos el cambio cuando atravesamos hacia alguna que no cuenta con árboles, en cuanto mejora del microclima según los autores (Kroegera, McDonald, Bouchera, Zhangc, & Wang, 2018) por medio de la implementación de al menos un 20% de los sitios potenciales de reforestación se presenta una reducción de 2° C, con esta regulación climática se permite un ahorro en la energía de los edificios y lugares que se encuentran cercanos a cobertura arbórea, así lo expresan (Selmi et al. 2016)

El valor estético es otro de los aportes de la vegetación y zonas verdes a las ciudades, se hace agradable a la vista y en muchos casos es una estructura de soporte al buscar tranquilidad y descansar la fatiga mental, (Wang, Zhao, Meitner, Hua, & Xua, 2019) en el cual también evidencian por medio de mediciones que el sistema arbóreo más eficiente es aquel que conserva sus hojas, representado por la especie perenne

Características y atributos

Los árboles urbanos prestan una serie de servicios que van desde la eliminación de contaminantes en el aire, el secuestro de carbono, la reducción de temperaturas locales, atenuación de ruido hasta el embellecimiento y paisajismo de las zonas urbanas, favoreciendo en conjunto la funcionalidad ecológica de todo el territorio.

Acorde al servicio que prestan, las especies vegetales en sí mismas poseen características naturales propias que las hace ser potencialmente contribuyentes de la mejora de las condiciones ambientales para determinados fines, es decir, su morfología, fisionomía, bioquímica y funcionalidad en general puede hacerla más benéfica para la remoción de un

contaminante en especial o de metales pesados cuando de elementos o compuestos se trata, o simplemente dependiendo de sus características físicas más benéfica para reducir ruido o favorecer sombra en los lugares en donde se establezca.

En la figura # 13, se muestran todas las características identificadas en la revisión bibliográfica que se requieren o que demostraron potenciar los beneficios o contribuciones al mejoramiento de condiciones ambientales para los factores específicos, disminución de material particulado, atenuación de ruido, microclima, adaptabilidad a condiciones contaminantes y en general para la disminución de contaminantes en el aire. Es importante resaltar que no existe una especie determinada que sea 100% eficiente en el cumplimiento de un objetivo, debido a que responde a dinámicas naturales constantemente cambiantes en el tiempo y que depende de la integrabilidad de diferentes factores para su funcionamiento potencial.

A continuación se mencionan las conclusiones de diferentes estudios revisados, en donde se plantean cada una de las características y se expresa su función y correlación con la mitigación de la contaminación atmosférica, para posteriormente realizar un análisis general de los requerimientos básicos a tener en cuenta en las siembras urbanas para maximizar los beneficios de las especies existentes, disponibles y que guarden relación con la funcionalidad ecológica del sitio establecido según sean sus condiciones ambientales actuales, teniendo presente que su eficiencia dependerá de la adaptabilidad de la especie a las condiciones de medio.

La eliminación de material particulado en todos los tamaños mediante deposición en ramas, tallos y hojas, y su capacidad de eliminación está estrechamente relacionada con factores como las características de las partículas (concentración, diámetro, composición), el tipo de vegetación (densidad del follaje, porosidad, altura de la planta, características de las hojas etc.) y el sitio (proximidad de la vegetación a la fuente de contaminación, condiciones meteorológicas etc.) (Moriet al. 2018).

Las comunidades de plantas con altos valores de Diámetro a la Altura del Pecho (DAP), Índice de Área Foliar (LAI) y Distancia a la Fuente de Contaminación (DPO) son las más efectivas en términos de reducción de las concentraciones de PM, lo que indica que cuanto más grande es la planta, más efectivamente reduce la contaminación del aire. Las comunidades

de plantas que consisten en árboles grandes y maduros, caracterizados por un mayor DAP, exhibieron una mayor retención de polvo y fueron más eficientes en la disminución de PM que las comunidades que comprenden árboles jóvenes (Zhu et al. 2019).

Los árboles se pueden agrupar de acuerdo con la morfología del dosel (es decir, la forma del dosel, la altura, la arquitectura, la densidad) y de acuerdo con la morfología de la hoja (es decir, el tamaño de la hoja, la forma). Los diferentes tipos morfológicos del dosel (piramidales, esféricos, parabólicos) de los árboles pueden estar relacionados con las diferencias en la intercepción de la radiación solar y el resultado confort térmico humano, en donde las estructuras con un dosel cerrado proporcionan un mayor beneficio de enfriamiento (Sanusi, Johnstone, May, & Livesley, 2017).

Índice de área de planta (PAI), que es una estimación de la fracción de tierra sombreada por la proyección vertical de las copas de los árboles, es más apropiado para comparar la intercepción de radiación solar de los árboles individuales de la calle, ya que da cuenta de todos los elementos físicos de la marquesina, tales como ramas, ramitas, frutas, flores y hojas, demostrando que con un aumento del PAI se incrementan los beneficios microclimáticos de los árboles (Sanusi, Johnstone, May, & Livesley, 2017).

Especies de plantas con valores de Índice de Tolerancia a la Contaminación (APTI) e Índice de Rendimiento Previsto (API) más bajos representan especies sensibles a las condiciones ambientales, las cuales pueden ser usadas como bioindicadoras, por el contrario, valores APTI y API más altos tienen relación con especie tolerantes y adaptables, las cuales se pueden usar para programas de siembras urbanas en áreas contaminadas para mitigar los niveles de contaminación (Karmakar & Kumar, 2019).

Las hojas con superficies esponjosas, pegajosas, ásperas (textura) y con presencia de pelos y ceras han sido asociadas con una mayor deposición de partículas con respecto a las hojas lisas (Mori, et al., 2018). Con respecto a los rasgos de las hojas, las plantas de hoja perenne pueden interceptar mayores cantidades de contaminantes en comparación con las especies de hoja caduca, teniendo en cuenta que la intercepción de partículas depende de la permanencia de las hojas en la planta (Moriet al., 2018).

Algunos tipos de vegetación liberan a la atmósfera diversos grupos de partículas de aerosoles biológicos primarios (PBAP), como bacterias y arqueas, hongos, esporas y fragmentos, virus, algas y cianobacterias, costras biológicas y líquenes y otros como fragmentos de plantas o animales y detritos. Los árboles también emiten polen, que afecta las alergias y emiten compuestos orgánicos volátiles (COV) que son precursores químicos de O₃ y PM 2.5 biogénico (Nowak, Hirabayashi, Doyle, McGovern, & Pasher, 2018).

Establecer cinturones anchos a lo largo de las vías y entre el receptor del ruido con una alta densidad de vegetación y con su tronco de un ancho considerable aumentará el blindaje acústico del ruido proveniente del tráfico (Van Renterghem, 2014).

Acorde a las características mencionadas , estudios realizados en el Valle de Aburrá acordes a las condiciones actuales del territorio, plantean de una forma muy relacionada con estudios de otros países, la necesidad de una adecuada planeación estratégica que optimice los servicios ecosistémicos, a partir de requerimientos de especies arbóreas con características que faciliten la remoción como (COPA DENSA, FOLLAJE PERMANENTE, ALTA ÁREA FOLIAR, SUPERFICIES FOLIARES CEROSAS Y PUBESCENTES) y una estructura que permita la dispersión vertical de los contaminantes como barreras laterales densas y porosas (Arroyave Maya, Posada Posada, Nowak, & Hoehn, 2019).

Otros autores por su parte describen los factores requeridos de la siguiente manera, a) mayor cobertura de árboles que conduce a una mayor eliminación total, b) duración de la temporada en la hoja (mayor longitud de la estación de crecimiento que conduce a una mayor eliminación total, c) porcentaje de área de hoja perenne d) velocidades de deposición (factores que conducen a mayores velocidades de deposición conduciría a un mayor flujo descendente y una eliminación total. Los factores se combinan para afectar la eliminación total de la contaminación y la tasa de eliminación de la contaminación por unidad de cubierta arbórea (Bottalicoet al. 2016).

Especies

La eliminación de la contaminación del aire es solo un aspecto de cómo los árboles urbanos afectan la calidad del aire, la reducción de temperaturas y de emisiones provenientes de diversas fuentes antropogénicas también hace parte de la contribución de la vegetación en

las zonas con requerimientos ambientales especiales. Sin embargo, al tratarse la vegetación de un sistema natural, el cual depende de factores dinámicos que cambian constantemente con el tiempo, la meteorología y las condiciones ambientales actuales, la eficiencia o contribución en la calidad del aire dependerá de la respuesta adaptativa y temporal del sistema con respecto al medio, es decir, el desarrollo y funcionamiento ecológico de la vegetación no es constante, su crecimiento, adaptación al medio, capacidades de retención, absorción de nutrientes y comportamiento funcional en general es variado y dependiente de los factores ambientales actuales.

Dicha dependencia del medio es demostrada en estudios en donde se evidencia que los niveles de contaminación del aire pueden afectar morfológicamente las especies vegetales respecto al número y área de las hojas, número y estructura de estomas, floración, crecimiento y reproducción; Bioquímicamente en sus enzimas, proteínas, pigmentos y contenidos de azúcar; Fisiológicamente en su PH y contenido relativo de agua. (Karmakar & Kumar, 2019). Adicionalmente, expresan que ningún tipo de vegetación es 100% adecuada para determinada tarea, la eficiencia y capacidad de respuesta puede variar con el tipo de especie, la altura y el tiempo meteorológico en que sea estudiada.

Para los efectos estudiados en la revisión bibliográfica objeto de este trabajo, en relacionados con la capacidad de algunas especies para la remoción de material particulado en el aire, el mejoramiento de las condiciones bioclimáticas y la absorción de algunos elementos del aire que son nocivos para la salud, los artículos analizados dan cuenta de algunos tipos de especies que demostraron ser más eficientes en cada factor analizado o que lograron un mayor efecto ambiental sobre el mejoramiento de las condiciones ambientales y se listan a continuación. En la tabla número # 1, se menciona tanto la especie como el factor afectado positivamente y una descripción básica de las características más importantes de las mismas que potencian su capacidad.

Tabla 1. Especies que demostraron ser eficientes en la mejora de condiciones ambientales en los artículos analizados. Fuente: Construcción propia

| Especies identificadas en la literatura | | |
|--|------------------------|--|
| Especie | Uso o potencial | Características relacionadas |
| Ulmus Procera | Microclima | Árbol de gran altura y diámetro grande |

| | | |
|-------------------------------------|---------------------|---|
| Platanus Acerifolia | Microclima | Árbol de sombra, gran altura y forma globosa, redonda y amplia |
| Viburnum lucidum | PM en vías | Arbusto de hoja ancha |
| E chinensis | PM en vías | |
| R Tometosa | PM en vías | |
| Pinus | PM 2.5 y PM10 | Especies de coníferas |
| Platydadus | PM 2.5 y PM10 | Hoja perenne, altura elevada, hojas carnosas y truncadas |
| Cunninghamia | PM 2.5 y PM10 | Conífera de gran altura, hoja perenne, crecimiento en suelos pobres |
| Taxidium | PM 2.5 y PM10 | Conífera, hoja perenne, hoja en espiral |
| Metasequora | PM 2.5 y PM10 | Forma globosa-ovoide, gran altura, hojas enfrentadas, crecimiento rápido |
| Quercus | PM 2.5 y PM10 | Árbol de gran porte, perenne |
| Platycarya | PM 2.5 y PM10 | Forma globosa-ovoide, escamosa, hoja esponjosa |
| Cinnamomum | PM 2.5 y PM10 | Perenne, hojas y corteza aceitosa |
| Ulmus Pumila | PM 2.5 y PM10 | Árbol caducifolio, hojas pequeñas pero densas |
| Catalpa Speciosa | PM 2.5 y PM10 | Tamaño mediano de hoja ancha |
| Magnolia Denudata | PM 2.5 y PM10 | Árbol caducifolio muy ramoso, muy escamoso, textura gruesa y hoja grande |
| Fraxinus Pennsaluanica | PM 2.5 y PM10 | Usado en construcción de cercos, mediana altura, resistente a la polución, buen generador de sombra |
| Pinus Tabulaeformis | PM 2.5 y PM10 | Tamaño mediano, forma ovoide, escamosos y espinoso |
| Liriodendron Chinese | PM 2.5 y PM10 | Árbol de gran altura, hoja caduca |
| Syrainga Reticulate | PM 2.5 y PM10 | Árbol pequeño, hoja de textura rugosa |
| Robinia Pseudoacacia (FALSA ACACIA) | PM 2.5 y PM10 | Mediano tamaño, longevo, crecimiento rápido. Corteza espesa, tronco rugoso, soporta contaminación |
| Liriodendron Tulipifera | PM 2.5 y PM10 y CO2 | Desarrollo rápido, productor de mieles |
| Celtis Austrialis | PM 2.5 y PM10 | Caducifolio, copa redonda y ancha |
| AcerCampestre | PM 2.5 y PM10 y CO2 | Caducifolio, tamaño pequeño, escamoso |
| AcerPlatanoides | PM 2.5 y PM10 y CO2 | Caducifolio, mediano de hojas dentadas |
| Sophora japonica | PM 2.5 y PM10 | Forma globosa, redonda y amplia, mediano, caduca |
| Flaxinus Chinensis (URAPAN) | PM 2.5 y PM10 | Porte grande, rápido crecimiento, hoja caduca, longevo, crecimiento en todo tipo de condiciones, resistente a la contaminación, tolera suelos pobres, gran desarrollo de raíces |

Las especies consignadas en la tabla, en donde la mayor parte de las especies hacen parte del grupo de las gimnospermas o más conocidas como coníferas, tienen una alta dependencia con los países que han realizado este tipo de estudios, siendo pioneros en el tema los países asiáticos seguidos de los países norteamericanos.

Como característica importante resaltada en diferentes estudios, las hojas con superficies esponjosas, pegajosas o ásperas (textura) pueden capturar más material particulado que las hojas lisas (Zhu et al. 2019). La presencia de pelos, ceras y tricomas ha sido asociado con una mayor deposición de partículas.

Gran parte de los estudios analizados coinciden con autores que mencionan y demuestran la alta eficiencia de las coníferas en la remoción de material particulado PM_{2.5}, seguidas de las especies de hoja ancha, debido a su buena adaptabilidad a las condiciones urbanas y sus bajos impactos negativos en la calidad del aire de las ciudades. (Yang, Chang, & Yan, 2015) Algunos resultados de análisis de la eficiencia de las coníferas muestran que la adsorción de PM 2.5 por unidad de área de la hoja de 2,45 y 2,38 veces mayor que la adsorción de los árboles de hoja ancha (Luo et al. 2018). Adicional, las coníferas de hoja perenne tienen la capacidad de mitigar las concentraciones de CO₂ locales (Weissert, Salmond, & Schwendenmann, 2014).

Con respecto al tipo de hojas, las hojas caducas son aquellas que como su nombre lo dice caen, es decir, caen de la planta en épocas desfavorables; las hojas perennes son aquellas que se mantienen en la planta permanentemente. La vegetación de tipo perenne fue más efectiva que la de tipo caduca, basado en mayores tasas anuales de eliminación de PM_{2.5} y las tasas promedio de eliminación (Wu, Wang, Qiu, & Peng, 2019). La eficiencia entonces del tipo de hoja se encuentra relacionado con la permanencia de las mismas en la planta, teniendo en cuenta que la mayor parte de las partículas interceptadas se retienen en la superficie de la planta y de las hojas, aquellas especies que no pierden sus hojas tienen mayor capacidad de retención temporal de material particulado.

Resultados muestran que extender el área de arbustos de hoja perenne en zonas de alta exposición a la contaminación o a las fuentes de emisión ofrecen el mayor potencial de eliminación de PM_{2.5} de la atmósfera en carreteras principales y locales, entre carriles y en zonas aledañas a vías concurridas por tránsito peatonal (Wu, Wang, Qiu, & Peng, 2019).

Distribución y Localización en zonas Urbanas para Maximizar el Beneficio

Vías

El valle de Aburrá ha presentado un incremento en su población, en el parque automotor, lo que se percibe como un incremento de emisiones en las vías transitables, es por esto que se deben identificar las zonas prioritarias y críticas para optimizar los espacios que las componen y tenerlas como un potencial, con la presencia de zonas verdes se ha evidenciado una disminución en la concentración de material particulado y una medida preventiva a la transmisión horizontal de este. Según (Chen, Liu, Zou, Yang, & Zhiqiang, 2016) la configuración más efectiva al momento de prevenir la transmisión de material particulado sería la siembra del árbol con césped, ya que el césped por encontrarse al nivel de las emisiones fija las partículas y el árbol actúa como barrera y depósito en sus hojas, ramas y troncos.

Al incrementar las actividades de siembra y potencializar los sitios para realizar esta actividad en las vías del Valle de aburrá se producirían incrementos en los beneficios como ahorro de energía, captura de carbono, calidad del aire, protección contra tormentas y valor estético, como lo expresan los autores (Hilde & Paterson, 2014).

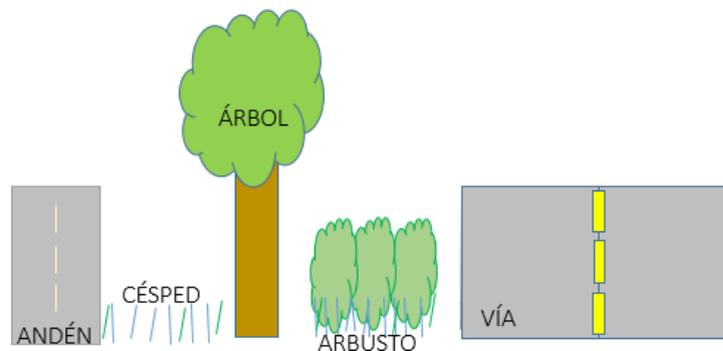


Figura 6: Distribución más eficiente para la disminución de material particulado en vías transitadas. Fuente (construcción propia)

Sin embargo el establecimiento de especies y configuraciones inadecuadas podría generar el efecto contrario del beneficio que se pretende y puede resultar contraproducente al ralentizar el flujo de aire y generar incrementos de concentraciones de contaminantes, como lo expresan los autores (Xing, Brimblecombe, Wang, & Zhang, 2019) al referirse a los árboles con altura moderada con una copa baja y densa, en este sentido se debe evitar establecer árboles

con estas características en las zonas aledañas a la vía para garantizar una adecuada dispersión de los contaminantes

Según (Arroyave Maya, Posada Posada, Nowak, & Hoehn, 2019) el establecimiento de árboles grandes y de copas densas en las vías reduce la dispersión a las capas superiores de la atmósfera y aumentan los niveles locales de contaminación atmosférica, pero la implementación de vegetación baja cercana a las fuentes puede mejorar la calidad del aire aumentando la deposición, se deben buscar especies de hábito bajo y en esa misma dirección implementar arbustos o vegetación que se encuentre al nivel de emisión de los vehículos que transitan.

Una de las principales molestias de las personas que se encuentran cerca de las vías continuamente transitadas es el ruido que se desprende de la movilización por el sector, es entonces importante planificar la infraestructura vial con un a medida preventiva y mitigable, uno de los servicios prestados por los árboles es el de barreras contra el ruido, el autor (Van Renterghem, 2014) plantea que establecer cinturones anchos a lo largo de las vías y entre el receptor del ruido con una alta densidad de vegetación con su tronco de un ancho considerable aumentará el blindaje acústico del ruido proveniente del tráfico, es importante mencionar que establecer los árboles con DAP ancho y poca distancia de separación no es tan viable por la competencia de nutrientes, luz y espacio.

Microclima

Uno de los problemas más comunes en las grandes ciudades por efectos de la disminución de las zonas verdes y los materiales usados para la construcción de infraestructura (asfalto y cemento), son las islas de calor durante la noche por la liberación lenta del calor absorbido en el día y la sensación térmica elevada en horarios diurnos, que disminuyen el confort térmico de la población humana y por ende su bienestar. La mitigación de las islas de calor urbana es importante para mejorar la salud humana y las condiciones ambientales de las ciudades en constante crecimiento.

Algunos autores han estudiado el efecto de los árboles en la disminución de las altas temperaturas de la ciudad. La mitigación de las islas de calor urbana al aumentar la vegetación y la cubierta del dosel, puede ayudar mediante la intercepción de la radiación de la energía

solar, proporcionando sombra y enfriando el aire circundante (Sanusi, Johnstone, May, & Livesley, 2017).

Las plantas tienen una capacidad de conductividad térmica menor que los materiales de construcción y superficies duras, a mayor superficie de áreas verdes en el terreno, mayor será el impacto en la mitigación del efecto “isla de calor”. Se recomienda la instalación de Árboles que aseguren la cobertura de, al menos, un 70% de la superficie horizontal de las calles y sobre áreas duras, correspondientes a circulaciones peatonales exteriores, plazas o estacionamientos, para bajar la temperatura ambiental y enfriar la “isla de calor” (Minvu, 2018)

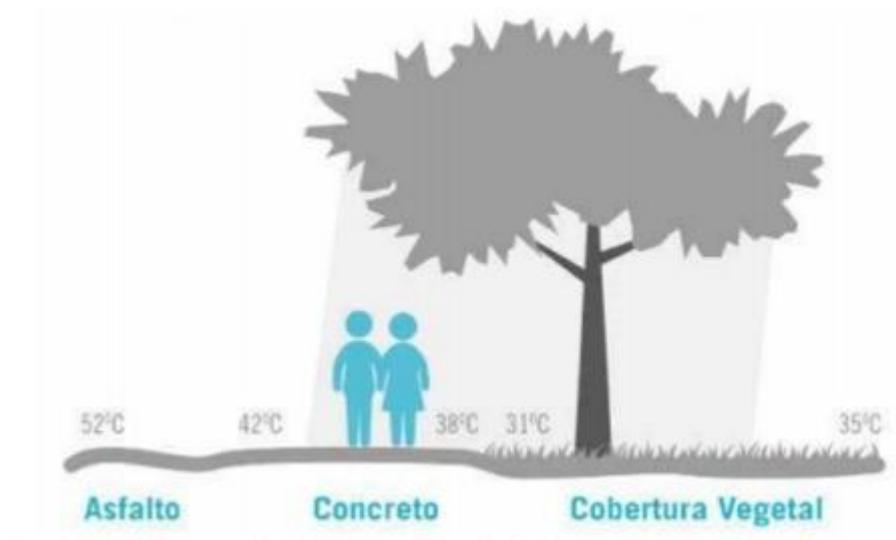


Figura 7 Esquema efectos del arbolado urbano en la temperatura local. tomada de (Minvu, 2018)

En cuanto al aporte de los árboles al microclima, expresan que plantar árboles aledaños a las vías reduce la exposición de los peatones a la radiación, por medio de la provisión de sombra que intercepta la radiación, plantean que los árboles de tamaño grande son más efectivos en la reducción de la temperatura radiante promedio (MRT) y que la siembra de árboles de alturas bajas se debe realizar con menor espacio entre ellos para conseguir el mismo efecto, es decir o sembrar árboles grandes o si en su defecto no es posible sembrar árboles pequeños de manera cercana. Los árboles de talla grande reducen la temperatura 23.5 K más que los árboles pequeños. (Yeonet al. 2019)

Por otro lado, por medio de modelación a nivel de ciudad se ha encontrado una disminución en la temperatura radiante promedio (MRT) de unos $.3^{\circ}\text{C}$ en escenarios con mayor cobertura arbórea. Dichos planteamientos son indicadores de que una mayor intervención al territorio de sitios potenciales de siembra y adecuación de lugares para realizarlas prestará a las ciudades y territorios un escenario preventivo a futuro de las máximas temperaturas y de los efectos del cambio climático, y actualmente a proteger a los habitantes de la intensidad de la radiación actual. (Aminipouriet al. 2019)

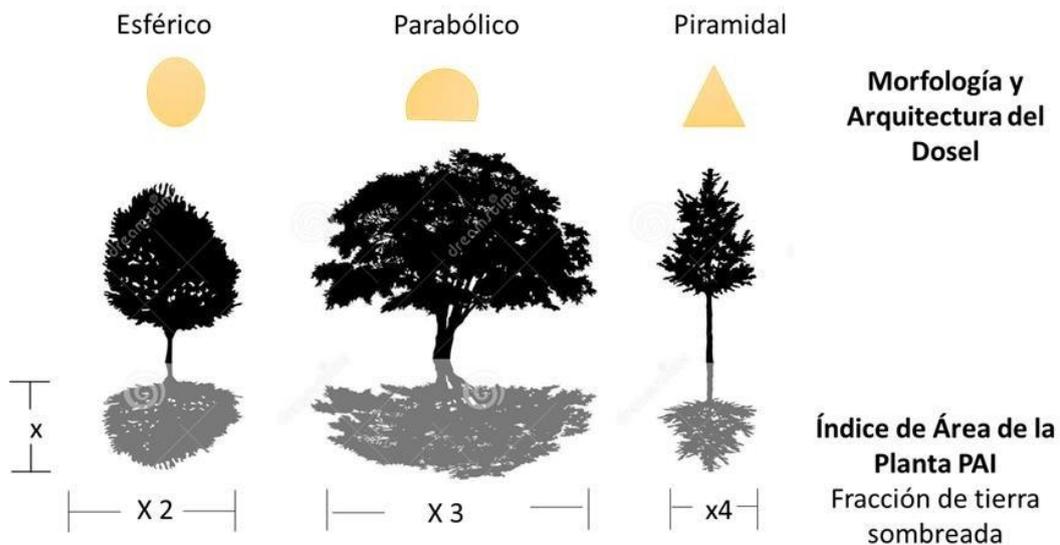


Figura 8: Características esenciales en las especies para mitigación de las temperaturas en ambientes urbanos. Fuente: Adaptación propia

Para efectos de microclima por efecto de los bosques urbanos, la estructura, forma y tamaño de los árboles es determinante, debido a que aumentan su nivel de sombra y por ende su capacidad de retención de la radiación solar. La premisa anterior es demostrada por estudios en los cuales se analizan factores como la arquitectura, índice de área del dosel, forma y estructura de las hojas entre otras características de diferentes especies, correlacionando los valores encontrados con el efecto de las mismas en la disminución de las temperaturas sobre andenes peatonales en vías con predominancia de dichas especies.

Estudios encuentran que parámetros como el Índice de Área de la hoja (LAI) (estimación del área unilateral del follaje por unidad de superficie) es un aspecto importante de las copas de los árboles que afectan la penetración de luz hacia la superficie o suelo. Adicional, el índice de Área de la Planta PAI (Fracción de tierra sombreada) mostrada gráficamente en la

FIGURA 8, puede ser más apropiado para comparar la intersección de la radiación solar debido a que tiene en cuenta todas las características físicas de la marquesina, tales como ramas, hojas, flores, frutos y en general la arquitectura de las especies. (Sanusi, Johnstone, May, & Livesley, 2017)

Teniendo en cuenta lo anterior, se demuestra que el grado al cual los árboles pueden modificar el microclima de los espacios en la ciudad pueden ser influenciados por las características del dosel, las hojas, la arquitectura del tallo, el tamaño y la densidad de siembra o disposición adecuada y estratégica en el espacio.

Finalmente, es importante tener en cuenta que la vegetación no es el único factor que juega un papel importante en el microclima, las características de las calles, la orientación de los espacios con respecto a la exposición solar, la presencia de infraestructura circundante y la disposición de las especies pueden ser involucradas para potenciar los beneficios de los árboles a partir de una contribución conjunta al mejoramiento de condiciones ambientales, confort térmico de la población y disminución del uso de energía eléctrica para el enfriamiento localizado.

Como ejercicio de aplicación, el Área Metropolitana del Valle de Aburrá tiene establecido el Plan de Variabilidad Climática. Islas de Calor, en el cual se identifican las áreas que requieren mayor articulación de estrategias para la adaptación y mitigación de las altas temperaturas actuales y futuras.

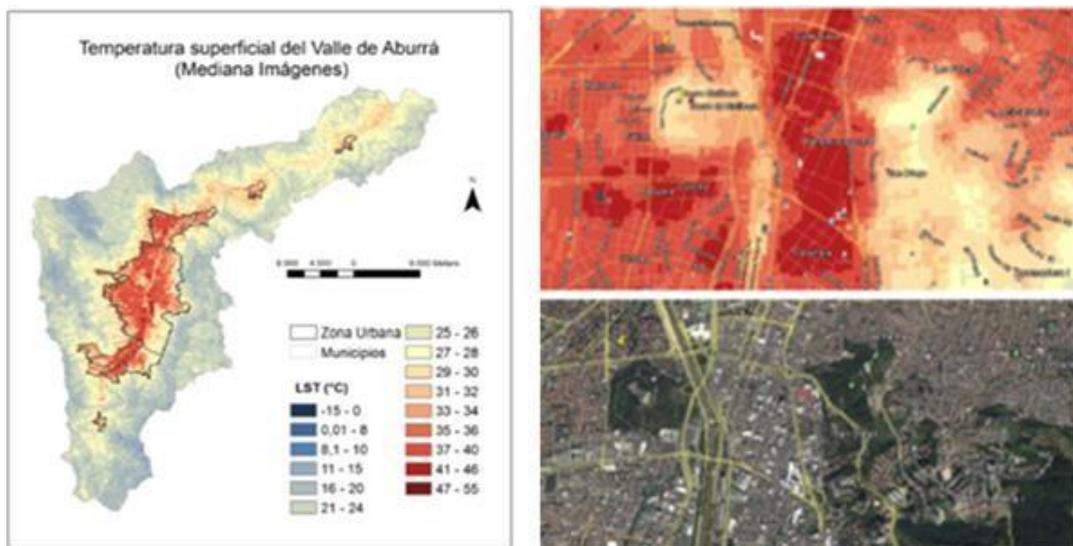


Figura 9 Temperaturas superficiales en el Valle de Aburrá. Tomado de (AMVA)

En la figura 9 se muestra la relación que existe entre el aumento de las temperaturas con las áreas mayormente pobladas y ocupadas en el todo el valle (a). Adicional se muestra la concordancia entre la atenuación de las temperaturas en las zonas de bosques urbanos a la altura del Cerro Nutibara debido a la presencia de vegetación. El plan que tiene un periodo de aplicación comprendido entre 2018-2030, tiene establecido el eje temático número 4, correspondiente a la silvicultura y a gestión de los bosques urbanos y como eje articulador el eje 6 del Plan Integral de Gestión de la Calidad del Aire en relación al incremento de espacios verdes y arbolado urbano y protección de ecosistemas regionales (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2019); ambos generan planes y líneas de acción específicas direccionadas a potenciar las contribuciones de los bosques urbanos en el mejoramiento de la calidad ambiental de las ciudades.

Ruido

Otro de los grandes inconvenientes de las ciudades con la calidad del aire es la generación de ruido a decibeles dañinos para la población humana, tanto en vías de alto flujo vehicular como en zonas industriales y algunas urbanas por fuentes específicas. Teniendo en cuenta que de acuerdo a las necesidades y las finalidades de las siembras urbanas y el papel que cumplen los árboles en diferentes ambientes, una de las contribuciones y beneficios prestados por las especies arbóreas es la atenuación de ruido a niveles permisibles bajo los estándares establecidos en la normativa.

Así lo han comprobado algunos autores que han analizado los servicios prestados por los árboles como barreras contra ruido, encontrando que establecer cinturones anchos a lo largo de las vías y entre el receptor del ruido con una alta densidad de vegetación y con su tronco de un ancho considerable aumentará el blindaje acústico del ruido proveniente del tráfico, sin embargo, al ser indispensable un diámetro a la altura del pecho considerable, es importante mencionar que establecer los árboles con DAP ancho y poca distancia de separación no es tan viable por la competencia de nutrientes, luz y espacio (Van Renterghem, 2014).



Figura 10: Esquema barrera adecuada para atenuación de ruido en vías. Fuente: Adaptado de (Minvu, 2018)

Es por esta razón que la densidad de siembra es el parámetro del cual se debe hacer uso y aumentar su potencial con fines de mitigación de ruido, así también lo establece el Manual de Elementos Urbanos del Gobierno de Chile, en donde se dice que la vegetación reduce la propagación del ruido en forma proporcional al incremento de la superficie foliar. El nivel de reducción dependerá del tipo de vegetación, de la dirección de la barrera vegetal y de su densidad (figura 10). Las hojas y ramas reducen el sonido transmitido, principalmente dispersándolo, mientras el suelo lo absorbe (Minvu, 2018).

Infraestructura

Las consecuencias de un nivel bajo de la calidad del aire no solo afectan la población humana en las áreas urbanizadas de las ciudades, los componentes y compuestos disueltos en el aire poseen una variabilidad de propiedades químicas que los hace perjudiciales para la infraestructura existente, generando corrosión, óxido y deterioro generalizado de la misma. Adicional, como se mencionaba en el ítem anterior, condiciones bioclimáticas de las zonas aledañas a las edificaciones pueden aumentar los requerimientos energéticos para el uso de aires acondicionados para el mantenimiento de un confort térmico o de las condiciones necesarias para el desarrollo de ciertas actividades.

Autores han demostrado la funcionalidad de los árboles como depósito y medida de protección contra material particulado, polvo y metales pesados hacia el patrimonio estructural y hacia los elementos que se encuentran dentro de este. Demostrando que en las hojas pertenecientes a árboles cercanos a infraestructura se encuentran elementos provenientes del hollín y combustible, evitando de esta manera su ingreso o incrustación a las estructuras aledañas (Kocica, Spasic, Urosevic, & Tomasevic, 2014).

En este sentido y haciendo alusión a todos los factores que juegan un papel fundamental en las condiciones de la calidad del aire que requieren de un adecuado manejo y de estrategias integrales de gestión para su mejoramiento paulatino, Se hace necesario identificar los sitios prioritarios y sitios potenciales de siembra, los cuales son identificados principalmente en el núcleo de la ciudades (Áreas concurridas), en las zonas industriales y de alto flujo vehicular , en donde se correlacionan con las altas concentraciones de contaminantes, y donde se establecen que estos potenciales se encuentran en áreas de poca vegetación, suelo desnudo y con áreas impermeables. La realización de siembras a niveles máximos potenciales en este tipo de espacios fue correlacionada con una reducción de 133 toneladas por año de contaminantes (Bodnarukaet al. 2017) y unos beneficios económicos de 4,3 millones de dólares por su reducción.

Se hace nuevamente énfasis en la necesidad de adecuar sitios para las siembras en las áreas más críticas por medio de levantamiento de área impermeable y cambio por cobertura, aplicando las siembras en los sitios potenciales que se encuentren disponibles con especies adecuadas para el sector y acorde a las necesidades del entorno, siendo importante en este sentido realizar un análisis de las características requeridas para potenciar mencionadas para cada fin en el ítem de “Características y Atributos” de este trabajo.

Infraestructura Verde como Estrategia de Equipamiento Urbano y Planificación del Territorio.

La infraestructura Verde es una red estrictamente planificada de alta calidad natural, incluye todas aquellas áreas semi-naturales y cultivadas, diseñadas y logradas para entregar una amplia gama de servicios y productos para una vida saludable en las zonas urbanas (Escobedo, Giannicob, Jimc, Sanesib, & Lafortezzac, 2019), conservando los valores y funciones naturales del ecosistema y proporcionando beneficios a las poblaciones humanas. Autores como (Conway, Almas, & Coore, 2019) identifican que este tipo de infraestructura contribuye a potenciar los servicios y las contribuciones del arbolado urbano, manteniendo la integridad ecológica y planificando de manera adecuada todos los espacios disponibles en la infraestructura existente.

Los requerimientos de las ciudades cada vez más demandantes de recursos y servicios, a menudo contribuyen al aumento de la contaminación y las configuraciones actuales del entorno, en donde priman los espacios con alta densidad de infraestructura (Vías, Edificios, Industria) con predominio de pisos duros y donde se altera toda la funcionalidad del sistema urbano con el peri urbano y rural. Las ciudades en general no tienen sistemas productivos de los cuales puedan auto proveer la población, su enfoque ha sido en la generación y prestación de servicios, demandando recursos de las zonas rurales que aún mantienen una integridad ecológica que les ofrece todo tipo de beneficios.

Según lo mencionado, las grandes ciudades requieren mejorar sus condiciones ambientales a partir de la gestión adecuada de sus bosques urbanos, aprovechando todo el potencial de beneficios generado por los mismos. Los servicios ecosistémicos que demandan de los bosques urbanos se enfocan en el uso, disfrute y consumo directo para la producción de beneficios específicos y medibles (Escobedo, Giannicob, Jimc, Sanesib, & Lafortezac, 2019), ya sea con fines productivos, funcionales o de mitigación de condiciones inadecuadas en las zonas urbanas, altamente alteradas y contaminadas.

La gestión de los bosques urbanos ha sido el enfoque de aplicación de la Silvicultura Urbana, disciplina que se basa en la práctica de la ciencia y en experiencias de planificación y de gestión adecuada de los espacios verdes, integrando varias disciplinas para maximizar los beneficios en las ciudades (Escobedo, Giannicob, Jimc, Sanesib, & Lafortezac, 2019). La gestión de los bosques urbanos ha sido generalmente enfocada en el embellecimiento paisajístico, sin embargo, la evolución y la aplicación de las estrategias debe migrar a la mitigación de riesgos, al mejoramiento de las condiciones ambientales, la funcionalidad del ecosistema, la conectividad ecológica y hacia la provisión de recursos y servicios.

La figura 11 muestra los diferentes enfoques que se deben de integrar para poder hablar de una infraestructura verde hacia la provisión de servicios para las poblaciones humanas. Los sitios adecuados para las siembras planificadas son aquellos que son óptimos para el crecimiento de la vegetación, los cuales se caracterizan por buena calidad y cantidad de suelo y con un suficiente espacio para el desarrollo de condiciones para el alcance de su potencial genético y así proporcionar los máximos servicios al ecosistema (Conway, Almas, & Coore, 2019). Adicionalmente, aun cuando existe un uso generalizado de especies exóticas que fácilmente se adaptan a las condiciones ambientales del entorno urbano, el uso de especies

nativas es recomendado para la protección principal del hábitat natural y de la biodiversidad local.



Figura 11: Esquema aplicativo de infraestructura verde como un proceso sistémico de factores que potencian los beneficios de los bosques urbanos. Fuente Adaptación propia

Teniendo en cuenta que la finalidad de potenciar los servicios de los bosques urbanos es orientado hacia el bienestar de las poblaciones humanas, autores como (Miller & Montalto, 2019) han analizado la preferencia de las mismas con respecto a áreas forestales de parques, áreas naturales y árboles en las vías en relación a la percepción de beneficios generados, encontrando que el porcentaje mayor se inclina hacia los parques y áreas naturales por su potencial recreativo, seguido de los árboles en vías por su favorabilidad en el microclima local.

Finalmente, analizando la importancia de este tipo de enfoques para la mitigación de problemáticas ambientales en las áreas urbanas, en el caso específico de esta revisión bibliográfica con respecto a la disminución de la contaminación atmosférica, se ha demostrado que los Árboles urbanos, el césped y los techos verdes tienen el potencial para mitigar las emisiones locales de CO₂ directamente a través de absorción fotosintética durante el día y a través del almacenamiento de carbono en forma de tallos, ramas, raíces (aumento de biomasa) (Weissert, Salmond, & Schwendenmann, 2014), sin embargo, como se ha mencionado no es el

único enfoque que se aplica para mejorar la funcionalidad ecológica de las ciudades, se deben tener en cuenta diferentes atributos e interrelaciones del sistema para el logro de los objetivos.

A continuación, en la figura 12, se muestran todos los diferentes actores que deben ser involucrados para la maximizar y potenciar los servicios generados por la vegetación hacia la infraestructura ya establecida.

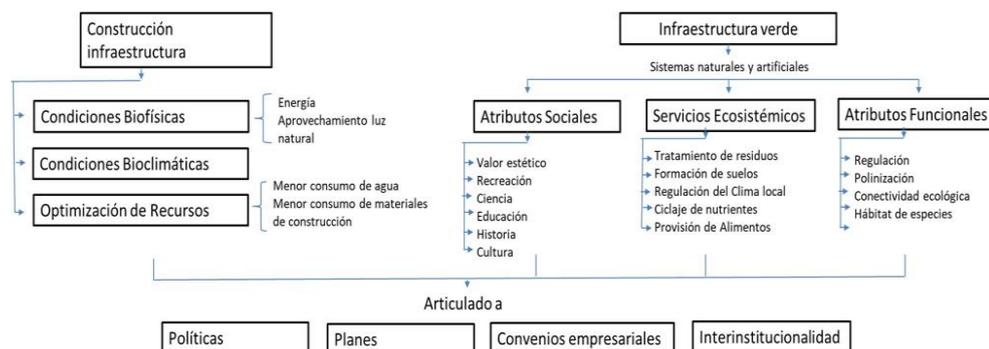


Figura 12: Esquema de factores para la aplicación holística de la infraestructura verde con fines de funcionalidad ecológica de las ciudades. Fuente Construcción propia

Planes y programas

El Valle de Aburrá cuenta actualmente con un promedio de 5.68 m²/hab de espacios públicos verdes urbanos, el cual es deficiente si se tiene de referencia el umbral mínimo de 9 m²/hab establecido por la Organización Mundial de la Salud OMS y el Banco Interamericano de Desarrollo, como se mencionaba anteriormente, no solo por la contribución de árboles se deben aumentar los espacios verdes en las ciudades, sino también para el cumplimiento de estándares internacionales e índices de calidad de vida de la población. La infraestructura verde es un enfoque que debe ser articulado a políticas, planes y programas que contribuyan con el objetivo de mejorar la funcionalidad ecológica de las ciudades, a continuación, se describe uno de los planes pilares de la autoridad ambiental aplicados al enfoque y al déficit de áreas verdes y cantidad de árboles en la ciudad.

Plan Siembra: El plan nace como estrategia que atiende el déficit de árboles que actualmente se encuentra en un aproximado de 700.000 árboles. El plan se orienta a la producción de material vegetal, manejo, conservación y mantenimiento de especies arbóreas que embellecen y mejoran el ecosistema del Valle de Aburrá, a partir de la identificación de

espacios potenciales se siembra con su georreferenciación correspondiente. Adicionalmente va acompañado de programas de sensibilización y educación ambiental, teniendo en cuenta que la responsabilidad del cuidado del medio es compartida y es necesaria para hacer la comunidad parte integral de las soluciones planteadas. (Área Metropolitana del Valle de Aburrá,2019)

Para la aplicación de las estrategias planteadas fue necesario la expedición de acuerdos metropolitanos, los cuales permiten establecer lineamientos y adquirir recursos financieros para el sostenimiento y logro de los objetivos. El Acuerdo Metropolitano 19 de 2017 que “Adopta lineamientos y determinaciones en torno a la gestión del espacio público verde urbano, se crea el Fondo Verde Metropolitano y se reglamenta la reposición por tala autorizada de árboles en el área urbana del valle de Aburrá” y por medio del cual se crea el Fondo Verde metropolitano que, con recursos financieros asociados a los trámites de aprovechamiento forestal, multas y sanciones, se utilizará para la adquisición de nuevo espacio público verde, preferentemente los espacios que integren los ecosistemas estratégicos, las áreas de importancia ambiental, las redes ecológicas urbanas y el sistema de espacio público. (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2019)

Con este Acuerdo, la autoridad ambiental busca incrementar los corredores naturales, logrando de esta manera la conexión ecológica y la ampliación de las 52 redes ecológicas existentes en el territorio, impidiendo posibles desconexiones e interrupciones entre ellas y por ende de la estructura ecológica que une la ciudad con las áreas suburbanas y rurales regionales y nacionales.

Resultados y análisis

De acuerdo a las características específicas de las especies encontradas en la revisión bibliográfica, las cuales se describen en la figura 13, son expresadas a continuación de una manera generalizada y sintética los factores a tener en cuenta para que un proceso de siembra urbana para maximizar los beneficios y potenciales de reducción de contaminantes y el mejoramiento de las condiciones ambientales en las ciudades, respecto al aporte de beneficios al entorno.

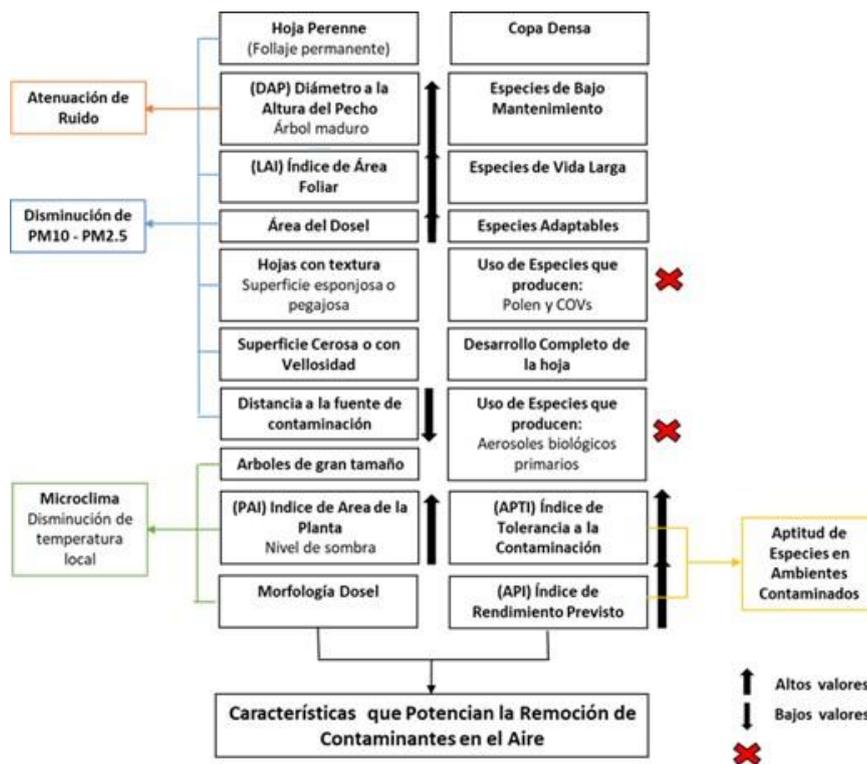


Figura 13: Características de la vegetación requeridos para la mitigación de la contaminación atmosférica, acorde a los fines y objetivos. Fuente (construcción propia)

En cuanto a la atenuación de ruido, el factor de importancia es el Diámetro a la Altura del Pecho (DAP), para el microclima se deben tener en cuenta como factor fundamental el tamaño de las especies y la morfología del doseil, las cuales proporcionan un nivel de sombra mayor que viene representado por su Índice de Área de la Planta (PAI), obteniendo así una disminución de temperatura local y una sensación térmica más agradable al transeúnte, siendo el efecto de los bosques urbanos dependiente de la estructura, forma y tamaño de los árboles para su capacidad de retención de la radiación solar.

Para la disminución de material particulado, las especies más eficientes son aquellas que cumplen con las características de contar con un follaje permanente, un nivel de madurez y desarrollo, un mayor índice de área foliar y área del doseil. Adicional es importante las características de las hojas, en donde la textura (poros, vellos, esponjosidad etc.) y la presencia de ceras y mieles ha maximizado la capacidad de las especies de retener el material en su superficie.

Teniendo en cuenta las condiciones ambientales a las que se verán enfrentadas las especies en zona urbana, estas deben ser especies adaptables con alto índice de tolerancia a la contaminación y alto índice de rendimiento previsto a condiciones futuras. Las especies que poseen índices de tolerancia bajos pueden ser igualmente utilizadas con fines bioindicadores de la calidad ambiental en el sector, a partir de las cuales se pueden debido a su comportamiento tomar decisiones y tener un referente de la evolución de la misma en el tiempo.

Es importante involucrar el tema de la salud respiratoria de los habitantes, evitando el uso de especies emisoras de Compuestos Orgánicos Volátiles y de aerosoles o compuestos biológicos primarios, que, aunque son naturales generan efectos adversos a los buscados.

En resumen, la selección de las características de las especies será acorde a las necesidades del medio o el sitio de siembra, en donde se tengan en cuenta las restricciones del sector para no entrar en conflicto con la infraestructura existente o causar diservicios y lograr los objetivos planteados maximizando el potencial vegetal.

En general algunas acciones que se deben tomar en cuenta para maximizar los efectos positivos de los árboles sobre la calidad del aire incluyen: a) aumento de la cobertura vegetal, b) uso de pocas especies emisoras de COVs, c) uso de especies de vida larga y bajos de bajos mantenimientos (reducir emisiones asociadas a la siembra y la poda), d) siembras en lugares estratégicos, e) uso de especies de fácil adaptación, f) uso de especies con área foliar grande,, hojas con textura y / o uso elevado de agua (transpiración), g) uso de hoja perenne para mejorar la eliminación de partículas durante la temporada de caída.

Adicional a las características que potencian la funcionalidad del arbolado urbano, algunos criterios como la densidad de siembra, la distribución espacial de las mismas y la combinación de tipos de vegetación, son determinantes para el favorecimiento de la retención en superficie y la dispersión espacial de los contaminantes.

El sistema árbol- césped- arbusto se puede aplicar en las vías del Valle de Aburrá, incluyendo la adecuación de andenes que se está realizando en múltiples municipios. Con este tipo de sistemas no solo se contribuye a la prevención de la transición de material particulado sino al bienestar y sensación de frescura de los peatones.

Se hace necesaria una planificación adecuada al momento del trazado de vías y de realizar actividades de incremento de espacio público, con el fin de evitar la configuración de aumento de pisos duros e implementar el piso impermeable con su respectiva cobertura vegetal y con el fin de reducir la concentración de niveles locales implementar especies de hábito bajo y arbustos y vegetación que se encuentren a nivel de emisión de los vehículos que transitan en las vías.

Conclusiones

La contribución del arbolado urbano a las condiciones ambientales de las zonas urbanizadas está dada por la disminución en las concentraciones de compuestos y elementos contaminantes, el mejoramiento de las condiciones bioclimáticas locales, la atenuación de ruido, la protección a infraestructura existente y bienestar psicológico de la población.

Aun cuando la contribución cuantitativa del arbolado urbano en la disminución de material particulado no es muy significativa frente a los niveles elevados de contaminación y emisión en las ciudades se presenta una disminución en las concentraciones y un aporte en la reducción de material particulado y CO₂, adicional, son evidentes los diferentes beneficios adicionales que ofrecen los sistemas vegetales y que son inherentes a su existencia, los cuales aportan a un mejoramiento de la funcionalidad ecológica y favorecen una conexión con la zona rural del territorio al que pertenecen.

La contribución a la disminución de las concentraciones de contaminantes por efecto del arbolado urbano no es sólo atribuida a la selección de especies específicas que hayan sido consideradas como eficientes para dichos fines, la combinación de características que potencian y maximizan su beneficio son factores claves a la hora de planificar un proceso de siembra, teniendo en cuenta las especificaciones y necesidades del sitio, la disponibilidad de especies vegetales y las restricciones físicas y ambientales que condicionan el lugar y el proceso en general.

A la presencia de cobertura vegetal se le atribuye un aporte significativo al entorno, la apropiación del espacio por parte de los habitantes se maximiza al generar espacios públicos verdes que brindan sensación de bienestar, es por esto que se deben planificar adecuadamente

los lugares disponibles con el fin de potencializar los servicios prestados hacia un beneficio integral y poblacional.

Bibliografía

- Aburrá, Á. M. (2007). Gestión de la Calidad del Aire del Valle de Aburrá. Medellín.
- Aburrá, Á. M. (s.f.). Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Obtenido de <https://www.metropol.gov.co/ambientales/flora/plan-siembra-aburr%C3%A1>
- ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ- CORNARE- CORANTIOQUIA Y UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA . (2005). *PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA DEL RÍO ABURRÁ*.
- Alahabadi, A., Hassan, M., Miri, Mohammad, Ebrahimi Aval, H., Yousefzadeh, S., . . . Hosseini- Bandegharaei. (2017). A comparative study on capability of different tree species in accumulating heavy metals from soil and ambient air. *Chemosphere* 172, 459-467.
- Amini Parsa, V., Esmail, S., Reza Yavari, A., & van Bodegom, P. M. (2019). Analyzing temporal changes in urban forest structure and the effect on air quality improvement. *Sustainable Cities and Society* 48 101548.
- Aminipouri, M., Rayner, D., Lindberg, F., Thorsson, S., Knudy, A. J., Zickfelda, K., . . . Scottkrayenhoffe, E. (2019). Urban tree planting to maintain outdoor thermal comfort under climate change: The case of Vancouver's local climate zones. *Building and Environment* Volume 158, 226-236.
- Area Metropolitana del Valle de Aburra . (2007). *Metrópolis 2008-2020*.
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2019). *Plan Siembra* . Obtenido de <https://www.metropol.gov.co/ambientales/flora/plan-siembra-aburr%C3%A1>
- Arroyave Maya, M. d., Posada Posada, M. I., Nowak, D. J., & Hoehn, R. E. (2019). Remoción de contaminantes atmosféricos por el bosque urbano en el valle de Aburrá. *Colombia forestal*.
- Baraldi, R., Chieco, C., Neri, L., Facini, O., Rapparini, F., Morrone, L., Carriero, G. (2019). An integrated study on air mitigation potential of urban vegetation: From a multi-trait approach to modeling. *Urban Forestry & Urban Greening, Volumen 41*, 127-138.
- Baraldi, R., Chieco, C., Neri, L., Facini, O., Rapparini, F., Morrone, L., Carriero, G. (2019). An integrated study on air mitigation potential of urban vegetation: From a multi-trait approach to modeling. *Urban Forestry & Urban Greening, Volumen 41*, 127-138.
- BARRA LÓPEZ, D. I. (2019). *ANÁLISIS DEL EFECTO DEL ARBOLADO URBANO SOBRE LA ABSORCIÓN DE MATERIAL PARTICULADO RESPIRABLE (MP2,5), MEDIANTE EL SOFTWARE I – TREE ECO AL INTERIOR DEL PARQUE ECUADOR EN LA CIUDAD DE CONCEPCIÓN*. Santiago- Chile.
- Beckett, K., Freer-Smith, P., & Taylor, G. (1998). Urban woodlands: their role in reducing the effects of particulate pollution. *Environmental pollution, Volume 99*, 347-360.

- Bodnaruka, E., Kroll, C., Yang, Y., Hirabayashi, S., Nowak, D., & Edreny, T. (2017). Where to plant urban trees? A spatially explicit methodology to explore ecosystem service tradeoffs. *Landscape and Urban Planning* 157, 457-467.
- Bottalicoa, F., Chiricia, G., Giannettia, F., De Marcob, A., Nocentinia, S., Paolettic, E., . . . Sanesid, G. (2016). Air pollution removal by green infrastructures and urban forests in the city of Florence. *Agriculture and Agricultural Science Procedia* 8 , 243-251.
- Chen, L., Liu, C., Zou, R., Yang, M., & Zhiqiang, Z. (2016). Experimental examination of effectiveness of vegetation as bio-filter of particulate matters in the urban environment. *Environmental Pollution, Volumen 208*, 198-208.
- Comisión Nacional Forestal. (2010). *Prácticas de Reforestación. Manual básico*.
- Conway, T. M., Almas, A. D., & Coore, D. (2019). Ecosystem services, ecological integrity, and native species planting: How to balance these ideas in urban forest management. *Urban Forestry & Urban Greening* 41, 1-5.
- Correa, M., Zuluaga, C., Palacio, C., Pérez, J., & José, J. (2008). Acoplamiento de la atmósfera libre con el campo de vientos locales en una región tropical de topografía compleja. Caso de estudio: Valle de Aburrá, Antioquia, Colombia. *Biblioteca Digital Universidad Nacional* .
- Criollo C, C., Assar C, R., Cáceres L, D., & Préndez B, M. (2016). Arbolado urbano, calidad del aire y afecciones respiratorias en seis comunas de la provincia de Santiago, Chile . *Chile Enfermedades Respiratorias*, 32, 77-86.
- Departamento Nacional de Planeación. (2019). *CONPES de calidad del aire contribuirá a mejorar la salud y el ambiente de los colombianos*. Obtenido de <https://www.dnp.gov.co/Paginas/CONPES-de-calidad-del-aire-contribuir%C3%A1-a-mejorar-la-salud-y-el-ambiente-de-los-colombianos.aspx>
- Eisenmana, T. S., Chukina, G., Jariwala, S. P., Kumar, P., Lovasi, G. S., Pataki, D. E., . . . Whitlow, T. H. (2019). Urban trees, air quality, and asthma: An interdisciplinary review. *Landscape and Urban Planning* 187, 47-59.
- Escobedo, F. J., Kroeger, T., & Wagner, J. (2011). Urban forest and pollution mitigation: Analyzing ecosystem services and disservices. *Environmental Pollution, Volume 159*, 2078-2087.
- Escobedo, F. J., Wagner, J. E., Nowak, D. J., De la Maza, C. L., Rodríguez, M., & Crane, D. E. (2008). Analyzing the cost effectiveness of Santiago, Chile's policy of using urban forests to improve air quality. *Journal of Environmental Management Volume 86, Issue 1*, 148-157.
- Escobedo, F. J., Giannicob, V., Jimc, C., Sanesib, G., & Lafortezzac, R. (2019). Urban forests, ecosystem services, green infrastructure and nature-based solutions: Nexus or evolving metaphors? *Urban Forestry & Urban Greening* 37, 3-12.
- Gómez, F., Artíñano, B., Ramiro, D., Barreiro, M., Núñez, L., Coz, E., . . . Borge, R. (2019). Urban vegetation and particle air pollution: Experimental campaigns in a traffic hotspot. *Environmental Pollution, Volumen 247*, 195-205.
- Hilde, T., & Paterson, R. (2014). Integrating ecosystem services analysis into scenario planning practice: Accounting for street tree benefits with i-Tree valuation in Central Texas. *Journal of Environmental Management* 146, 524-534.

- Huang, Y.-d., Li, M.-z., Ren, S.-q., Wang, M.-j., & Cui, P.-y. (2019). Impacts of tree-planting pattern and trunk height on the airflow and pollutant dispersion inside a street canyon. *Building and Environment* 165.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2016). *Informe del Estado de la Calidad del Aire en Colombia 2016*. Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/web/contaminacion-y-calidad-ambiental/informes-del-estado-de-la-calidad-del-aire-en-colombia?>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2019). Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/web/contaminacion-y-calidad-ambiental/contaminacion-atmosferica>
- Jeanjean, A., Monks, P., & Leigh, R.-J. (2016). Modelling the effectiveness of urban trees and grass on PM_{2.5} reduction via dispersion and deposition at a city scale. *Atmospheric Environment, Volumen 147*, 1-10.
- Karmakar, D., & Kumar, P. (2019). Air pollution tolerance, anticipated performance, and metal accumulation indices of plant species for greenbelt development in urban industrial area. *Chemosphere* 237 124522.
- Kocica, K., Spasic, T., Urosevic, M. A., & Tomasevic, M. (2014). Trees as natural barriers against heavy metal pollution and their role in the protection of cultural heritage. *Journal of Cultural Heritage* 15, 227-233.
- Krajter Ostoić, S., Salbitano, F., Borelli, S., & Verlič, A. (2018). Urban forest research in the Mediterranean: A systematic review. *Urban Forestry & Urban Greening, Volume 31*, 185-196.
- Kroegera, T., McDonald, R. I., Bouchera, T., Zhangc, P., & Wang, L. (2018). Where the people are: Current trends and future potential targeted investments in urban trees for PM₁₀ and temperature mitigation in 27 U.S Cities. *Landscape and Urban Planning, Volume 177*, 227- 240.
- Lai, Y., & Kontokosta, C. E. (80-87). The impact of urban street tree species on air quality and respiratory illness: A spatial analysis of large-scale, high-resolution urban data. *Health and Place* 56, 2019.
- Leelossy, A., Molnár, F., Izsák, F., Havasi, Á., Lagzi, I., & Mészáros, R. (2014). Dispersion modeling of air pollutants in the atmosphere: a review. *Central European Journal of Geosciences*, 257- 278.
- Liu, F., Zheng, X., & Qjan, H. (2018). Comparison of particle concentration vertical profiles between downtown and urban forest park in Nanjing (China). *Atmospheric Pollution Research* 9, 829- 839.
- Lua, S., Yangc, X., Lia, S., Chena, B., Jiangd, Y., Wange, D., & Xue, L. (2018). Effects of plant leaf surface and different pollution levels on PM_{2.5} adsorption capacity. *Urban Forestry & Urban Greening, Volumen 34*, 64-70.
- MAURICIO CORREA, C. Z. (2008). *Biblioteca Digital Universidad Nacional* . Obtenido de <http://bdigital.unal.edu.co/15599/2/10242-33743-1-PB.htm>
- Miller, S. M., & Montalto, F. A. (2019). Stakeholder perceptions of the ecosystem services provided by Green Infrastructure in New York City. *Ecosystem Service Volume 37*.

- Minvu, M. d. (2018). *MANUAL DE ELEMENTOS URBANOS SUSTENTABLES*. Chile. Obtenido de <https://csustentable.minvu.gob.cl/wp-content/uploads/2018/09/MANUAL-DE-ELEMENTOS-URBANOS-SUSTENTABLES-TOMO-III.pdf>
- Mori, J., Fini, A., Galimberti, M., Ginepreo, M., Burchi, G., Massa, D., & Ferrini, F. (2018). Air pollution deposition on a roadside vegetation barrier in a Mediterranean environment: Combined effect of evergreen shrub species and planting density. *Science of the Total Environment* 643, 725-737.
- Mukherjee, A., & Agrawal, M. (2018). Use of GLM approach to assess the responses of tropical trees to urban air pollution in relation to leaf functional traits and tree characteristics. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 152, 42-54.
- Nguyen, T., Yu, X., Zhang, Z., Liu, M., & Liu, X. (2015). Relationship between types of urban forest and PM2.5 capture at three growth stages of leaves. *Journal of Environmental Sciences*, 33-41.
- Nowak, D. J., Hirabayashi, S., Doyle, M., McGovern, M., & Pasher, J. (2018). Air pollution removal by urban forests in Canada and its effect on air quality and human health. *Urban Forestry & Urban Greening* 29, 40-48.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (2015). *FRA 2015, terminos y definiciones*.
- Organización Panamericana de la Salud. (2019). *OPS Contaminación del Aire Ambiental*. Obtenido de https://www.paho.org/hq/index.php?option=com_content&view=article&id=12918:ambient-air-pollution&Itemid=72243&lang=es
- Ozdemir, H. (2019). Mitigation impact of roadside trees on fine particle pollution. *Science of the Total Environment, Volumen 659*, 1176-1185.
- Sanusi, R., Johnstone, D., May, P., & Livesley, S. J. (2017). Microclimate benefits that different street tree species provide to sidewalk pedestrians relate to differences in Plant Area Index. *Landscape and Urban Planning* 157, 502-511.
- Selmi, W., Weber, C., Emmanuel, R., Blond, N., Mehdi, L., & Nowak, D. (2016). Air pollution removal by trees in public green spaces in Strasbourg city, France. *Urban Forestry & Urban Greening Volume 17*, 192-201.
- Steenberg, J. W., Duinker, P. N., & Nitoslawski, S. A. (2019). Ecosystem-based management revisited: Updating the concepts for urban forests. *Landscape and Urban Planning, Volume 186*, 24-35.
- Van Renterghem, T. (2014). Guidelines for optimizing road traffic noise shielding by non-deep tree belts. *Ecological Engineering* 69, 276-286.
- Wang, R., Zhao, J., Meitner, M. J., Hua, Y., & Xua, X. (2019). Characteristics of urban green spaces in relation to aesthetic preference and stress recovery. *Urban Forestry & Urban Greening Volume 41*, 6-13.
- Weissert, L., Salmond, J., & Schwendenmann. (2014). A review of the current progress in quantifying the potential of urban forests to mitigate urban CO2 emissions. *Urban Climate* 8, 100-125.
- Wu, J., Wang, Y., Qiu, S., & Peng, J. (2019). Using the modified i-Tree Ecomodel to quantify air pollution removal by urban vegetation. *Science of the Total Environment* 688, 673-683.

- Xing, Y., Brimblecombe, P., Wang, S., & Zhang, H. (2019). Tree distribution, morphology and modelled air pollution in urban parks of Hong Kong. *Journal of Environmental Management* 248 .
- Yang, J., Chang, Y., & Yan, P. (2015). Modelling the effectiveness of urban trees and grass on PM2.5 reduction via dispersion and deposition at a city scale. *Atmospheric Pollution Research*, 267- 277.
- Yeon, C., Kun, D. L., Krayen, S., Han, K., Jung, H., Hyuna, H., . . . Yoon, T. (2019). Variations in pedestrian mean radiant temperature based on the spacing and size of street trees. *Sustainable Cities and Society* 48.
- Zhu, C., Przybysz, A., Chen, Y., Guo, H., Chen, Y., & Zeng, Y. (2019). Effect of spatial heterogeneity of plant communities on air PM10 and PM2.5 in an urban forest park in Wuhan, China. *Urban Forestry & Urban Greening*.