

PLAN DE ACCIÓN PARA CONTRARRESTAR LOS PERIODOS CRÍTICOS DE DETERIORO  
DE LA CALIDAD DEL AIRE EN EL BARRIO BELÉN DE LA CIUDAD DE MEDELLÍN,  
COLOMBIA.

DIDIER CANTERO GARCIA

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE INGENIERÍA  
MAESTRÍA EN SOSTENIBILIDAD  
MEDELLÍN  
2023

PLAN DE ACCIÓN PARA CONTRARRESTAR LOS PERIODOS CRÍTICOS DE DETERIORO  
DE LA CALIDAD DEL AIRE EN EL BARRIO BELÉN DE LA CIUDAD DE MEDELLÍN,  
COLOMBIA.

DIDIER CANTERO GARCIA

Trabajo de grado para optar al título de Magíster en Sostenibilidad

Asesor

MAURICIO ZENTENO CASAS

Maestro en Ingeniería

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERÍA

MAESTRÍA EN SOSTENIBILIDAD

CAMPUS VIRTUAL UPB

MEDELLÍN

2023

24 de febrero de 2023

Didier Cantero Garcia

Declaro que este trabajo de grado no ha sido presentado con anterioridad para optar a un título, ya sea en igual forma o con variaciones, en esta o en cualquiera otra universidad”. Art. 92, parágrafo, Régimen Estudiantil de Formación Avanzada.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Didier Cantero Garcia', is written over a horizontal line. The signature is stylized and cursive.

## **Dedicatoria**

Dedico con todo mi corazón este trabajo de grado a mi hijo Andres Felipe Cantero R.

## **Agradecimientos**

Agradezco a Dios por la vida, por sus bendiciones que han servido para superar los obstáculos, a mi familia, a mi tía Emerita Garcia Quintero que desde el cielo se debe sentir orgullosa de este logro, a mi director de trabajo de grado y a mi hijo por ser el motor de mi vida.

## Contenido

Introducción	15
Resumen	17
Abstract	17
Tema 18	
Modalidad de Trabajo de Grado	19
1 Problema	20
2 Justificación	25
3 Marco Referencial	27
3.1 Marco Contextual	27
3.1.1 Análisis PESTAL (Político, Económico, Social, Tecnológico, Ambiental y Legal)	27
3.1.2 Análisis del Contexto en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá	28
3.2 Marco Conceptual	29
3.2.1 Metabolismo Urbano	30
3.2.2 Atmósfera Terrestre	30
3.2.3 Índice de Calidad del Aire (ICA)	30
3.2.4 Material Particulado (PM)	31
3.2.5 Calidad del Aire	31
3.2.6 Calentamiento Global	31
3.2.7 Cambio Climático	31

3.2.8	Contaminación Atmosférica	32
3.3	Estado del Arte	32
3.3.1	Trabajos Previos Relacionados con la Calidad del Aire y el Material Particulado	32
4	Fundamentación del Proyecto	39
4.1	Objetivo General	39
4.2	Objetivos Específicos	39
4.3	Metodología	39
5	Concepto Ético	41
6	Desarrollo Estratégico	42
6.1	Análisis de fuentes contaminantes existentes	42
6.1.1	Fuentes de Área	42
6.1.2	Fuentes fijas	43
6.1.3	Fuentes móviles	46
6.2	Análisis de medidas existentes para contrarrestar los periodos críticos de deterioro de la calidad del aire en el barrio Belén de la ciudad de Medellín, Colombia	67
6.2.1	Extensión de Pico y Placa para los Buses de Servicio Especial	67
6.2.2	Aumento de la cantidad de buses eléctricos	67
6.2.3	Planes de Movilidad Empresarial Sostenible, Planes MES	68
6.2.4	Transición tecnológica a vehículos eléctricos y alineación a las normas EURO reducción de contaminantes	68
6.2.5	Árboles Artificiales Purificadores de Aire	69

6.2.6	Barreras Vegetales.	74
6.2.7	Techos verdes	75
6.3	Plan de Acción propuesto para Contrarrestar los Periodos Críticos de Deterioro de la Calidad del Aire en el Barrio Belén de la Ciudad de Medellín, Colombia	77
6.3.1	Camiones	77
6.3.2	Buses de Servicio Especial	82
6.3.3	Motos	87
6.3.4	Implementación de medidas a 1 año para lograr un 10% de reducción de contaminantes	91
6.3.5	Implementación de medidas a 3 años para lograr un 25% de reducción de contaminantes	92
6.3.6	Implementación de medidas a 5 años para lograr un 50% de reducción de contaminantes	93
7	Conclusiones	96
7.1	Recomendaciones para la movilidad particular (Vehículos particulares)	97
	Referencias	99
8	Anexos	109

## Índice de figuras

Figura 1	
<i>Localización del área metropolitana del Valle de Aburrá.</i> .....	20
Figura 2	
<i>Conformación territorial del área metropolitana del Valle de Aburrá.</i> .....	21
Figura 3	
<i>Localización del área metropolitana del Valle de Aburrá. Crecimiento urbano y conurbación del área metropolitana del Valle de Aburrá.</i> .....	22
Figura 4	
<i>Distribución político-administrativa de Medellín.</i> .....	23
Figura 5	
<i>Barrios de la comuna 16 - Belén, Medellín, Colombia.</i> .....	24
Figura 6	
<i>Factores que incrementan la contaminación en el Valle de Aburrá.</i> .....	26
Figura 7	
<i>Aporte de las emisiones totales según el tipo de fuente para el año 2018</i> .....	42
Figura 8	
<i>Emisiones evaporativas industriales (Mg año) año 2018</i> .....	43
Figura 9	
<i>Distribución de emisiones de contaminantes criterio de acuerdo del sector industrial para el año 2018</i> .....	43

Figura 10	
<i>Estaciones de monitoreo PM10 del SIATA</i> .....	44
Figura 11	
<i>Comparativo de picos de concentración de PM10 en los años 2018, 2019, 2020 y 2021</i> ...	45
Figura 12	
<i>Distribución de emisiones de contaminantes atmosféricos por subsector industrial año base 2018</i> .....	46
Figura 13	
<i>Distribución de emisiones de contaminantes criterio por categoría vehicular, año 2018</i> ..	47
Figura 14	
<i>Incremento del Parque Automotor entre 2005 – 2018 en el Valle de Aburrá</i> .....	48
Figura 15	
<i>Distribución de los Autos para el año 2018, según la categoría.</i> .....	49
Figura 16	
<i>Evolución de las emisiones de NOx</i> .....	49
Figura 17	
<i>Distribución de emisiones de NOx por categoría vehicular, año 2018.</i> .....	50
Figura 18	
<i>Fuentes de NOx por tamaño de vehículo</i> .....	51
Figura 19	
<i>Estaciones de monitoreo NOx del SIATA dentro del área de influencia del barrio Belén</i> ..	52

Figura 20	
<i>Ciclo anual de la concentración de Dióxidos de Nitrógeno - NO<sub>2</sub> en el periodo de los años 2018 a 2021</i> .....	53
Figura 21	
<i>Evolución de las emisiones de NO<sub>2</sub></i> .....	53
Figura 22	
<i>Fuentes de NO<sub>2</sub> por tamaño de vehículo</i> .....	54
Figura 23	
<i>Evolución de las emisiones de CO</i> .....	55
Figura 24	
<i>Distribución de emisiones de CO por categoría vehicular, año 2018.</i> .....	55
Figura 25	
<i>Fuentes de CO por tamaño de vehículo</i> .....	56
Figura 26	
<i>Ciclo anual de la concentración de Monóxido de Carbono - CO en el periodo de los años 2018 a 2021</i> .....	57
Figura 27	
<i>Evolución de las emisiones de CO<sub>2</sub></i> .....	58
Figura 28	
<i>Fuentes de CO<sub>2</sub> por tamaño de vehículo</i> .....	58
Figura 29	
<i>Evolución de las emisiones de Óxidos de Azufre - SO<sub>2</sub> desde el año 2000 al 2018.</i> .....	59

Figura 30	
<i>Distribución de emisiones de SOx por categoría vehicular, año 2018.</i>	60
Figura 31	
<i>Fuentes de SO2 por tamaño de vehículo</i>	60
Figura 32	
<i>Estaciones de monitoreo SO2 del SIATA dentro del área de influencia del barrio Belén</i>	61
Figura 33	
<i>Ciclo anual de la concentración de Dióxidos de Nitrógeno - SO2 en el periodo de los años 2018 a 2021</i>	62
Figura 34	
<i>Evolución de las emisiones de PM2.5</i>	63
Figura 35	
<i>Distribución de emisiones de PM2.5 por categoría vehicular, año 2018.</i>	63
Figura 36	
<i>Fuentes de PM2.5 por tamaño de vehículo</i>	64
Figura 37	
<i>Estaciones de monitoreo PM2.5 del SIATA dentro del área de influencia del barrio Belén</i>	65
Figura 38	
<i>Índice de Calidad del Aire (ICA) para el PM2.5 en el periodo 2018 a 2021.</i>	66
Figura 39	
<i>Fuentes Móviles, Vehículos en donde se concentra la mayor contaminación del aire en el Valle de Aburrá durante el año 2018.</i>	67

Figura 40	
<i>Reducción de gases con la implementación de cada una de las normas EURO.</i> .....	68
Figura 41	
<i>Normas EURO sobre contaminantes y su aplicación en Colombia.</i> .....	69
Figura 42	
<i>BioUrban 1.0</i> .....	70
Figura 43	
<i>BioUrban 2.0</i> .....	71
Figura 44	
<i>Equivalencia de BioUrban 2.0 con área verde</i> .....	72
Figura 45	
<i>Especificaciones técnicas BioUrban 2.0</i> .....	73
Figura 46	
<i>BioUrban 3.0</i> .....	74
Figura 47	
<i>Combinación de especies vegetales y pantallas acústicas.</i> .....	75
Figura 48	
<i>Esquema básico de Cubiertas Verdes</i> .....	76

## Índice de tablas

### Tabla 1

*Análisis PESTAL: Políticas Públicas relativas a la calidad del aire del Área Metropolitana del Valle de Aburrá* ..... 28

### Tabla 2

*Modelo de desarrollo para proyectos piloto de movilidad para zonas urbanas - AMVA, barrio Belén de Medellín, Camiones.* ..... 77

### Tabla 3

*Modelo de desarrollo para proyectos piloto de movilidad para zonas urbanas - AMVA, barrio Belén de Medellín, Buses de Servicio Especial.* ..... 82

### Tabla 4

*Modelo de desarrollo para proyectos piloto de movilidad para zonas urbanas - AMVA, barrio Belén de Medellín, Motos.* ..... 87

### Tabla 5

*Modelo de desarrollo para proyectos piloto de movilidad para zonas urbanas - AMVA, barrio Belén de Medellín, primer año de implementación.* ..... 91

### Tabla 6

*Modelo de desarrollo para proyectos piloto de movilidad para zonas urbanas - AMVA, barrio Belén de Medellín, segundo año de implementación.* ..... 92

### Tabla 7

*Modelo de desarrollo para proyectos piloto de movilidad para zonas urbanas - AMVA, barrio Belén de Medellín, tercer año de implementación.* ..... 93

## Introducción

El presente estudio de caso titulado “Plan de acción para contrarrestar los periodos críticos de deterioro de la calidad del aire en el barrio Belén de la ciudad de Medellín, Colombia”, el cual, busca dar respuesta a los altos índices de contaminación existentes en el AMVA los cuales son establecidos por la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire con el Sistema de Alerta Temprana de Medellín y Valle de Aburrá – SIATA, los cuales se convierten en la base que estructura todo un plan que permite contrarrestar y estabilizar los niveles de contaminación existentes en el barrio Belén.

El documento se divide en siete capítulos, el primero, contiene el planteamiento del problema de la investigación, el cual plantea un estudio que permitió identificar los niveles de riesgos y daños generados por la contaminación atmosférica a escala global, media y microescala, teniendo en cuenta que el barrio Belén es el epicentro de actividades productivas, dinámicas de movilidad y urbanas de la comuna 16 de Medellín, así mismo esta se evidencia una alta exposición a agentes contaminantes causantes del deterioro de la calidad del aire, entre ellos se destacan NOX, NO2, CO, CO2, SO2, PM2,5 Y PM10.

El segundo capítulo está compuesto por la justificación, la cual se enfoca en el planteamiento de un modelo de reacción a la mala calidad del aire en periodos críticos, esto orientado por la importancia de reconocer e implementar lineamientos que faciliten la creación de estrategias y la implementación de acciones sostenibles, donde los ciudadanos accedan a mejores condiciones de vida.

El tercero comprende el marco referencial en el cual se ahondó sobre las normativas, guías de planeación y lineamientos para el desarrollo urbano, las tecnologías disponibles y el alto potencial para su implementación como solución a la problemática, entre ellos se destacan algunas alternativas para la reducción de contaminantes atmosféricos como Árboles Artificiales Purificadores de Aire, Barreras Vegetales, Techos verdes, entre otros.

El cuarto titulado fundamentación del proyecto estuvo centrado en el objetivo de orientar estrategias para un plan de acción que contrarresta los periodos críticos de deterioro de la calidad del aire del barrio Belén de la Ciudad de Medellín, para ello se identificó los puntos de mayor concentración de material particulado y agentes contaminantes, se determinó los factores que afectan la calidad del aire y se estableció finalmente una red de reacción y modelo de mitigación para los contaminantes presentes en el aire.

El quinto, el concepto ético que cimienta la intervención como profesional, el cual establece un accionar moral que mediante una continua reflexión aporta una visión actual y consciente de los impactos de su inmersión en el campo de acción seleccionado.

El sexto el desarrollo estratégico el cual, se divide tres subcapítulos sumamente importantes para la comprensión y estructura del plan, el primero, un análisis de fuentes contaminantes, donde se describe una a una las fuentes de contaminación, su tipología y

medición claramente ante sus impactos en el sector, el segundo, establece un análisis de medidas para contrarrestar los periodos críticos de deterioro de la calidad del aire y el tercero es la estructura final de la propuesta titulada Plan de Acción para Contrarrestar los Periodos Críticos de Deterioro de la Calidad del Aire en el Barrio Belén de la Ciudad de Medellín, Colombia y finalizando en el séptimo capítulo se presentan los anexos.

El séptimo, trata las conclusiones que han surgido durante la realización de este trabajo de grado, en donde se destacan la identificación de los Camiones, Buses de Servicio Especial y las Motos, como las principales fuentes de emisiones contaminantes de aire; se identifica el área de oportunidad para hacer un estudio de vehículos particulares con el fin de establecer las medidas a futuro, teniendo en cuenta el aumento significativo que se presenta cada año; así mismo, se identificaron brechas de información en cuanto a la cantidad real de la cantidad de vehículos que circulan por el área metropolitana y la falta de actualización del inventario de emisiones. Se establecen las recomendaciones para la implementación del plan de acción, resaltando la importancia de fomentar la educación ciudadana y la conciencia del uso adecuado de vehículos particulares mediante las campañas de comunicación que divulguen las múltiples formas de movilidad existentes y proyectos a futuro; de igual forma, el establecimiento de tarifas de movilidad para que al usuario le sea más rentable usar los medios de transporte público que sacar el vehículo propio y el desarrollo de modelos de negocios públicos o privados de renta, en donde se pague por los kilómetros de transporte o el tiempo del desplazamiento.

## Resumen

El presente estudio de caso busca dar respuesta a los altos índices de contaminación existentes en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA), lo que dio lugar al planteamiento de soluciones enfocadas a hacerle frente a la afectación de la calidad del aire, con el fin de ser un modelo replicable en el resto del (AMVA) y otras ciudades que cuenten con un sistema de monitoreo de la calidad del aire.

**Palabras Clave:** Calidad del aire, Material particulado (PM), Valle de Aburrá, Contaminación atmosférica

## Abstract

This case study seeks to respond to the high incidences of pollution existing in the Aburrá Valley Metropolitan Area (AVMA), which led to the proposal of solutions focused on addressing the impact on air quality, with the aim of to be a replicable model in the rest of the (AMVA) and other cities that have an air quality monitoring system.

**Keywords:** *Air quality, Particulate matter (PM), Aburrá Valley, Air pollution*

## Tema

El análisis de la calidad del aire focalizado en la demarcación del barrio Belén, Medellín - Colombia, aporta al entendimiento de las dinámicas socioambientales que provocan los periodos críticos en el deterioro de la calidad del aire a nivel metropolitano, así como para la propuesta de estrategias y medidas enfocadas en la transformación de la movilidad hacia un modelo sostenible. Para ello, es necesario definir lineamientos que faciliten la implementación de sistemas de movilidad multimodal, la adopción de nuevas tecnologías para la medición y la mitigación de las emisiones contaminantes, así como para el monitoreo continuo de la calidad del aire. Por tanto, este trabajo se busca establecer un modelo de pequeña escala que permita incorporar gradualmente una serie de medidas que incidan directamente en tres áreas: 1. La transición hacia el uso de tecnologías bajas en emisiones de GEI, 2. La adopción de nuevos modelos de comportamiento por parte de los habitantes (cultura ciudadana sostenible), y 3. El despliegue de infraestructura verde que coadyuve a controlar la calidad del aire al que están expuestos los ciudadanos en puntos críticos de la ciudad. Este trabajo además plantea la necesidad de contar con un modelo de reacción para mitigar los periodos de contaminación crítica que se da durante el año; en otras palabras, un plan de acción que se implemente en de forma coordinada con la infraestructura de monitoreo existente y que se adapte de forma armónica a las estrategias de movilidad sostenible en las que ya se ha venido avanzando a nivel territorial.

## **Modalidad de Trabajo de Grado**

La modalidad de trabajo grado empleada durante el proceso investigativo consistió en un estudio de caso, que dio lugar al planteamiento de soluciones enfocadas a hacerle frente a la afectación de la calidad del aire, tomando como territorio de estudio al barrio Belén de Medellín - Colombia, con el fin de ser un modelo replicable en el resto del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA) y otras ciudades que cuenten con un sistema de monitoreo de la calidad del aire.

## 1 Problema

El Área metropolitana del Valle de Aburrá se encuentra ubicada Colombia, en el departamento de Antioquia y es una región conformada por diez municipios, a saber, de sur a norte: Caldas, La Estrella, Sabaneta, Envigado, Itagüí en el sur, Medellín en el centro del valle, Bello, Copacabana, Girardota y Barbosa en el norte, estos municipios conurbados crean un región conurbada que se extiende de norte a sur sobre el eje del río Aburrá-Medellín, posee una extensión de 1.165,5 kilómetros cuadrados, de los cuales el 15,2% corresponde a suelo urbano, habitan 4.055.296 personas al año 2020, de acuerdo con las proyecciones poblacionales del DANE provenientes del censo 2018. El municipio más poblado es Medellín con 2.533.424 (Medellín cómo vamos 2021, 2023).

En la figura 1 se expone la localización del área metropolitana a nivel continental, nacional y departamental.

### Figura 1

Localización del área metropolitana del Valle de Aburrá.



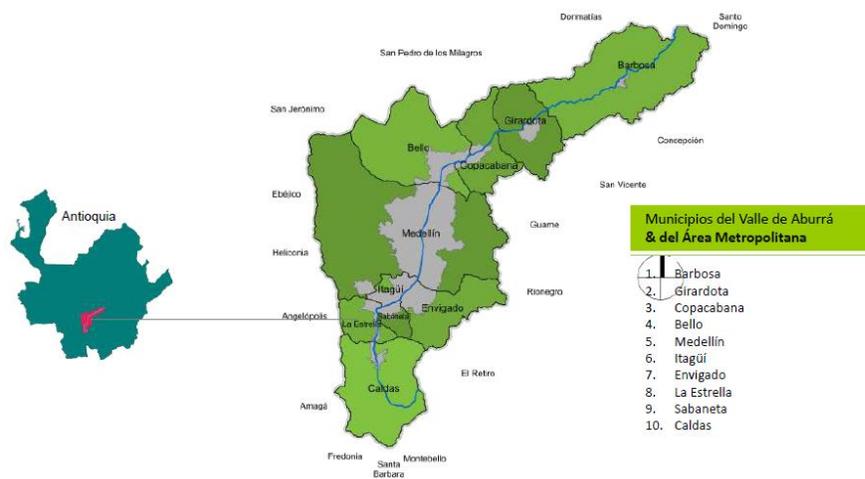
*Nota.* En la figura se representa localización geográfica del área metropolitana del Valle de Aburrá. Adaptado del *PLAN METROPOLITANO DE GESTIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES* (Área metropolitana del Valle de Aburrá, 2016).

En la figura 2 se ilustra la conformación territorial del área metropolitana a nivel continental, nacional y departamental.

**Figura 2**

*Conformación territorial del área metropolitana del Valle de Aburrá.*

**TERRITORIO**



*Nota.* En la figura se representa conformación territorial del área metropolitana del Valle de Aburrá, en donde se aprecia los 10 municipios que lo conforman y al río Aburrá-Medellín como eje articulador. Adaptado del *PLAN METROPOLITANO DE GESTIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES* (Área metropolitana del Valle de Aburrá, 2016).

El concepto de metabolismo urbano no es algo exclusivo a los seres vivos, y, de hecho, en el año 1965 Wolman habló de su acepción puramente urbana como la “Conceptualización Ecológica de las ciudades”. Su propuesta indica que se debe visualizar a las ciudades como seres vivos que crecen, se desarrollan y, en algún momento, pueden perecer. Al comparar una ciudad con un organismo vivo, todos sus flujos de agua, energía y materiales deben de ser considerados (Pardo, 2019). Es ahí donde juega un papel importante la sostenibilidad, al enfocarse en el equilibrio social y económico de los centros poblados, con el medio ambiente que los rodea, que los provee de servicios ecosistémicos y que se ve afectado por los contaminantes generados por las dinámicas de desarrollo urbano impactando la calidad de los suelos, el aire y los recursos hídricos de los que depende.

Así pues es importante tener presente que estas dinámicas impactan la calidad del aire, en lo que se refiere a la presencia en mayor o menor medida de contaminantes en la atmósfera, que puedan ser nocivos para la salud humana, el medio ambiente o en su conjunto y para otros bienes de cualquier naturaleza (Vidal, 2020), por lo tanto, la calidad del aire es un factor determinante en la dinámica social, económica y ambiental del metabolismo urbano de cualquier ciudad (Ver anexo 1).

Es importante tener presente que la calidad del aire se refiere a la presencia en mayor o menor medida de contaminantes en la atmósfera, que puedan ser nocivos para la salud humana, el medio ambiente o en su conjunto y para otros bienes de cualquier naturaleza (Vidal, 2020), por lo tanto, la calidad del aire es un factor determinante en la dinámica social, económica y ambiental del metabolismo urbano de cualquier ciudad (Ver anexo 1).

En relación con lo anterior y teniendo en cuenta las escalas de riesgos y daños generados por la contaminación atmosférica, según la clasificación dada por la fundación Naturgy (2018) (Ver anexo 2), éstos se clasifican de tres maneras y se adaptan al tema de estudio de la siguiente forma:

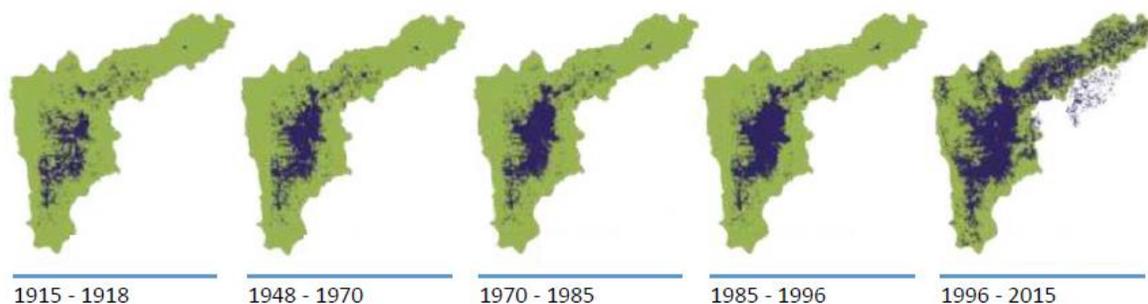
**Escala global:** Se refiere al efecto de calentamiento global (corto plazo) y cambio climático (efecto sostenido de largo plazo) (Fundación Naturgy, 2018); **Escala media:** El Valle de Aburrá ha venido consolidándose como aglomeración urbana, que según el AMVA (2021) contó con 1'640.491 autommviles, estructurada en función de la movilidad vehicular privada, situación que ha generado una fuerte contaminación atmosférica, ocasionada principalmente por la emisión de gases de las fuentes móviles, y agravada por la difícil topografía del valle que dificulta la circulación y el reciclaje natural del aire (Alcaldía de Medellín, 2011); **Microescala:**, El barrio Belén de la comuna 16 de la ciudad de Medellín, se podría considerar como un epicentro para el desarrollo de actividades productivas, dinámicas de movilidad y urbanas con alta exposición a los agentes contaminantes que causan el deterioro de la calidad del aire y a las que la población queda vulnerable, tales como los gases tóxicos y el material particulado.

En la figura 3 se evidencia el crecimiento poblacional del área metropolitana y en especial de Medellín como punto de concentración de habitantes, lo cual se debe a diversos factores, cómo la migración del campo a la ciudad en 1921, la masificación del transporte público y privado en 1928, el crecimiento del urbanismo indiscriminado en 1945, la transformación de una ciudad dispersa a una ciudad compacta en 1963, la depredación del territorio y la erosión de los recursos naturales en 1981, el aumento del hábitat en zonas de ladeas y quebradas de alto riesgo en 2012 y el crecimiento desmesurado con pérdida de parques de la ciudad en 2020 (Área metropolitana del Valle de Aburrá, 2016).

### Figura 3

*Localización del área metropolitana del Valle de Aburrá. Crecimiento urbano y conurbación del área metropolitana del Valle de Aburrá.*

## CONURBACIÓN

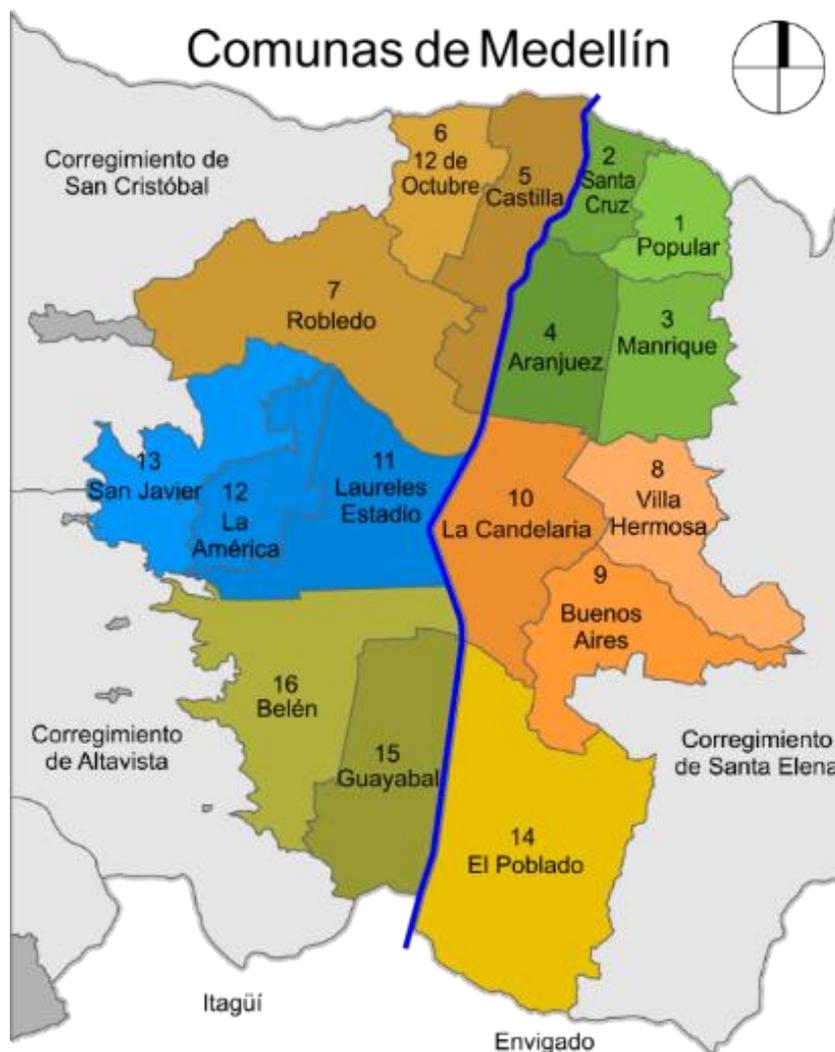


*Nota.* En la figura se representa el crecimiento urbano del área metropolitana del Valle de Aburrá durante el periodo de 1915 a 2015. Adaptado del *PLAN METROPOLITANO DE GESTIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES* (Área metropolitana del Valle de Aburrá, 2016).

Medellín está distribución político - administrativa en la zona urbana por 16 comunas, entre la que se encuentra la comuna 16 - Belén, que tiene una extensión territorial de 8,86 km<sup>2</sup>, 197.593 habitantes para el año 2019. En la figura 4 se exponen las 16 comunas que conforman el territorio urbano de Medellín.

#### **Figura 4**

*Distribución político-administrativa de Medellín.*

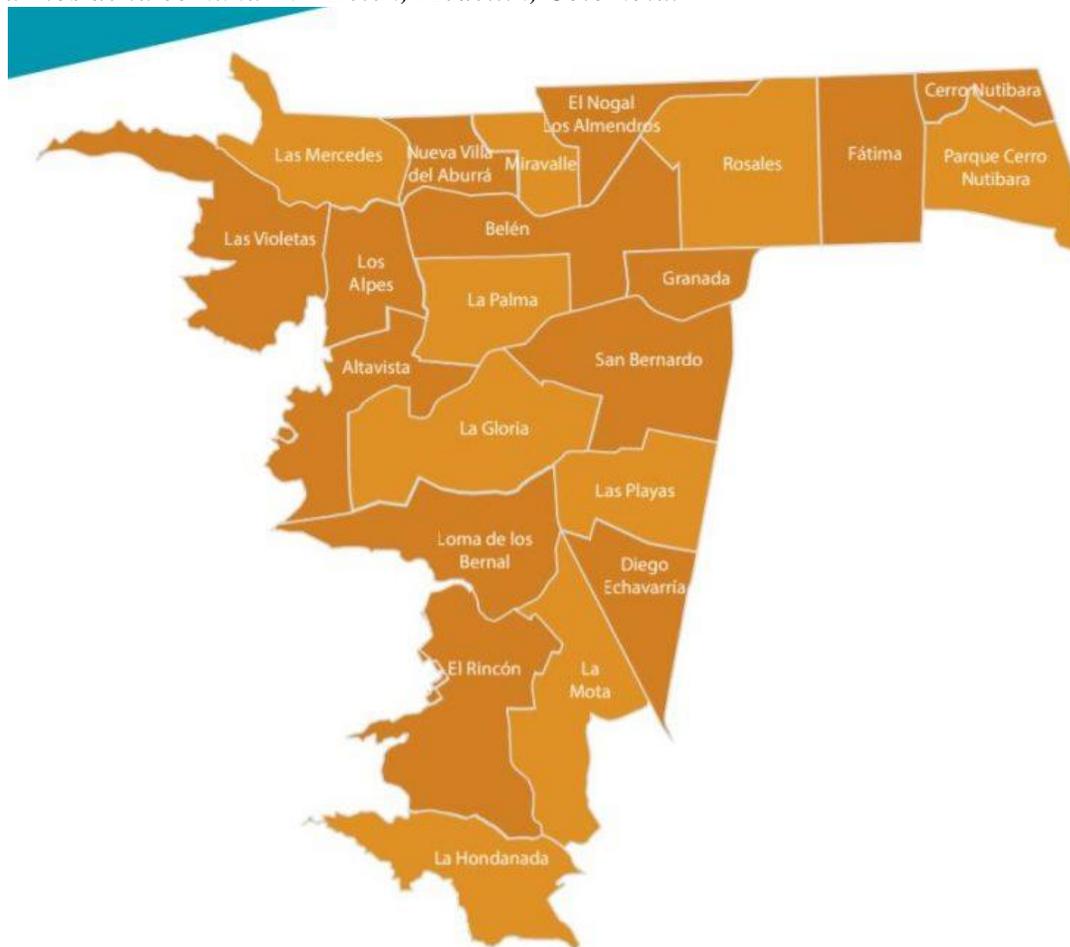


*Nota.* En la figura se representa distribución político-administrativa de Medellín, la cual se encuentra conformada por 16 comunas en la zona urbana. Adaptado de *COMUNAS Y BARRIOS* (Comfenalco Antioquia, 2022).

Según la cartografía del Plan de Ordenamiento Territorial, el Barrio Belén posee una superficie de 493.251 m<sup>2</sup> lo que equivale al 5,6% de la comuna 16. En la Figura 5 se ilustran los 21 barrios que conforman la comuna 16 - Belén de Medellín, en donde se aprecia el barrio Belén, objeto de estudio del presente documento, el cual se encuentra localizado al norte de la comuna, entre los barrios Miravalle, Rosales, La Palma y Los Alpes, entre otros.

### Figura 5

*Barrios de la comuna 16 - Belén, Medellín, Colombia.*



*Nota.* En la figura se representa conformación distribución político-administrativa de la comuna 16 - Belén de Medellín, donde se aprecia los 21 barrios que la conforman. Adaptado del *Datos generales de la ciudad* (Alcaldía de Medellín, 2023).

## 2 Justificación

Las bases del presente proyecto están enfocadas en el planteamiento de un modelo de reacción a la mala calidad del aire durante periodos críticos, a través del cual se identificaron tecnologías disponibles, que ya contribuyen al mejoramiento de la calidad del aire en ciudades referentes. En adición, este modelo plantea la necesidad de adaptarse a intervenciones futuras como nuevas tecnologías y estrategias, examinando la importancia de los factores determinantes de bienestar de vida humana en relación con el ámbito social, económico y ecológico de los habitantes del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA), centrándose en los habitantes del barrio Belén, de la comuna 16 en Medellín.

En consecuencia, el análisis de la información y ejecución de actividades se desarrolló con una perspectiva desde la Arquitectura y Urbanismo, en combinación con los conocimientos que se adquirieron dentro del plan de estudios de la Maestría en Sostenibilidad y de las investigaciones de repositorios documentales relacionados a este proyecto de grado. Por tanto, este trabajo aporta a la formulación de proyectos urbanos sostenibles y replicables, con el fin de hacerle frente a la problemática ambiental descrita.

En este sentido, se identificaron diversas alternativas como potenciales soluciones, teniendo en cuenta su capacidad de ser articuladas con otras tecnologías dentro de un sistema de monitoreo y red de reacción que pueda entrar en funcionamiento siempre que se presenten picos de mayor contaminación y pérdida de calidad del aire, así mismo enfocadas a generar una estabilidad de buena calidad del aire durante todo el año. El objetivo de crear este primer modelo de monitoreo y reacción se centró en la reducción de los índices contaminantes que afectan la calidad del aire en el barrio Belén de la comuna 16 de Medellín, que podrá ser replicable a otros sectores del AMVA e incluso otras ciudades.

Del mismo modo, la construcción de este modelo estuvo orientado por la importancia de reconocer e implementar lineamientos que faciliten la creación de estrategias y la implementación de acciones sostenibles, donde los ciudadanos accedan a mejores condiciones de vida.

Para ello, como punto de salida es importante comprender que el AMVA como territorio cuenta con un régimen de lluvias definido por dos temporadas al año. Generalmente la transición entre la temporada seca y la primera temporada de lluvias, que se presenta en marzo y se caracteriza por la presencia de capas de nubes de baja altura que ocasionan una mayor acumulación de contaminantes en la atmósfera. Durante este fenómeno, se registran las concentraciones más altas de material particulado del año. Del mismo modo, se presenta la segunda transición de temporada de lluvia a temporada seca en noviembre, época en la que se registra nuevamente un incremento de las concentraciones de material particulado (AMVA, 2018). En la figura 6 se presenta los factores que incrementan la contaminación en el valle de Aburrá, los cuales se concentran en las características meteorológicas, topográficas y las emisiones contaminantes (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2019).

## Figura 6

### Factores que incrementan la contaminación en el Valle de Aburrá



*Nota.* En la figura se describen las características meteorológicas de estabilidad atmosférica y baja ventilación, que sumadas a las condiciones topográficas de ser un valle angosto y semicerrado, con una contaminación generada en una región densamente poblada, genera épocas de contingencia ambiental. Adaptado de *Factores que incrementan la contaminación en el Valle de Aburrá* (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2019).

En este contexto, esta investigación aporta al AMVA los lineamientos para la puesta en marcha de una red de reacción para la mitigación de agentes contaminantes a través de mecanismos tecnológicos y acciones a implementar en la infraestructura urbana, vías de transporte, entre otras, y que en el barrio contribuyan con la remoción del carbono atmosférico y/o purifiquen el aire del sector, especialmente durante estos periodos. Es decir, una serie de sistemas que se activen al dispararse los índices de contaminación y permita retornarlos a niveles que no representen un riesgo para la población, en un corto tiempo, de igual forma, medidas enfocadas a la estabilización de agentes contaminantes durante todo el año.

### 3 Marco Referencial

El presente capítulo permite ahondar en las normativas relevantes para el desarrollo de las actividades y la definición de los conceptos pertinentes para la comprensión del lenguaje técnico usado en el desarrollo de la investigación. Al final se presenta un estado del arte que destaca los resultados y hallazgos de investigaciones realizadas con antelación y que son relevantes para el objeto de este proyecto de grado.

#### 3.1 Marco Contextual

El Área Metropolitana del Valle de Aburrá es una entidad administrativa de derecho público que asocia a los 10 municipios que conforman el Valle de Aburrá: Medellín es la ciudad núcleo, en donde estos municipios se encuentran vinculados entre sí por dinámicas e interrelaciones territoriales, ambientales, económicas, sociales, demográficas, culturales y tecnológicas que para la programación y coordinación de su desarrollo sustentable, desarrollo humano, ordenamiento territorial y racional prestación de servicios públicos requieren un ente coordinador (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2019).

En este sentido, esta consolidación de la administración a nivel metropolitano ha facilitado la creación de mecanismos relevantes como el Plan Operacional para enfrentar Episodios Críticos de Contaminación del Aire - POECA, de donde se deriva la creación de la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire con el Sistema de Alerta Temprana de Medellín y Valle de Aburrá - SIATA, a partir de la cual se desarrolla un análisis continuo de índices de calidad del aire respecto a los niveles de contaminación.

La escala de análisis de este proceso investigativo se centró en el barrio de Belén, localizado en la comuna 16 de Medellín, el cual representa una zona de alta importancia histórica del desarrollo urbano actual, fue el primer barrio de Medellín, actualmente es una centralidad municipal de ámbito zonal, es punto de encuentro, identidad, interacción, abastecimiento e intercambio ciudadano (Alcaldía de Medellín), es donde convergen la mayoría de las actividades de la comuna. Esto trae consigo una dinámica social y económica con altos costos ambientales, en el sentido de que posee una carga vehicular alta, lo cual genera grandes cantidades de material particulado por fuentes móviles afectando a la calidad del aire y de vida de sus habitantes. Es por ello que resulta pertinente mencionar que la elección de este sector se realizó teniendo en cuenta la ubicación geográfica e importancia de las dinámicas socio-económicas de la comuna, su cercanía con zonas industriales al norte y al sur, así como su impacto a escala metropolitana.

##### 3.1.1 *Análisis PESTAL (Político, Económico, Social, Tecnológico, Ambiental y Legal)*

En el marco de metabolismo urbano actual y de una transición hacia un modelo de desarrollo urbano circular, se elaboró un estudio del contexto con ayuda de la herramienta de análisis PESTAL. En la tabla 1 se aplica esta metodología, que permite visualizar la realidad actual desde diversas perspectivas tales como la normativa, guías de planeación y

lineamientos para el desarrollo urbano, las tecnologías disponibles y en desarrollo con alto potencial para su implementación como solución a la problemática, las barreras legales y los impactos socio-ambientales causados por las dinámicas actuales, entre otros. (Ver anexo 3).

**Tabla 1**

*Análisis PESTAL: Políticas Públicas relativas a la calidad del aire del Área Metropolitana del Valle de Aburrá*

Sector	Descripción	Tiempo	Impacto	Probabilidad	Significancia
<b>Político</b>	CONPES 3943	7 años	Nacional	Baja de conseguir los objetivos	Base para futuras políticas y acciones.
<b>Económico</b>	Informe Anual de Calidad del Aire 2020 en el AMVA	Inmediato	AMVA	Alta de conseguir los objetivos	Seguimiento de los contaminantes
<b>Social</b>	Guías de calidad del aire de la OMS	10 años	Mundial	Media de conseguir los objetivos	Punto de referencia
<b>Tecnológico</b>	Resolución 2254 de 2017	13 años, hasta 2030	Nacional	Media de conseguir los objetivos	Regular los contaminantes de la atmósfera
<b>Ambiental</b>	Diagnóstico nacional de salud ambiental	4 años	Nacional	Baja de conseguir los objetivos	Exposición de las condiciones ambientales
<b>Legal</b>	Decreto 948 de 1995	Inmediato cumplimiento	Nacional	Alta de conseguir los objetivos	Marco de las acciones y los mecanismos

*Nota.* Esta tabla muestra las reglamentaciones, informes, lineamientos, diagnósticos y normativas que se han elaborado en torno al tema objeto de estudio de la calidad del aire.

### 3.1.2 Análisis del Contexto en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá

Actualmente en la región se han implementado planes, sistemas, caracterizaciones y medidas, frente a la contaminación ambiental, tanto en época de contingencia como en época de normalidad. Todas estas acciones se han tomado respondiendo a cada nivel de calidad del aire y enfrentando las fuentes de emisiones, ya sean móviles o fijas; a continuación, se exponen estas medidas:

**3.1.2.1 Plan Operacional para Enfrentar Episodios Críticos de Contaminación del Aire – POECA.** El POECA tiene el propósito primordial de proteger la salud de la población frente a situaciones de contaminación atmosférica que excedan los umbrales o niveles de contaminación y tiempos establecidos, enmarcados en la Resolución 2381 de 2015, que establece en su capítulo III las medidas que se tomarán según los niveles de alerta naranja, roja o emergencia y se aplicarán conforme a lo establecido en el Protocolo del POECA en el Valle de Aburrá (AMVA-UPB, 2017).

**3.1.2.2 Red de Monitoreo de la Calidad del Aire.** Desde el SIATA, se opera

actualmente la red de monitoreo de calidad del aire del Valle de Aburrá, la cual es uno de los pilares de la gestión de la calidad del aire, porque permite generar información en tiempo real necesaria para registrar y dar seguimiento a los niveles y variación de contaminantes en la atmósfera en diferentes sectores del AMVA, mediante las estaciones instaladas en sitios estratégicos de toda la región metropolitana (AMVA-UPB, 2017) (Ver anexo 4).

**3.1.2.3 Inventarios de Emisiones.** El Área Metropolitana del Valle de Aburrá cuenta con inventarios de emisiones que caracterizan las fuentes móviles y fuentes fijas de todo el Valle de Aburrá, los cuales se actualizan cada dos años. Tales inventarios de emisiones tienen un importante nivel de detalle y distribución geográfica, lo cual sirve de base para la identificación de prioridades y oportunidades de reducción de emisiones (AMVA-UPB, 2017). Este inventario de emisiones es la guía para identificar los compuestos de la contaminación del aire, para plantear tecnologías aplicables a la remoción y manejo de material particulado, contribuyendo así a la generación de soluciones adecuadas que respondan a cada tipo de emisión. La caracterización y zonificación como conjunto, permitió comprender de mejor forma las dinámicas socio-económicas y sus impactos en la calidad del aire, un factor fundamental para el análisis de la problemática que pretende resolver el presente trabajo.

**3.1.2.4 Pico y Placa Ambiental.** Los alcaldes de los 10 municipios del Área Metropolitana del Valle de Aburrá acogieron de manera separada, mediante Decreto, la decisión que rigió desde el 8 de febrero hasta el 10 de abril de 2021, en donde se aplicó la medida denominada “pico y placa<sup>1</sup> Ambiental” para vehículos particulares con rotación cada dos semanas, de lunes a viernes, entre las 5:00 a. m. y las 8:00 p. m., de acuerdo con el último dígito de la placa (AMVA, 2021). Algo interesante que vale la pena resaltar de esta medida es que en todos los municipios podrán transitar sin restricción alguna, los vehículos eléctricos e híbridos y los que usen gas natural comprimido vehicular; lo cual es un incentivo al uso de tecnologías no contaminantes.

## 3.2 Marco Conceptual

El desarrollo de este subcapítulo tiene como objetivo presentar los conceptos principales que orientaron y encaminaron el acercamiento a la realidad de la calidad del aire a nivel global en el AMVA, en la comuna 16 de Medellín y específicamente en el Barrio Belén como zona central de estudio; permitiendo focalizar la atención en el parque de Belén y su área de influencia, en consecuencia se tomó un perímetro de 3,5 km de radio desde el parque de Belén para la toma de información; se desarrolló el proceso de recolección de información documental y se analizó desde una perspectiva crítica, basada en el estudio de alternativas de solución para plantear lineamientos de aplicación de tecnologías, con el fin de establecer una red de acción que pueda actuar durante las épocas de normalidad y en los

---

<sup>1</sup> Pico y Placa es una medida aplicada en Medellín desde 2005 para la restricción de circulación de automóviles de servicio particular (con excepción para algunos casos según el servicio que prestan como ambulancias, representación oficial, escolares y otros) durante algunas Horas Pico del día, de acuerdo con el dígito final de la placa (Posada Henao y otros, 2011).

picos de mayor contaminación, reduciendo los índices contaminantes que afectan la calidad del aire.

### **3.2.1 *Metabolismo Urbano***

Metabolismo urbano se refiere a una serie de procesos físicos y sociales dinámicos, interconectados y mutuamente transformadores; lo que trae consigo un ecosistema artificial que requiere de recursos, entre ellos los ecosistémicos, y funciona con actividades propias de la interacción humana (Castán Broto y otros, 2012). El análisis del metabolismo es por tanto un medio para cuantificar todos los flujos de energía, materiales, recursos naturales y residuos que entran y salen de una región urbana y puede ser visto como el proceso de transformación para mantener la dinámica y actividad económica de la ciudad (Decker y otros, 2000), suministrando información sobre sus flujos de agua, energía y materiales, deben de ser considerados como vitales, al igual que la eficiencia energética, ciclo de materiales, gestión de residuos, e infraestructuras que la constituyen.

### **3.2.2 *Atmósfera Terrestre***

Este concepto hace referencia a lo que nos rodea como seres humanos, a nuestro entorno y al medio ambiente en general, es un ecosistema común, en donde existe una mezcla de gases y partículas que envuelve la Tierra y que permanece atrapada a la misma por la fuerza gravitacional. Según la universidad de Chile (2021), los principales componentes de la atmósfera son el nitrógeno molecular (78% en volumen) y oxígeno molecular (21% en volumen). El vapor de agua, el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), y otros elementos gaseosos de menor concentración ocupan el 1% restante. Esto en condiciones normales permite la supervivencia de raza humana y el equilibrio ambiental, pero la generación en exceso de material particulado genera fenómenos a escala global como el calentamiento global y cambio climático, que determina la calidad de vida y actualmente amenaza con la extinción de la raza humana. A micro-escala el material particulado afecta la salud de las personas directamente, lo que en contextos como el del AMVA y otras ciudades, ya se reconoce como un problema de salud pública.

### **3.2.3 *Índice de Calidad del Aire (ICA)***

Índice para la notificación diaria de la calidad del aire, que va en una escala de 0 a 500 (para el Valle de Aburrá el ICA va hasta 300) o en concentraciones medidas en microgramos/metro cúbico -  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y que señala el grado de pureza o contaminación atmosférica de este territorio, debido a que interpreta los niveles de las concentraciones registradas en la región metropolitana, gracias a una amplia red de monitoreo que permite calcular un valor del índice diario para cada contaminante (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2019).

Es importante tener en cuenta el origen generador de estas partículas, que puede ser de fuente fijo como industrial, o móvil que en su mayoría son de vehículos a combustión diésel y gasolina. En función de esto varían las propiedades físicas y la composición química

de la carga contaminante, lo cual resulta relevante a la hora de determinar las acciones para evitar su generación y enfrentar la presencia de este material particulado.

El material particulado respirable presente en la atmósfera de las ciudades en forma sólida o líquida, como el polvo, las cenizas, el hollín, las partículas metálicas, el cemento y el polen, entre otras, se puede dividir, según su tamaño, en dos grupos principales. A las de diámetro aerodinámico igual o inferior a los 10 micrómetros o 10  $\mu\text{m}$  (1  $\mu\text{m}$  corresponde a la milésima parte de un milímetro) se las denomina PM10 y a la fracción respirable más pequeña, PM2,5, están constituidas por aquellas partículas de diámetro aerodinámico inferior o igual a los 2,5 micrómetros, es decir, son 100 veces más delgadas que un cabello humano (Linares & Díaz, 2008).

#### **3.2.4 *Material Particulado (PM)***

El término partícula, aerosol o material particulado atmosférico (MPA) se refiere a cualquier sustancia, a excepción del agua pura, presente en la atmósfera en estado sólido o líquido por causas naturales o antropogénicas. Bajo esta denominación se incluyen humos, polvo, fibras, nieblas, brumas, calima, hollín, smog, etc (Santamaría, 2008), (Ver anexo 5).

#### **3.2.5 *Calidad del Aire***

Se refiere a la presencia en mayor o menor medida de contaminantes en la atmósfera que puedan ser nocivos para la salud humana, para el medio ambiente en su conjunto y para otros bienes de cualquier naturaleza (AEMET, 2018), en el caso del AMVA, esta calidad del aire se mide según el POECA en buena, moderada, dañina para grupos sensibles, dañina a la salud y en el caso extremo en muy dañina a la salud; lo que da lugar a que el SIATA emita en cualquier alteración de los índices de material particulado, los niveles de prevención, alerta y emergencia, para poder tomar acciones urgentes frente a eventos de desequilibrio ambiental.

#### **3.2.6 *Calentamiento Global***

Al hablar del calentamiento global es indispensable referirse al cambio climático, de allí que frecuentemente se usen indistintamente ambos términos, pero mientras uno describe el fenómeno del incremento de temperatura reciente, el otro se refiere al mecanismo que lo causa (Caballero y otros, 2017). Entonces se puede considerar al cambio climático como un fenómeno que se manifiesta en el aumento de la temperatura promedio del planeta que tiene como consecuencias en la intensidad de los fenómenos del clima en todo el mundo, dejando secuelas como la reducción de las áreas cubiertas de nieve en el hemisferio norte, ocasionando que muchos de los témpanos de hielo que flotaban en el océano ártico se hayan derretido (Ortiz, 2021).

#### **3.2.7 *Cambio Climático***

Hace referencia a una variación del estado del clima en las variaciones del valor

medio o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante períodos prolongados, generalmente décadas o períodos más largos. El cambio climático puede deberse a procesos internos naturales o a forzamientos externos, tales como modulaciones de los ciclos solares, erupciones volcánicas y cambios antropógenos persistentes de la composición de la atmósfera o del uso de la tierra (IPCC, 2018).

### **3.2.8 Contaminación Atmosférica**

Contaminantes presentes en la atmósfera, tales como polvo, gases o humo en cantidades y durante periodos de tiempo tales que resultan dañinos para los seres humanos, la vida silvestre y la propiedad. Estos contaminantes pueden ser de origen natural o producidos por el hombre (Universidad de Chile, 2021), y en el caso de estudio del presente documento investigativo es relevante resaltar que el material particulado PM10 y PM2.5 son los desequilibrantes de la calidad del aire en el AMVA y determinantes en las dinámicas urbanas de los habitantes de esta zona del país.

## **3.3 Estado del Arte**

Con el fin de analizar el contexto global en temas de manejo ambiental enfocado en la calidad del aire, se estudió los trabajos previos relacionados con el tema del presente trabajo y la viabilidad de alternativas de solución ante la problemática de la contaminación ambiental; a continuación se describen los estudios más pertinentes en el contexto de metabolismo urbano, del proceso investigativo del trabajo de grado, focalizado en orientar los lineamientos de un plan de acción para contrarrestar la contaminación del aire durante los picos de mayor índice, en el Barrio Belén de Medellín.

### **3.3.1 Trabajos Previos Relacionados con la Calidad del Aire y el Material Particulado**

A continuación, se describen las investigaciones relacionadas con la calidad del aire, en el contexto internacional, nacional y regional del AMVA.

**3.3.1.1 Antecedentes Internacionales.** A continuación, se describen los antecedentes documentales de orden internacional, que trata de investigaciones relacionadas con la calidad del aire, en donde se analizó la correlación de la contaminación del aire por tráfico, la dispersión y deposición de partículas contaminantes, y las simulaciones CFD en entornos urbanos, con el contexto del área metropolitana del valle de aburra y su conveniente adaptación al entorno del barrio Belén de Medellín.

**3.3.1.2 Evaluación de la Contaminación del Aire por Tráfico.** La investigación adelantada por Anaïs Pasquier y Michel Andre, en el estudio titulado “Considering criteria related to spatial variabilities for the assessment of air pollution from traffic” (2017), se desarrolla con el objeto de identificar parámetros como el tráfico, condiciones meteorológicas, características de diversos contaminantes, estructuras de carreteras, topografía, entre otros que permiten dar una perspectiva de las concentraciones de contaminantes en el aire, en relación a ello los autores estudiaron a escala local las relaciones entre las concentraciones y la distancia a la carretera observando que los principales contaminantes son material particulado (PM), dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) o benceno los cuales durante un tiempo de exposición ya sea a corto o largo plazo pueden llegar a ocasionar afecciones en la salud humana, también analizaron las concentraciones locales de aire cerca de las aceras, lugares de trabajo o zonas de residencia denotando que estos contaminantes junto con partículas ultrafinas (UFP), carbono negro (BC) tienen una mayor concentración en las carreteras que en el interior de las zonas urbanas (Guerrero Rojas, 2020).

Debido a las dinámicas existentes en el barrio Belén, sumado a la morfología vial, se logró identificar que el sector cumple con las características físicas para presumir que existe una concentración de material particulado en los entornos de las calles principales, como la calle 30 y la avenida bolivariana, así como alrededor del parque Belén, por lo tanto este sector se convierte, en foco de concentración de contaminantes en el aire; consecuentemente es pertinente realizar acciones concretas para contrarrestar el aumento de los índices de contaminación atmosférica.

**3.3.1.3 Dispersión y Deposición de Partículas Contaminantes.** El documento realizado por Sara Janhäll del Instituto Nacional Sueco de Investigación de Carreteras y Transportes-VTI, citado por Nancy Katherine Guerrero Rojas (2020), tiene como objetivo realizar el análisis de efectos físicos como la dispersión y la deposición de partículas contaminantes en superficies vegetativas con el fin de proporcionar información para el diseño de estructuras que permitan una mejora en la calidad del aire dentro de centros urbanos; se concluye primero que la vegetación debe estar cerca de las fuentes de contaminantes esto con el fin de poder mejorar la deposición y disminuir las concentraciones mediante el proceso de dilución con aire limpio, y segundo enfatiza que es necesario realizar intervenciones dentro de áreas urbanas con más estudios de barreras teniendo en cuenta características como la altura y la porosidad ya que esto influye en el grado de filtración, es decir, las barreras deben asegurar una deposición más efectiva permitiendo que las partículas pasen a través y no encima de ellas (Guerrero Rojas, 2020).

Esta investigación se convirtió en punto de partida para la formulación de estrategias enfocadas a la consolidación de barreras vegetales, que al ser ubicadas estratégicamente en puntos de concentración de generación de contaminantes, el material particulado pueda ser procesado por la vegetación, mezclado con aire limpio y mejorando la calidad del aire en el barrio Belén, lo cual pueda ser replicable y aplicable a otras zonas del área metropolitana del valle de Aburrá.

**3.3.1.3.1 Simulaciones CFD en Entornos Urbanos.** Mediante la representación 3D de áreas urbanas, A.P.R. Jeanjean, G. Hinchliffe, W.A. McMullan, P.S. Monks y R.J. Leigh, con la ayuda del Departamento de Física y Astronomía de la Universidad de Leicester, Reino Unido y citado por Nancy Katherine Guerrero Rojas (2020), tienen como objetivo estudiar la capacidad de los árboles para reducir los contaminantes emitidos por el tránsito vial tomando como enfoque principal la interacción entre el viento y los árboles. Las modelaciones de túnel de viento para la ciudad de Leicester, Reino Unido se realizó a partir de los experimentos realizados por (CODASC, 2014), en donde “dos líneas de edificios de 180 m de longitud, 18 m de altura y 18 m de ancho estaban separadas por una calle de 18 m de ancho” (Jeanjean y otros, 2015), a una escala de 1:150, con el fin de determinar la concentración de contaminantes y el movimiento del viento, teniendo en cuenta que se obtuvieron 12 direcciones de viento durante las simulaciones. Con base a las pruebas realizadas se obtuvieron en total “24 simulaciones de CFD: 12 para la ciudad libre de árboles y 12 para la ciudad con árboles porosos” (Jeanjean y otros, 2015), del cual después de haber evaluado los dos escenarios y haber realizado un análisis estadístico los autores concluyeron que los árboles aumentan en un 7% la dispersión de las partículas suspendidas en el aire, sin embargo, también determinaron que se generan mayores concentraciones de contaminantes en los centros urbanos que en áreas rurales (Guerrero Rojas, 2020).

Al aumentar la cantidad de árboles en centros urbanos, aumenta la capacidad de dispersión de partículas suspendidas en el aire, lo cual invita a la implementación de estrategias que permitan este aumento de vegetación, que adaptados al sector de estudio del barrio Belén en el contexto de este documento investigativo, se puede optar por el aumento de árboles en zonas verdes existentes o el aumento de área de estas, muros verdes en fachadas de edificios o vegetación en las cubiertas de edificaciones.

**3.3.1.4 Antecedentes Nacionales.** A continuación, se describen los antecedentes documentales de orden nacional, que trata de investigaciones realizadas en Colombia, relacionadas con la calidad del aire, en donde se analiza la correlación entre el flujo vehicular, el PM<sub>2,5</sub> y las variables meteorológicas en Bucaramanga, Santander; de igual manera se **estudia la influencia** de la combustión vehicular en la calidad del aire en Pamplona, Norte de Santander; Por último se consideran las alternativas para la reducción de contaminantes atmosféricos emitidos por el sistema vehicular en Bogotá D.C., con la situación del área metropolitana del valle de aburra y la conveniente adaptación al entorno del barrio Belén de Medellín.

**3.3.1.4.1 Correlación Entre el Flujo Vehicular, el PM<sub>2,5</sub> y Variables meteorológicas.** Este estudio de caso realizado por Beleño Montagut et al, (2020) en la ciudad de Bucaramanga (Colombia), se enmarca en la problemática de la dispersión atmosférica de un contaminante (PM<sub>2,5</sub>), lo cual es un tema complejo, donde variables como la velocidad del viento, la temperatura, la época del año, entre otros, contribuyen en mayor o menor grado al incremento o decremento de la concentración de las especies químicas. Dado que las motos y los autos particulares son los que más contribuyen a la emisión de COV, se midieron los aforos para las tres franjas horarias de mayor flujo vehicular en la zona, en el punto de mayor concentración correspondiente a la parada de bus dado que en el momento del arranque se produce la mayor liberación de contaminantes.

Esta investigación generó conclusiones relevantes para las investigaciones de calidad del aire, determinando que la contaminación por material particulado es de suma importancia, y en especial el PM<sub>2,5</sub>, el cual ha generado que se haya empezado a medir en algunos puntos de la ciudad, con posterioridad esta investigación; el análisis de la dispersión de contaminantes en la zona de interés muestra que efectivamente el PM<sub>2,5</sub> está asociado a los compuestos orgánicos volátiles (COV) (hidrocarburos en estado gaseoso a la temperatura ambiente normal los cuales son muy volátiles a dicha temperatura), que pueden ser en su mayoría provenientes del combustible generado por las fuentes móviles que circulan por la vía dada la alta correlación encontrada en los análisis (Beleño Montagut y otros, 2020).

Por otra parte, es notable el resultado de la relación del PM<sub>2,5</sub> con la humedad relativa la cual presenta valores altos en la franja de la mañana y noche respecto al medio día. Esta relación sugiere la persistencia de los contaminantes en el ambiente por más tiempo. En general, entre los distintos tipos de vehículos (sin tener en cuenta años ni modelos), no se observan cambios en la correlación lo cual sugiere que la relación con el PM<sub>2,5</sub> obedece más a la cantidad de vehículos y se incrementa respecto al número de vehículos, lo cual es concordante con el análisis anterior es decir que al aumentar las medidas de aforos vehiculares aumenta la cantidad de COV y de PM<sub>2,5</sub> registrados (Beleño Montagut y otros, 2020).

**3.3.1.4.2 *Influencia de la Combustión Vehicular en la Calidad Del Aire.*** Esta investigación se concentró en la influencia que tiene la combustión vehicular en la calidad del aire en el municipio de Pamplona (Colombia), se consideró el contexto global, en donde la contaminación del aire por material particulado (PM) se considera un serio problema ambiental debido a la presencia en la atmósfera de materiales peligrosos tales como metales e hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP). Así mismo se tiene en cuenta que en los últimos tiempos ha tomado un gran auge en los países del tercer mundo incluida la América Latina, el estudio de la exposición humana a las emisiones de combustión provenientes de las fuentes móviles que circulan con gasolina y diésel que incluyen las partículas finas (PM2.5) y los componentes muta génicos y carcinogénicos como son los HAP. Los HAP son uno de los contaminantes prioritarios del aire debido a sus propiedades extremadamente peligrosas para la salud humana. La materia orgánica presente en los filtros de PM2.5 del aire de Pamplona fue extraída con Diclorometano. Los efectos genotóxicos del material particulado PM2.5 del aire de Pamplona recolectado en una vía de alto tráfico vehicular por la cual circulan vehículos de carga pesada (tractomulas) que funcionan con diésel y vehículos livianos que funcionan con gasolina, fue evaluado mediante el ensayo cometa (Quijano Parra y otros, 2016).

**3.3.1.4.3 *Alternativas para la Reducción de Contaminantes Atmosféricos Emitidos por el Sistema Vehicular.*** Esta investigación realizada por Guerrero Rojas (2020) tiene como objetivo generar alternativas de diseño urbano que ayuden a la reducción de partículas contaminantes en el aire, emitidas por el sistema vehicular en la ciudad de Bogotá, mediante la implementación de nuevas tecnologías y el análisis de parámetros que influyen en las concentraciones de contaminante. Se busca dar un inicio para el desarrollo en la implementación de diferentes alternativas que ayuden al control y mitigación de partículas suspendidas y gases contaminantes dentro de la ciudad de Bogotá y se encuentra dividido en tres fases principales. La zona de estudio fue la Bogotá D.C., la cual se considera una de las ciudades más contaminadas por la generación de partículas suspendidas en el aire. Debido al gran desarrollo urbano que esta ha tenido en últimos años la generación de desechos antropogénicas ha generado que en diferentes localidades se presenten problemáticas de contaminación y control de estas mismas.

En la primera parte se estudió el desarrollo de la contaminación en Colombia a partir del año 2005, en donde se comenzaron a trabajar más en las leyes de regulación hasta llegar a mediados del año 2019, en la segunda parte se presenta la descripción de alternativas desarrolladas internacionalmente y por último se realiza un análisis de cada una ellas para la adecuación de estas en el entorno urbano (Guerrero Rojas, 2020).

**3.3.1.5 Antecedentes Regionales.** A continuación se describen los antecedentes documentales de orden Regional, que guardan relación con la calidad del aire, en donde se encuentra el estudio de la calidad del aire en el valle de Aburrá, Antioquia – Colombia, correlación de la contaminación del aire por tráfico, el análisis comparativo y modelación de las situaciones de calidad del aire, centrado en Medellín y así mismo, se expone el artículo sobre la calidad del Aire en el Valle de Aburrá, ¿Qué podríamos Esperar de la Ciudad Inteligente?.

**3.3.1.5.1 *Calidad del Aire en el Valle de Aburrá Antioquia -Colombia.*** Esta investigación analiza la calidad del aire en Medellín y su área metropolitana período 2001-2007, explorando el comportamiento de los contaminantes atmosféricos en el área Metropolitana del valle de Aburrá, con base en los datos primarios recolectados por la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire, en este sentido se confirma la información con mediciones actualizadas realizadas con rigor de precisión y reproducibilidad para garantizar la calidad y consistencia de los datos. Las concentraciones de partículas en suspensión total (PST) y de partículas respirables (PM10) se encuentran elevadas a niveles que exceden en 200- 400% los límites de precaución definidos por la Organización Mundial de la Salud y la tendencia es al empeoramiento a medida que crece la densidad vehicular (Bedoya & Martínez, 2009).

En conclusión, el material particulado es el contaminante atmosférico que plantea un mayor riesgo para la salud de los habitantes de Medellín y su área metropolitana, no solamente por su reconocida capacidad para generar enfermedades cardiorrespiratorias, sino también por su tendencia al ascenso y por las altas concentraciones que se alcanzan en un valle geográfico estrecho y poco ventilado, por lo tanto es necesario la estructuración de un programa eficiente, oportuno, completo, práctico, continuo y funcional de vigilancia epidemiológica en calidad de aire y sus efectos nocivos en la población es un imperativo para Medellín y toda su área metropolitana (Bedoya & Martínez, 2009).

**3.3.1.5.2 *Análisis Comparativo y Modelación de las Situaciones de Calidad del Aire.*** En este documento se recogió información sobre la calidad anual del aire para PM2.5, NO2 y ozono, sobre diversos parámetros de interés en cuanto a su relación potencial con la calidad del aire Para una muestra de 25 ciudades de diversos países del mundo. En él se encuentre el análisis comparativo de dicha información y un modelo lineal que relaciona la calidad del aire con algunos de los parámetros es elaborado, con base en el nivel de aproximación que se logró entre las calidades reportadas y las predichas por la modelación. Los datos se basan en reportes e información disponible en páginas web y en reportes públicos e informes de investigación propios para los años 2012 y 2015. Se ha logrado plantear una perspectiva novedosa de la situación de la calidad del aire y del tipo de medidas estratégicas que se pudieran emprender para lograr mejorar la situación y llevarla a los límites deseables (Posada y otros, 2017).

**3.3.1.5.3 *Calidad del Aire en el Valle de Aburrá, ¿Qué podríamos Esperar de la Ciudad Inteligente?*** En este documento se analiza cómo el fenómeno global de crecimiento urbano, unido a la rápida penetración de la telefonía móvil, internet de las cosas, sensórica, automatización, intercambio de datos en tiempo real, etc., confluyen en un tema que genera grandes expectativas: la ciudad inteligente. Entre sus múltiples implicaciones, en este texto se destacan hechos relevantes para la gestión de la calidad del aire en el Valle de Aburrá. El punto de partida es Plan de Gestión de la Calidad del Aire para el Valle de Aburrá, con vigencia 2017-2030. Se presenta una correlación entre las oportunidades de gestión que la ciudad inteligente ofrece a la calidad del aire y las líneas estratégicas de dicho plan. Se identifican importantes soluciones desde el enfoque bottom-up, centradas en el uso masivo de la información y la apropiación de herramientas digitales para favorecer la autogestión de las emisiones en todos los ámbitos – fuentes fijas y móviles, públicas y particulares (Cadavid Giraldo y otros, 2021).

## **4 Fundamentación del Proyecto**

El presente capítulo reestableció la base metodológica del proceso investigativo, planteando como objetivo general el cual buscó orientar estrategias que permitieran establecer un plan de acción que contrarreste el deterioro de la calidad del aire en el barrio Belén, para su cumplimiento la investigación se centró en el paradigma cualitativo permitiendo un análisis documental que permitieron realizar una investigación de la bibliografía existente fundamentando así el plan de acción establecido.

### **4.1 Objetivo General**

Orientar estrategias y medidas de mitigación de gases contaminantes en el parque automotor a una escala del barrio Belén de la ciudad de Medellín, Colombia (proyecto piloto), para posteriormente ser implementado a escala metropolitana. Además, estas medidas buscan establecer un plan de acción que contrarreste los periodos críticos de deterioro de la calidad del aire.

### **4.2 Objetivos Específicos**

- Identificar cuáles son los vehículos y sistemas de movilidad responsables de la mayor concentración de material particulado presentes en la atmósfera del área de influencia del barrio Belén de Medellín, en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá.
- Determinar los factores contaminantes en el aire de la demarcación de la ciudad de Medellín y su área metropolitana. Entre ellos la dimensión social y económica, dentro del contexto de la calidad de vida y del aire.
- Establecer un plan de acción para contrarrestar los periodos críticos de deterioro de la calidad del aire, enfocado a la mitigación de los contaminantes presentes en el aire del área de influencia del barrio belén de la ciudad de Medellín, Colombia.

### **4.3 Metodología**

El presente trabajo de grado se desarrolló mediante la aplicación de una metodología de investigación documental basada en la lectura de a referencias bibliográficas extraídas de repositorios académicos como punto de partida en la comprensión de los fenómenos asociados a la calidad del aire en ciudades representativas, lo que ha sido complementado con el análisis de estudios técnicos desarrollados previamente para el valle de Aburrá; en segundo lugar se presenta un análisis de la información relativa a la ciudad de Medellín (y su área metropolitana), lo que permite correlacionar estos conceptos técnicos y categorizarlos a partir de otras investigaciones y marcos teóricos existentes; en tercer lugar se presenta una serie de medidas propuestas para el mejoramiento de la calidad del aire en una demarcación específica de la ciudad, siguiendo la lógica de proyecto piloto (laboratorio urbano) el cual además incorpora un modelo de reacción para periodos críticos del año en que la calidad del

aire se ve seriamente comprometida por la combinación de agentes contaminantes y fenómenos hidrometeorológicos recurrentes.

## 5 Concepto Ético

Este trabajo de grado se desarrolla en coherencia a la Acción sin Daño (ASD), de donde, según lo mencionado por Ana Luz Rodríguez Puentes (2009), se desprende una obligación moral y en general, la demanda por una reflexión continua y crítica sobre lo que va a hacerse y sobre “lo actuado”, en tanto sus principios, consecuencias e impactos. Los efectos positivos que se generen de este proceso investigativo, buscan el mejoramiento de la calidad del aire del barrio Belén de la ciudad de Medellín e impactar en las dinámicas sociales, económicas y ecológicas de la región metropolitana, teniendo en cuenta el potencial de ser replicado en otros barrios del Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

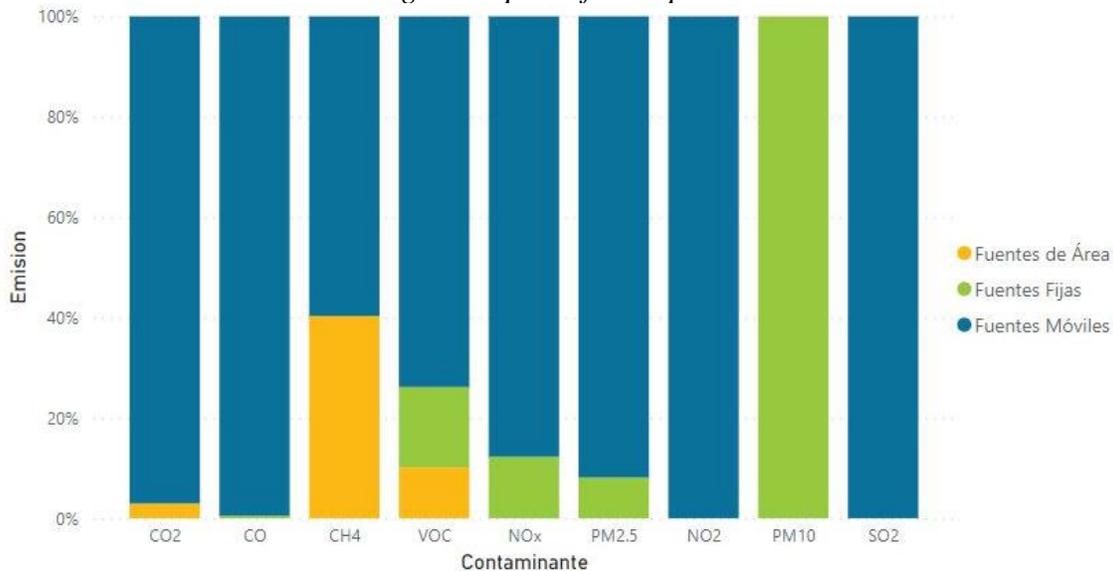
## 6 Desarrollo Estratégico

### 6.1 Análisis de fuentes contaminantes existentes

Las fuentes contaminantes existentes parten de dos categorías fundamentales, fuentes fijas y fuentes móviles, para lograr divisar y así establecer un análisis completo se adaptan las mediciones totales para el año 2018, las cuales son analizadas y presentadas tomando información del Modelo del Emisiones Atmosféricas del Valle de Aburrá – MODEAM. En la figura 7 se presenta que las fuentes fijas son las mayores responsables de las emisiones de PM10 y significativamente de la generación de Metano - CH<sub>4</sub>, Compuestos orgánicos volátiles - VOC; sin embargo, las fuentes móviles aportan mayormente Dióxido de Carbono - CO<sub>2</sub>, Monóxido de Carbono CO, CH<sub>4</sub>, VOC, Óxidos de Nitrógeno - NO<sub>x</sub>, PM<sub>2.5</sub>, Dióxido de nitrógeno NO<sub>2</sub> y Dióxido de azufre SO<sub>2</sub>.

**Figura 7**

*Aporte de las emisiones totales según el tipo de fuente para el año 2018*



*Nota.* En la figura se exponen los tipos de fuentes y su aporte a las emisiones ambientales totales para el año 2018. Adaptado de *Modelo del Emisiones Atmosféricas del Valle de Aburrá - MODEAM* (Área Metropolitana del Valle de Aburrá - AMVA, 2018).

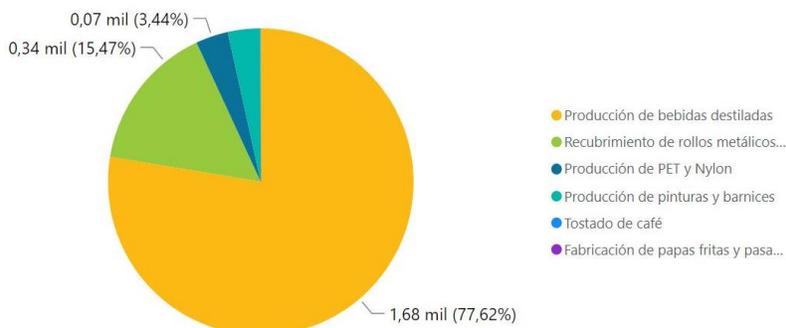
#### 6.1.1 Fuentes de Área

Las fuentes de área son aquellas en donde se encuentran que Las emisiones evaporativas industriales se refieren a las emisiones de compuestos orgánicos volátiles – VOC producidos en diferentes etapas de los procesos y que no necesariamente salen por una fuente fija puntual, como una chimenea, por tanto, es fundamental tener en cuenta que las emisiones evaporativas de VOC por fuentes de área pueden llegar a ser más altas que las expulsadas por el tubo de escape en vehículos a gasolina (Área Metropolitana del Valle de

Aburrá, 2009). En la figura 8 se presenta los sectores de la producción que pertenecen a estas fuentes.

**Figura 8**

*Emisiones evaporativas industriales (Mg año) año 2018*



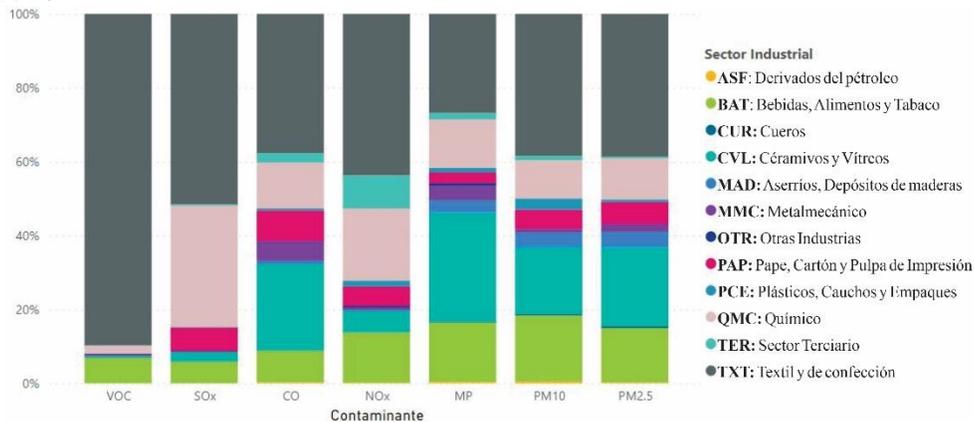
*Nota.* En la figura se presentan la distribución de emisiones evaporativas industriales, para el año 2018 de contaminantes con criterio de acuerdo del sector productivo. Adaptado de *Modelo del Emisiones Atmosféricas del Valle de Aburrá - MODEAM* (Área Metropolitana del Valle de Aburrá - AMVA, 2018).

### 6.1.2 Fuentes fijas

Las emisiones derivadas de los procesos industriales en el Valle de Aburra se encuentran dentro del inventario de fuentes fijas, en donde se tienen contemplados 179 contaminantes atmosféricos, que se agrupan en familias como monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NOx), óxidos de azufre (SOx), compuestos orgánicos volátiles (VOC), compuestos orgánicos volátiles no metánicos (NMVOC), material particulado total de diferentes tamaños (PMx) y para los gases de efecto invernadero se analizan el dióxido de carbono (CO2), metano (CH4) y óxido nitroso (N2O) (ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ, 2018). En la figura 9 se presenta los sectores industriales que más aportan a la generación de estas emisiones.

**Figura 9**

*Distribución de emisiones de contaminantes criterio de acuerdo del sector industrial para el año 2018*



*Nota.* En la figura se presentan la distribución de emisiones para el año 2018 de contaminantes con criterio de acuerdo del sector industrial. Adaptado de *Modelo del Emisiones Atmosféricas del Valle de Aburrá - MODEAM* (Área Metropolitana del Valle de Aburrá - AMVA, 2018).

**6.1.2.1 Material Particulado PM10.** El Material Particulado menor a 10  $\mu\text{m}$  (PM10) es la principal emisión de las fuentes fijas, por lo tanto, es uno de los contaminantes monitoreados por el SIATA. En la figura 10 se presenta las estaciones de monitoreo de la red de medición SIATA, en donde el # 4 es la estación Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid (MED-PJIC), que queda a 3,74 km del parque de Belén; Con el # 9 está la estación Tráfico Centro (MED-TRAF), a 3,35 km del parque de Belén y con el # 10 se ubica la estación Éxito San Antonio (MED-EXSA), a 3,59 km del parque de Belén.

**Figura 10**  
*Estaciones de monitoreo PM10 del SIATA*

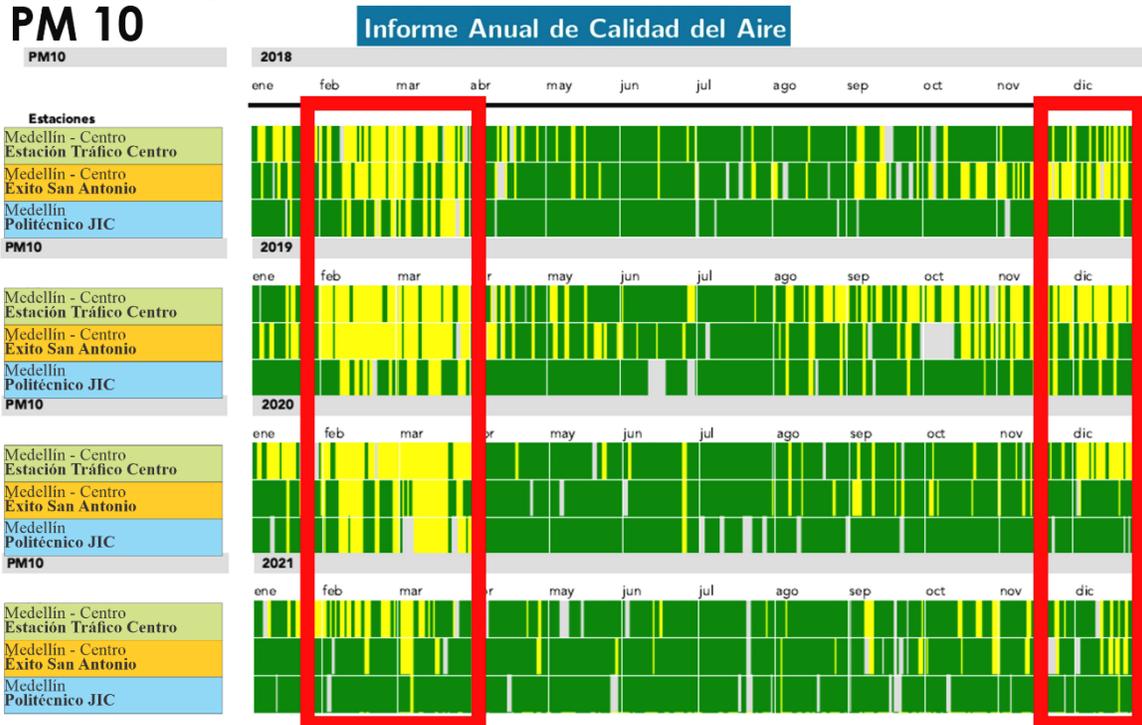


*Nota.* En la figura se describen las estaciones de medición de PM10 de la red SIATA, dentro del perímetro de área de influencia de la zona de estudio del Barrio Belén para toma la de información de calidad del aire. Adaptado de *la página web SIATA* (SIATA, 2022).

Sumado a lo anterior se logró establecer, según las estaciones de la red de medición ubicadas dentro del área de influencia históricas de la red, los picos de concentración de PM10 en los años 2018 a 2021. En la figura 11 se señalan las épocas de mayor concentración de PM10, en donde se destacan los meses de febrero a abril y el mes de diciembre, lo que da lugar a establecer las épocas donde se disparan las afectaciones a la calidad del aire en el barrio Belén

**Figura 11**

*Comparativo de picos de concentración de PM10 en los años 2018, 2019, 2020 y 2021*

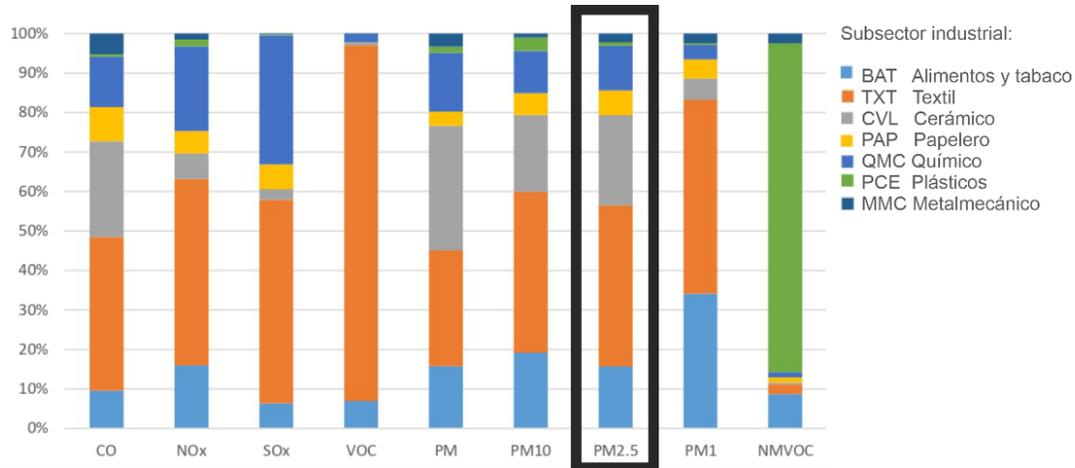


*Nota.* En la figura se compara el comportamiento del PM10 para el periodo del año 2018 a 2021, describiendo las estaciones de medición de la red SIATA que se encuentran dentro del perímetro escogido para toma la de información de calidad del aire. Adaptado de *los informes anuales de calidad del aire de los años 2018* (Universidad EAFIT, 2018), *2019* (Universidad EAFIT, 2019), *2020* (Universidad EAFIT, 2020) y *2021* (Universidad EAFIT, 2021).

**6.1.2.2 Material Particulado PM2.5.** El PM2.5 es clave para establecer el estado de la calidad del aire de la región y, junto con el material particulado PM10 y el ozono, constituyen los contaminantes principales en la gestión de episodios de contaminación en el Valle de Aburrá, para lo cual se considera como información base la presentada en la Resolución 2254 de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Universidad EAFIT, 2021). En la figura 12 se visualiza el porcentaje de emisiones de cada subsector industrial, teniendo en cuenta el mayor impacto o aporte al total de la contaminación generada de fuentes fijas.

**Figura 12**

*Distribución de emisiones de contaminantes atmosféricos por subsector industrial año base 2018*



*Nota.* En la figura se compara porcentualmente el aporte de cada subsector industrial al total de la contaminación generada de fuentes fijas y cabe destacar al textil como el mayor aportante a la generación de emisiones de PM2.5. Adaptado de *Actualización Inventario de Emisiones Atmosféricas del Valle de Aburrá - 2018* (ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ, 2018).

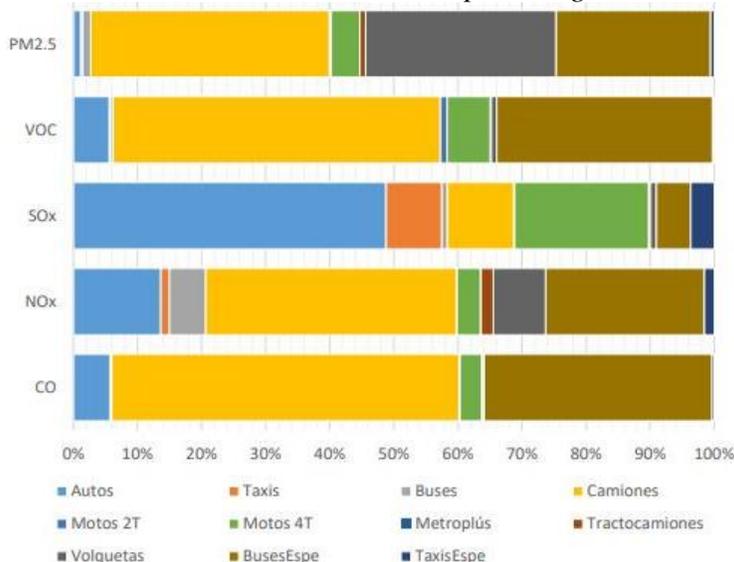
### 6.1.3 Fuentes móviles

A continuación, se evidencia el resultado del análisis de las fuentes móviles, su conformación, incremento e impactos que generan en la población, así mismo, las afectaciones a la calidad del aire del Valle de Aburrá

En la figura 13 se presenta la distribución de las emisiones de contaminantes, los vehículos responsables y su grado de contribución.

**Figura 13**

*Distribución de emisiones de contaminantes criterio por categoría vehicular, año 2018*

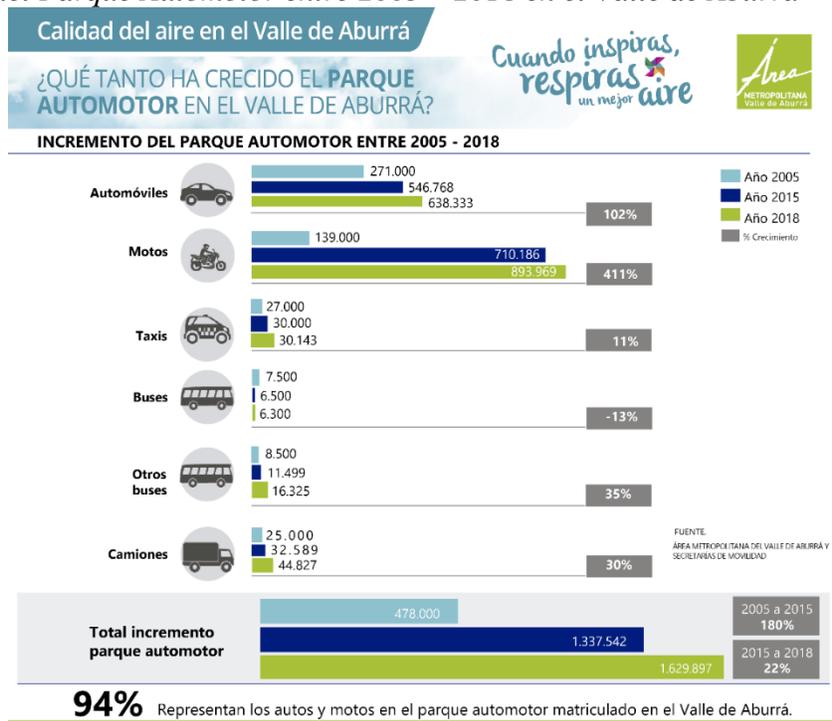


*Nota.* En la figura se aprecia que La gasolina es el principal responsable por las emisiones de gases como CO, SOX y VOC, con el 94%, 93% y 94% respectivamente. El diésel es el principal aportante de NOX y PM2.5 con el 63% y el 90% de las emisiones de estos contaminantes. El GNV por su parte hace una contribución principal a las emisiones de CO con el 4% y en un 2% al NOX, sin contar las emisiones de metano. Adaptado de *Actualización Inventario de Emisiones Atmosféricas del Valle de Aburrá - 2018* (ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ, 2018).

El Acelerado crecimiento urbano, en donde los casi 4 millones de habitantes que tiene el Área Metropolitana están ubicados en 1.157 kilómetros cuadrados, lo que quiere decir que el 58,5% de la población del departamento de Antioquia está ubicada en el 1,8% del área total, hace que año tras año, así como en distintos puntos de la Tierra, aumentan los habitantes en las ciudades, el consumo y, por lo tanto, la contaminación de la mano del incremento del parque automotor. En la figura 14 se muestra el aumento de los vehículos, que del año 2005 a 2015 aumentó un 180% y que de 2015 a 2018 aumentó en un 22% (AMVA, 2022). Lo que trae consigo la presencia en mayor medida de material contaminante que afecta directamente la calidad del aire del Valle de Aburrá y por ende, del Barrio Belén.

**Figura 14**

*Incremento del Parque Automotor entre 2005 – 2018 en el Valle de Aburrá*

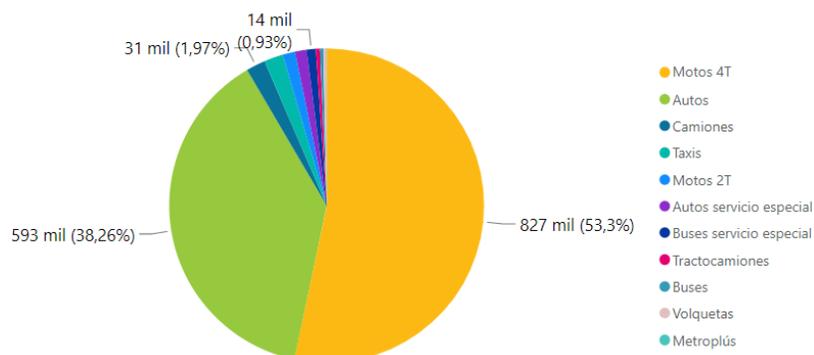


*Nota.* En la figura se representa el incremento del parque automotor en el Valle de Aburrá, entre los años 2005 a 2018, cabe resaltar que el 94% de estos vehículos representan los autos y motos matriculados en el Valle de Aburrá. Adaptado de *Calidad del aire - AMVA* (AMVA, 2022).

Sumado a lo anterior, en la figura 15 se muestra la distribución de los vehículos para el año 2018, en cuando a cantidad y porcentaje, segmentados correspondiente a su categorización

**Figura 15**

*Distribución de los Autos para el año 2018, según la categoría.*

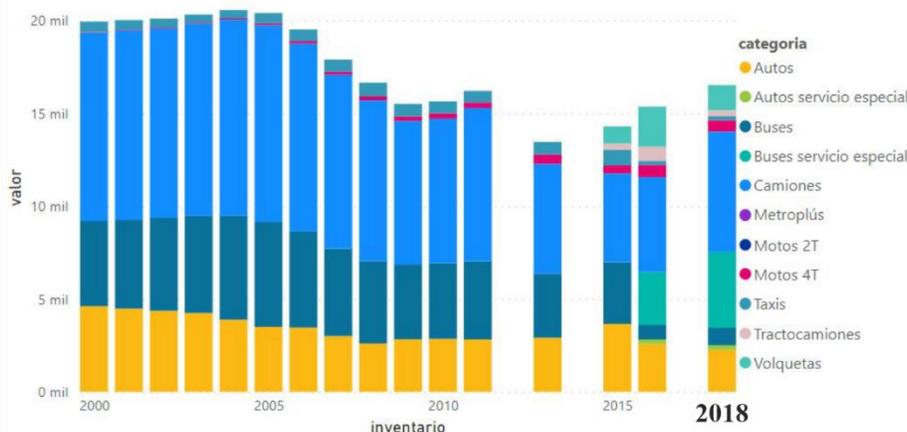


*Nota.* En la figura se expone la distribución de los autos para el año 2018, se divide por categoría y el porcentaje que aporta a la totalidad el parque automotor. Adaptado de *Modelo del Emisiones Atmosféricas del Valle de Aburrá - MODEAM* (Área Metropolitana del Valle de Aburrá - AMVA, 2018).

**6.1.3.1 Los Óxidos de Nitrógeno (NOx).** La suma entre el Dióxido de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>) y el Óxido de Nitrógeno (NO) se conoce como los Óxidos de Nitrógeno (NO<sub>x</sub>), ambas moléculas forman juntas una familia química. El NO es el óxido de nitrógeno que más se forma durante los procesos de combustión, mientras que el NO<sub>2</sub> es emitido en pequeñas cantidades (Universidad EAFIT, 2018). En la figura 16 se compara las concentraciones de NO<sub>x</sub> y su evolución durante 18 años, del año 2000 a 2018 y los vehículos que emiten estos contaminantes con su porcentaje de contribución.

**Figura 16**

*Evolución de las emisiones de NOx*



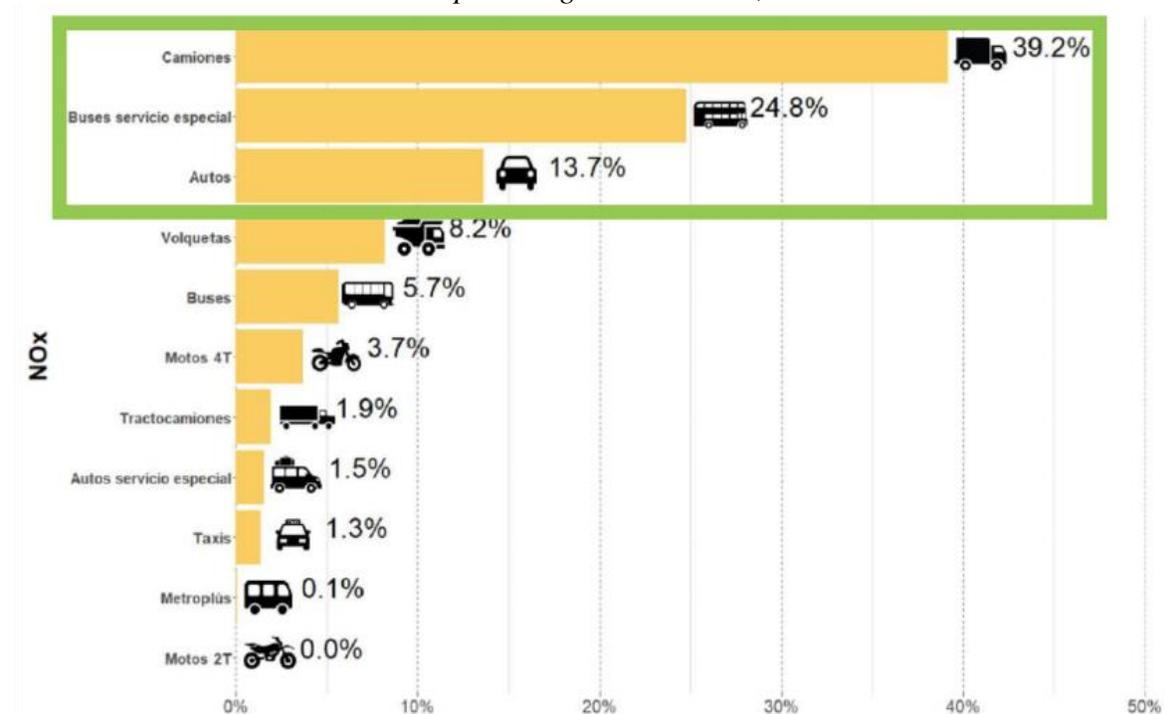
*Nota.* En la figura se expone la evolución de las emisiones de Óxidos de Nitrógeno NO<sub>x</sub>. Adaptado de *Modelo del Emisiones Atmosféricas del Valle de Aburrá - MODEAM* (Área Metropolitana del Valle de Aburrá - AMVA, 2018).

El combustible Diesel es el principal aportante de NO<sub>x</sub> con el 63% de las emisiones

de estos contaminantes (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2018). En la figura 17 se especifica la distribución de emisiones con respecto a los vehículos que las generan y se resalta que los camiones, buses especiales y los autos quienes producen el 77.7% de NOx, todo esto teniendo en cuenta que las emisiones están asociadas mayoritariamente a las fuentes móviles.

**Figura 17**

*Distribución de emisiones de NOx por categoría vehicular, año 2018.*

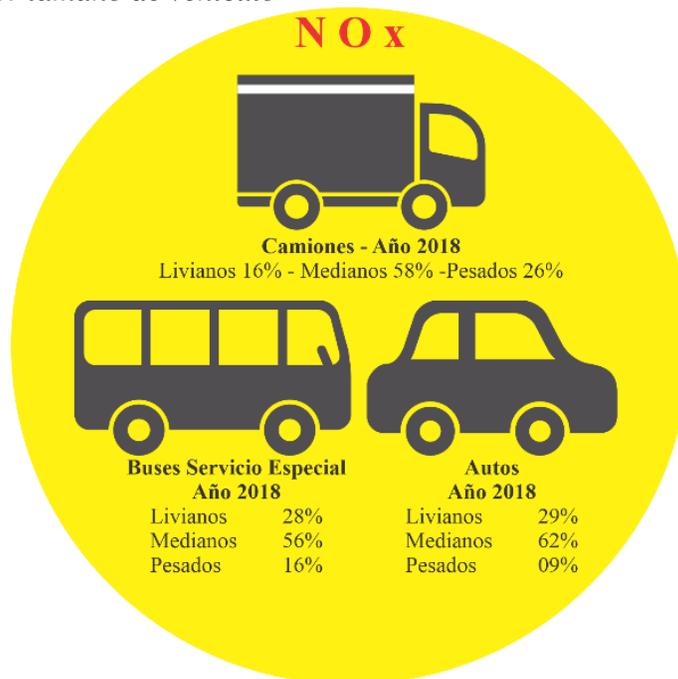


*Nota.* En la figura se muestra la distribución de las emisiones de NOx por categoría vehicular para el año 2018, cabe resalta que los buses de servicio especial y los autos son las mayores fuentes de NOx, generando el 77.7%. Adaptado del *informe anual de calidad del aire año 2018* (Universidad EAFIT, 2018).

Tomando los tres vehículos que generan el 77.7% de las emisiones de NOx, a continuación, en la figura 18 se exponen el porcentaje de aporte a la generación de contaminantes con respecto al tamaño del vehículo, donde resalta el hecho de que, en Camiones, Buses de servicio especial y autos, los vehículos que más generan son los medianos.

## Figura 18

Fuentes de NOx por tamaño de vehículo



*Nota.* En la figura se presentan la distribución de aporte a las emisiones de NOx para el año 2018, con respecto al tipo y tamaño de los vehículos que generan la mayor cantidad de afectaciones a la calidad del aire. Adaptado de *Modelo del Emisiones Atmosféricas del Valle de Aburrá - MODEAM* (Área Metropolitana del Valle de Aburrá - AMVA, 2018).

La Red de Calidad del Aire contó con 7 estaciones de monitoreo automático de NOx, NO2 y NO durante el año 2021. El seguimiento de este contaminante se hizo en 4 de los 10 municipios del área metropolitana del Valle de Aburrá.

En la figura 19 se presenta las estaciones de monitoreo de la red de medición SIATA que generan información con respecto al NOx y están dentro del área de influencia del barrio Belén, en donde el # 4 es la estación Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid (MED-PJIC), que queda a 3,74 km del parque de Belén.

**Figura 19**

*Estaciones de monitoreo NOx del SIATA dentro del área de influencia del barrio Belén*

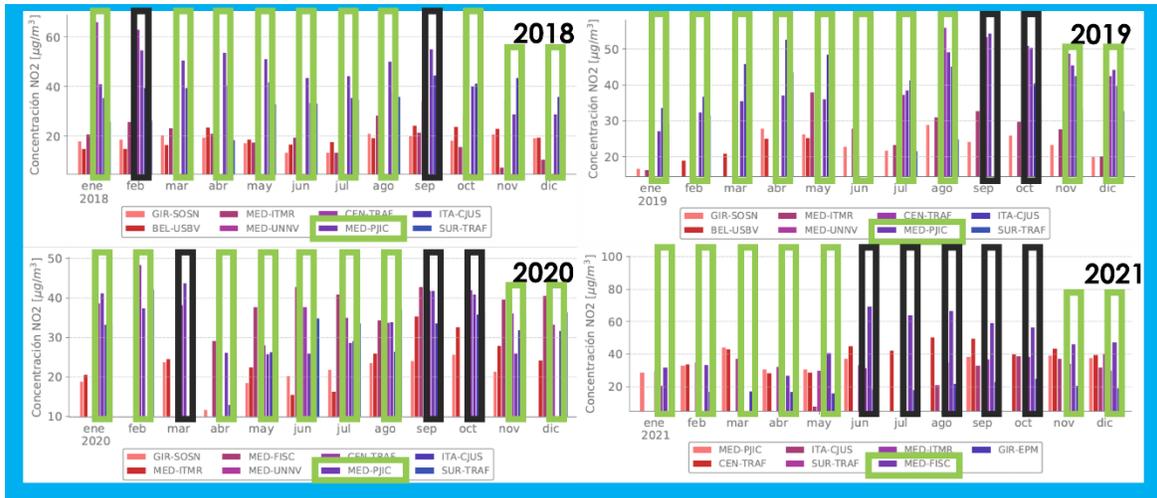


*Nota. En la figura se describen las estaciones de medición de NOx de la red SIATA, dentro del perímetro escogido para toma la de información de calidad del aire. Adaptado de la página web SIATA (SIATA, 2022).*

Tomando datos arrojados por el SIATA, según el monitoreo que realizó la estación Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid (MED-PJIC), durante los años 2018 a 2021. En la figura 20 se resaltan los picos de concentración de Dióxido de Nitrógeno NO<sub>2</sub> y que se evidencia que el punto de mayor presencia de este contaminante fue en el mes de septiembre.

**Figura 20**

*Ciclo anual de la concentración de Dióxidos de Nitrógeno - NO<sub>2</sub> en el periodo de los años 2018 a 2021*

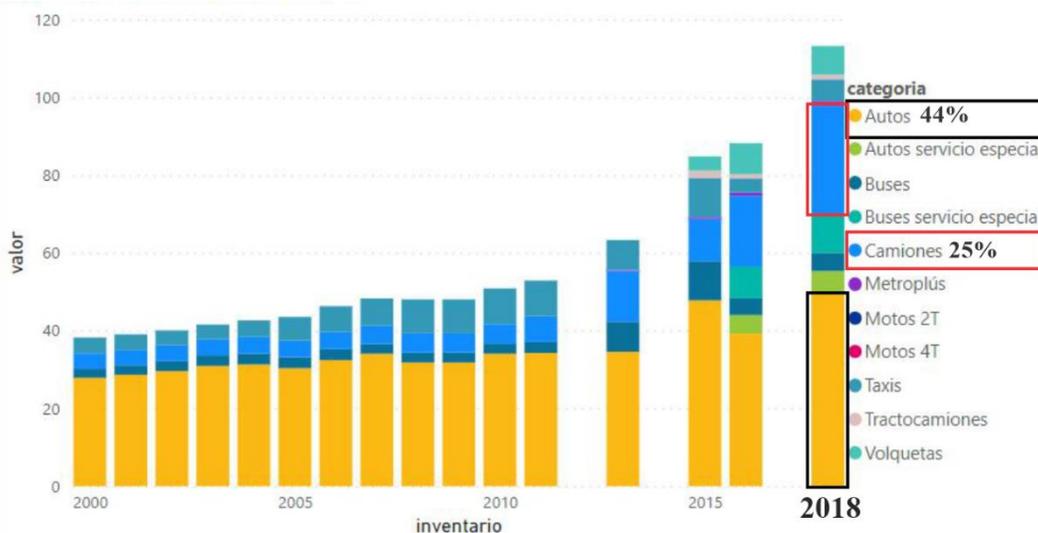


*Nota.* En la figura se compara el comportamiento del NO<sub>2</sub> para el periodo del año 2018 a 2021, describiendo la estación de medición de la red SIATA que se encuentra dentro del perímetro escogido para toma la de información de calidad del aire. Adaptado de *los informes anuales de calidad del aire de los años 2018* (Universidad EAFIT, 2018), *2019* (Universidad EAFIT, 2019), *2020* (Universidad EAFIT, 2020) y *2021* (Universidad EAFIT, 2021).

En la figura 21 se resalta la evolución de las emisiones de NO<sub>2</sub> y se resalta que el 69% del total de las emisiones para el año 2018, provenientes de fuentes fijas corresponden a 2 tipos de vehículos, los autos con un 44% y los camiones con el 25%.

**Figura 21**

*Evolución de las emisiones de NO<sub>2</sub>*



*Nota.* En la figura se expone la evolución de las emisiones de NO<sub>2</sub> durante los años 2000 a 2018, se resalta que los camiones y los autos emiten el 69% del total de emisiones. Adaptado de *Modelo del Emisiones Atmosféricas del Valle de Aburrá - MODEAM* (Área Metropolitana del Valle de Aburrá - AMVA, 2018).

Tomando los dos vehículos que generan el 69% de las emisiones de NO<sub>2</sub>, a continuación, en la figura 22 se exponen el porcentaje de aporte a la generación de contaminantes con respecto al tamaño del vehículo, donde resalta el hecho de que, en Autos y Camiones, los vehículos que más generan son los medianos.

### Figura 22

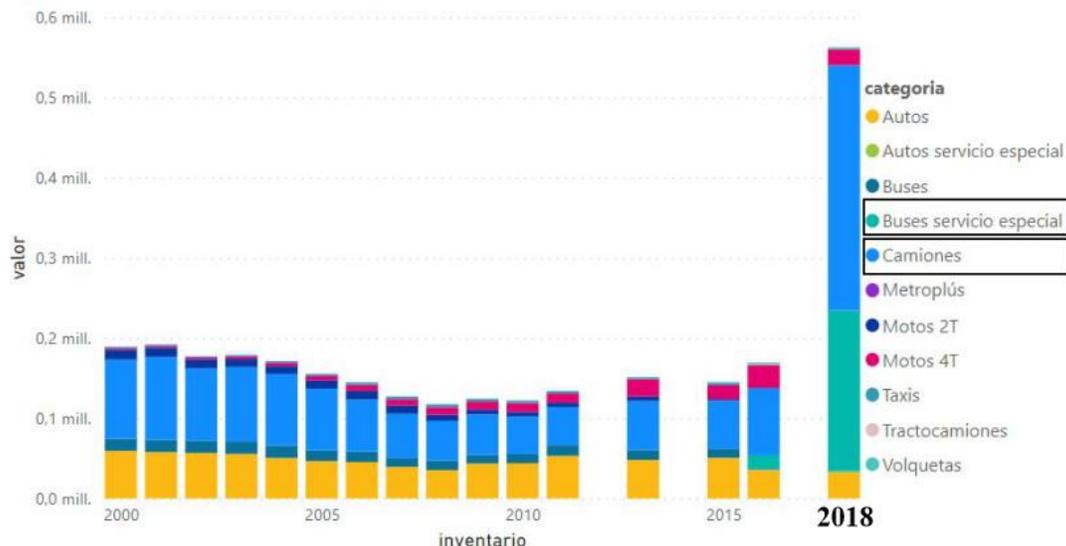
*Fuentes de NO<sub>2</sub> por tamaño de vehículo*



*Nota.* En la figura se presentan la distribución de aporte a las emisiones de NO<sub>2</sub> para el año 2018, con respecto al tipo y tamaño de los vehículos que generan la mayor cantidad de afectaciones a la calidad del aire. Adaptado de *Modelo del Emisiones Atmosféricas del Valle de Aburrá - MODEAM* (Área Metropolitana del Valle de Aburrá - AMVA, 2018).

**6.1.3.2 Monóxido de Carbono (CO).** El CO es un contaminante criterio monitoreado por la Red de Calidad del Aire del Valle de Aburra. Sus principales fuentes emisoras provienen de la quema de combustible fósil como la gasolina o el petróleo (Universidad EAFIT, 2021). En la figura 23 se resalta la evolución de las emisiones de CO y se resalta que la mayor parte de las emisiones para el año 2018, provenientes de fuentes fijas corresponden a 2 tipos de vehículos, los Buses de servicio especial y los Camiones.

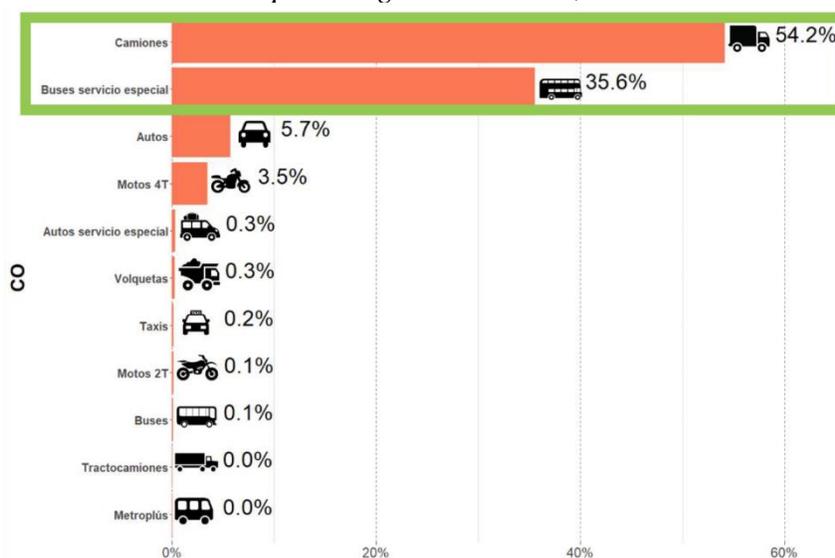
**Figura 23**  
Evolución de las emisiones de CO



*Nota.* Los Dióxidos de nitrógeno son emitidos principalmente por fuentes móviles y así mismo, los camiones y los autos emiten el 69% del total de emisiones. Adaptado de Modelo del Emisiones Atmosféricas del Valle de Aburrá - MODEAM (Área Metropolitana del Valle de Aburrá - AMVA, 2018).

En la figura 24 se especifica la distribución de emisiones con respecto a los vehículos que las generan y se resalta que los camiones con un 54.2% y los buses de servicio especial con un 35.6%, son quienes producen el 89.8% de NO<sub>x</sub>, todo esto teniendo en cuenta que las emisiones de este tipo están asociadas mayoritariamente a las fuentes móviles.

**Figura 24**  
Distribución de emisiones de CO por categoría vehicular, año 2018.

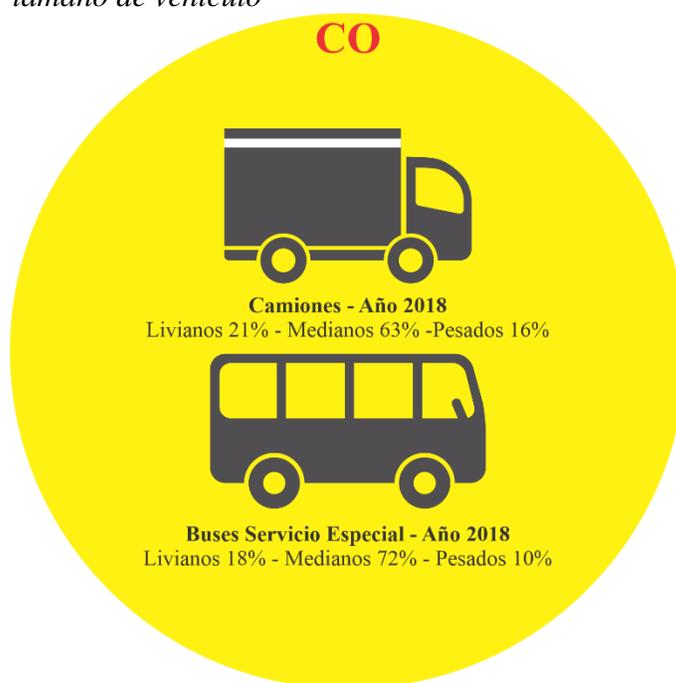


*Nota.* En la figura se muestra la distribución de las emisiones de CO por categoría vehicular para el año 2018, es notorio que los camiones y buses especiales son las mayores fuentes de CO, producen el 89.8%. Adaptado del *informe anual de calidad del aire año 2018* (Universidad EAFIT, 2018).

En los dos vehículos que generan el 89.8% de las emisiones de CO, y analizando la información obtenida del MODEAM para el año 2018, a continuación, en la figura 25 se exponen los porcentajes de aporte a la generación de contaminantes con respecto al tamaño del vehículo, donde resalta el hecho de que, en camiones y buses de servicios especial, los vehículos que más generan emisiones son los medianos.

### Figura 25

*Fuentes de CO por tamaño de vehículo*



*Nota.* En la figura se presentan la distribución de aporte a las emisiones de CO para el año 2018, con respecto al tipo y tamaño de los vehículos que generan la mayor cantidad de afectaciones a la calidad del aire. Adaptado de *Modelo del Emisiones Atmosféricas del Valle de Aburrá - MODEAM* (Área Metropolitana del Valle de Aburrá - AMVA, 2018).

Según los datos obtenidos del SIATA, correspondientes al monitoreo que realizó la estación Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid (MED-PJIC), durante los años 2018 a 2021. En la figura 26 se resaltan los picos de concentración de Monóxido de Carbono CO y se resalta dos temporadas de mayor concentración de contaminantes que corresponden a las temporadas transición entre la temporada seca y la primera temporada de lluvias, en donde en este caso, a mitad de cada semestre se presentan las épocas de contingencia ambiental.

**Figura 26**

*Ciclo anual de la concentración de Monóxido de Carbono - CO en el periodo de los años 2018 a 2021*

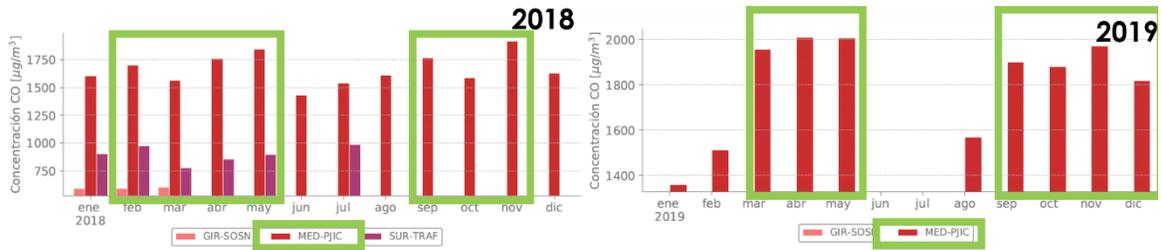


Figura 7.9: Ciclo Anual de CO para el año 2020 en las estaciones de la REDMCA.

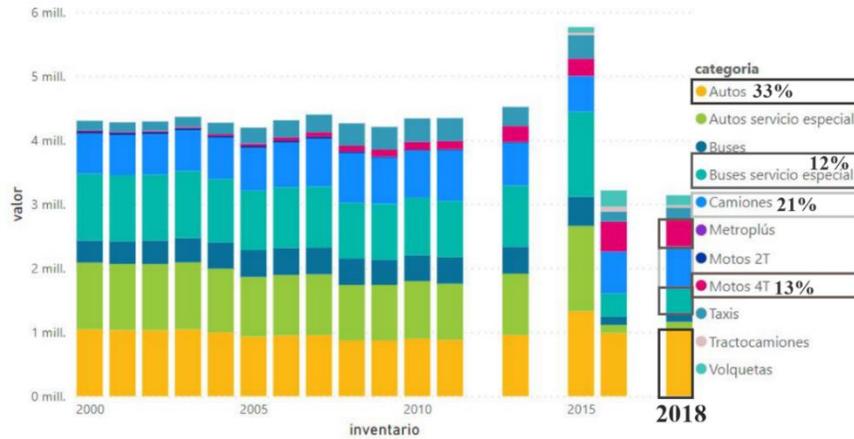


Figura 8.3: Ciclo Anual de CO para el año 2021 en las estaciones de la REDMCA.

*Nota.* En la figura se compara el comportamiento del NO<sub>2</sub> para el periodo del año 2018 a 2021cuatro, describiendo la estación de medición de la red SIATA que se encuentra dentro del perímetro escogido para toma la de información de calidad del aire. Adaptado de *los informes anuales de calidad del aire de los años 2018* (Universidad EAFIT, 2018), *2019* (Universidad EAFIT, 2019), *2020* (Universidad EAFIT, 2020) y *2021* (Universidad EAFIT, 2021)

**6.1.3.3 Dióxido de Carbono - CO<sub>2</sub>.** En el inventario de emisiones de Gases de Efecto Invernadero – GEI, se estiman los gases que tienen potencial de aumentar la temperatura global. De las actividades humanas, el gas más común es el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), que resulta de la quema de combustibles fósiles (petróleo, gas y carbón), utilizados en los vehículos motorizados, en la generación de energía y en la agricultura, entre otros (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2019). Para estos GEI, Medellín es el principal emisor de CO<sub>2</sub>, con un aporte promedio del 38% seguido por Itagüí con un 26%, mostrando adicionalmente una emisión por parte de Girardota del 10% (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2019). Esta situación llama la atención para analizar el comportamiento de las fuentes de emisiones. En la figura 27 se expone la evolución de las emisiones de CO<sub>2</sub> y se resalta que 79% de la generación de CO<sub>2</sub> se concentran en 4 tipos de vehículos, Autos, Camiones, Motos 4T y Buses de servicio especial.

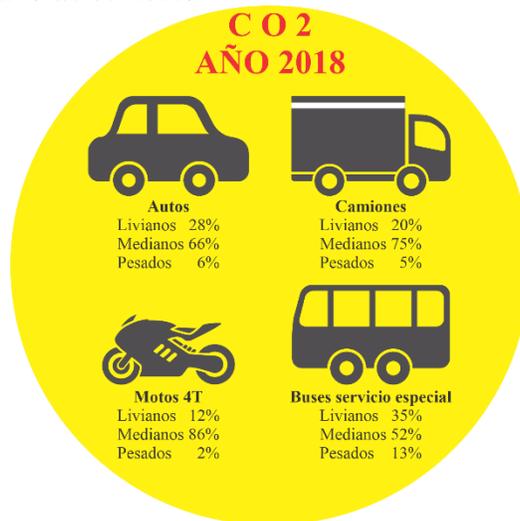
**Figura 27**  
Evolución de las emisiones de CO2



*Nota.* Los Dióxidos de Carbono son emitidos principalmente por fuentes móviles y su evolución desde 2000 a 2018, evidencia una disminución, sin embargo, para el año 2018, estos contaminantes son producidos principalmente por los Autos en un 33%, Camiones 21%, Motos 4T 13% y Buses de servicio especial con un 12%, quienes producen en total generan el 79% de CO2 presente en el aire del Valle de Aburrá. Adaptado de *Modelo del Emisiones Atmosféricas del Valle de Aburrá - MODEAM* (Área Metropolitana del Valle de Aburrá - AMVA, 2018)

Teniendo en cuenta los cuatro vehículos que generan el 79% de las emisiones de CO2, y analizando la información obtenida del MODEAM para el año 2018, a continuación, en la figura 28 se exponen los porcentajes de aporte a la generación de contaminantes con respecto al tamaño del vehículo, donde resalta el hecho de que, en Autos, Camiones, Motos 4T y Buses de servicio especial, los vehículos que más generan emisiones son los medianos.

**Figura 28**  
Fuentes de CO2 por tamaño de vehículo

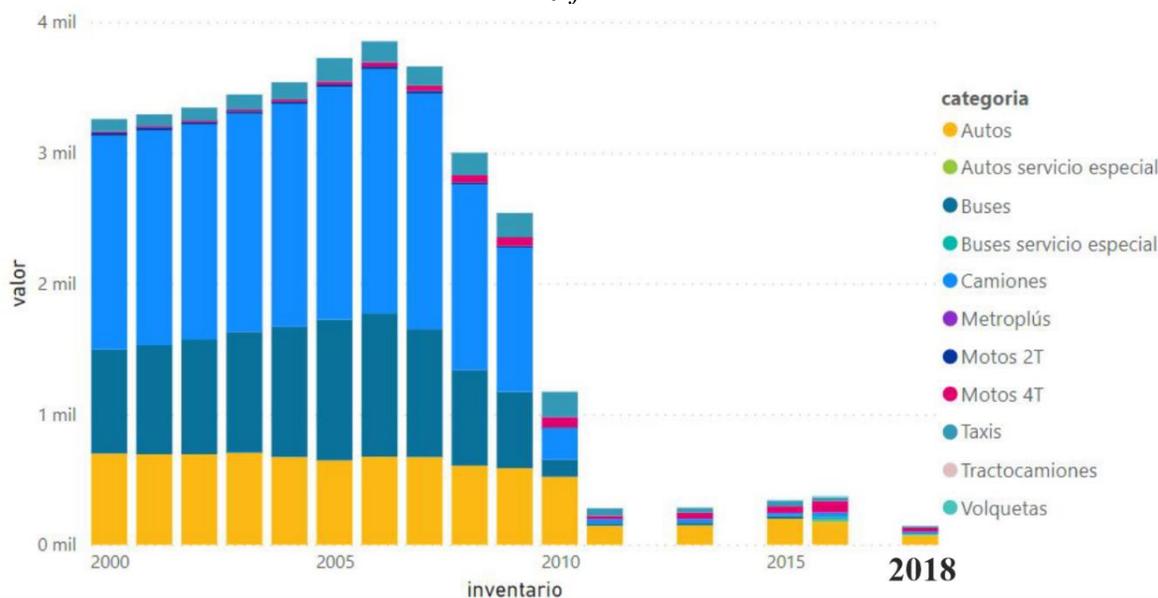


*Nota.* En la figura se presentan la distribución de aporte a las emisiones de CO<sub>2</sub> para el año 2018, con respecto al tipo y tamaño de los vehículos que generan la mayor cantidad de afectaciones a la calidad del aire. Adaptado de *Modelo del Emisiones Atmosféricas del Valle de Aburrá - MODEAM* (Área Metropolitana del Valle de Aburrá - AMVA, 2018).

**6.1.3.4 Dióxido de Azufre - SO<sub>2</sub>.** El SO<sub>2</sub> es uno de los contaminantes criterios medidos por la Red de Calidad del aire del Valle de Aburrá, y sus fuentes de emisión se atribuyen principalmente a los procesos de combustión del petróleo, el diésel, el carbono y el gas natural, los cuales tienen azufre entre sus componentes. Adicionalmente, el SO<sub>2</sub> es un gas precursor responsable de la formación de PM<sub>2.5</sub> secundario (Universidad EAFIT, 2019). En la figura 29 se evidencia la evolución de las emisiones de estas emisiones desde el año 2000 hasta el año 2018 y es notable la disminución de la generación y concentración provienen de fuentes móviles para este contaminante en el Valle de Aburrá.

**Figura 29**

*Evolución de las emisiones de Óxidos de Azufre - SO<sub>2</sub> desde el año 2000 al 2018.*

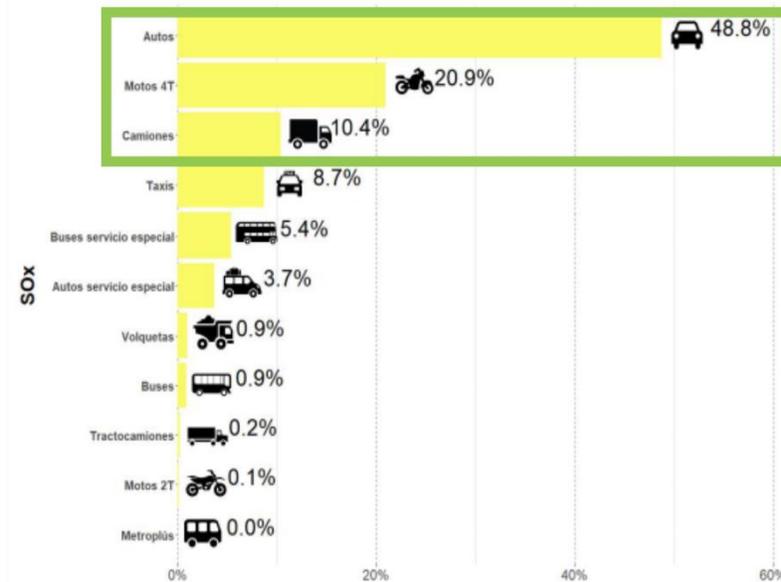


*Nota.* Es notable la disminución de SO<sub>2</sub> en el Valle de Aburrá, lo cual es aliciente para trabajar en beneficio de adaptar las medidas regulatorias a otros contaminantes a fin de conseguir resultados similares. Adaptado de *Modelo del Emisiones Atmosféricas del Valle de Aburrá - MODEAM* (Área Metropolitana del Valle de Aburrá - AMVA, 2018).

En la figura 30 se especifica la distribución de emisiones con respecto a los vehículos que las generan y se resalta que los autos con un 48.8%, las 4T 20.9% y los Camiones 10.4%, son quienes producen el 80.1% de Sox.

**Figura 30**

*Distribución de emisiones de SOx por categoría vehicular, año 2018.*

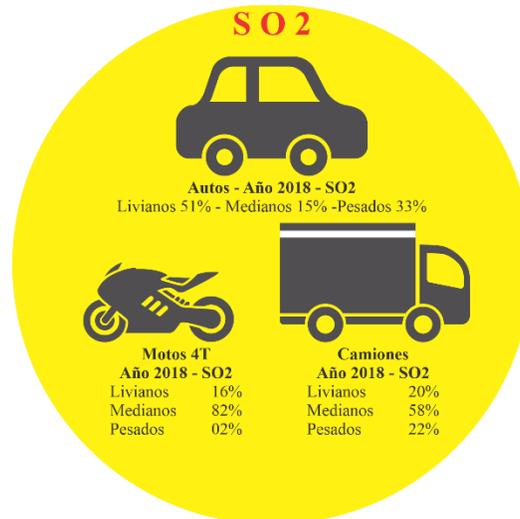


*Nota.* En la figura se muestra la distribución de las emisiones de SO<sub>2</sub> por categoría vehicular para el año 2018, es notorio la concentración del 80.1% provenientes de tres vehículos. Adaptado del *informe anual de calidad del aire año 2018* (Universidad EAFIT, 2018).

En la figura 31 se aprecia en detalle el tipo y tamaño de vehículos que generan la mayor cantidad de emisiones de SO<sub>2</sub> en el Valle de Aburrá, lo cual indica claramente que las medidas frente a la generación y concentración de este contaminante deben estar dirigidas a estos tipos de vehículos, teniendo en cuenta que lo de tamaño mediano son a los que se les debe tener especial atención.

**Figura 31**

*Fuentes de SO<sub>2</sub> por tamaño de vehículo*



*Nota.* En la figura se presentan la distribución de aporte a las emisiones de SO<sub>2</sub> para el año 2018, con respecto al tipo y tamaño de los vehículos que generan la mayor cantidad de afectaciones a la calidad del aire. Adaptado de *Modelo del Emisiones Atmosféricas del Valle de Aburrá - MODEAM* (Área Metropolitana del Valle de Aburrá - AMVA, 2018).

En la figura 32 se presenta las estaciones de monitoreo de la red de medición SIATA que generan información con respecto al SO<sub>2</sub> y están dentro del área de influencia del barrio Belén, en donde el # 9 es la Estación Tráfico Centro (MED-TRAF), que queda a 3,35 km del parque de belén.

**Figura 32**

*Estaciones de monitoreo SO<sub>2</sub> del SIATA dentro del área de influencia del barrio Belén*



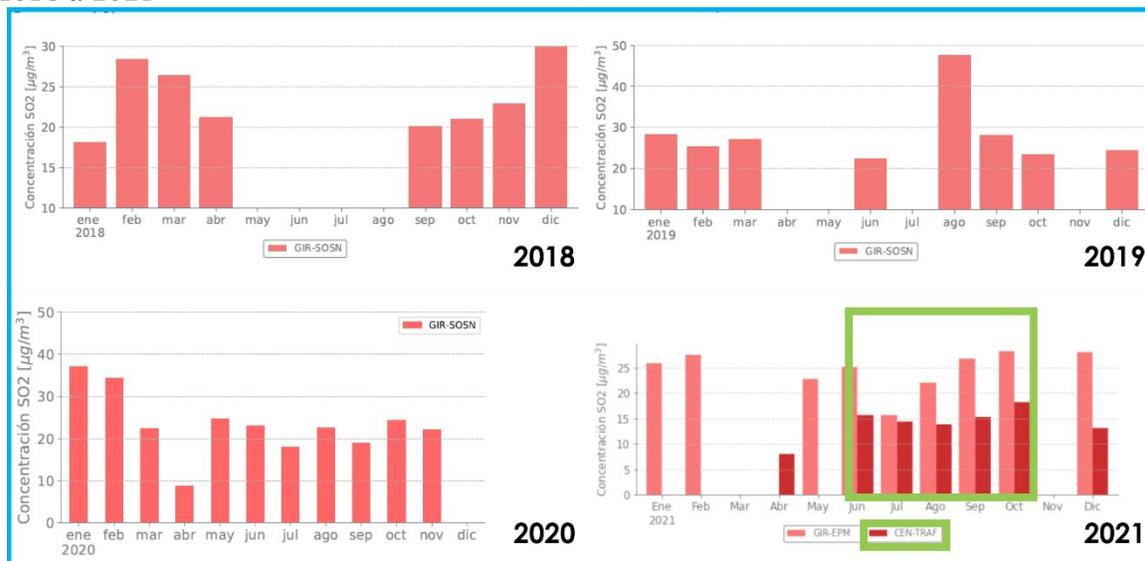
*Nota.* En la figura se describen las estaciones de medición de SO<sub>2</sub> de la red SIATA, dentro del perímetro escogido para toma la de información de calidad del aire. Adaptado de la *página web SIATA* (SIATA, 2022).

En la Figura 33 se aprecia el ciclo de concentraciones de Dióxido de Azufre SO<sub>2</sub>, desde el año 2018 a2021, monitoreado por la estación la estación Tráfico Centro (MED-

TRAF), perteneciente a la Red de Monitoreo de Calidad de Aire del SIATA, y quien reporta índices de concentración de So2 solo para el año 2021 y en él se observa que el pico de presencia de So2 se presenta en el periodo de junio a octubre.

**Figura 33**

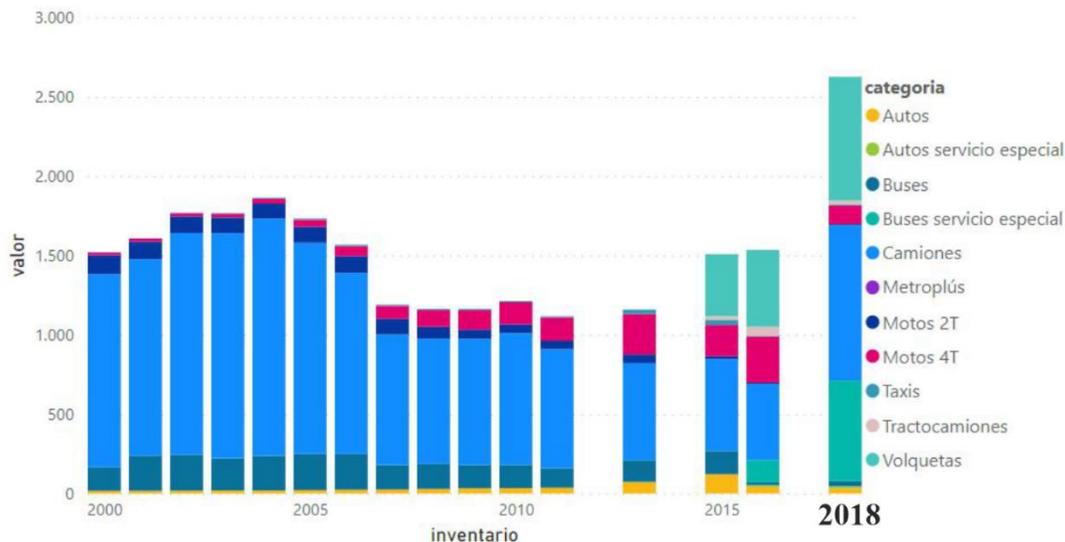
*Ciclo anual de la concentración de Dióxidos de Nitrógeno - SO2 en el periodo de los años 2018 a 2021*



*Nota.* En la figura se expone la información respecto al comportamiento del SO2 desde la estación automática de monitoreo de la calidad del aire, en donde solo ha tomado lectura del año 2021, pero que sirve para apreciar que los picos de concentración de este contaminante se presentaron de junio a octubre de 2021. Adaptado de los informes anuales de calidad del aire de los años 2018 (Universidad EAFIT, 2018), 2019 (Universidad EAFIT, 2019), 2020 (Universidad EAFIT, 2020) y 2021 (Universidad EAFIT, 2021).

**6.1.3.5 Material Particulado PM2.5.** El Material Particulado menor a 2.5 µm (PM2.5) es uno de los contaminantes criterio que tienen más impacto en la calidad del aire de la región metropolitana, además de ser uno de los más perjudiciales para la salud de las personas, debido a su capacidad para penetrar en las regiones más profundas del sistema respiratorio (Universidad EAFIT, 2021). En la figura 34 se evidencia que la evolución de la presencia y concentración de PM2.5 en el Valle de Aburrá ha ido desde el año 2000 hasta el año 2018, donde se aprecia un aumento significativo, lo cual está asociado a fuentes móviles, a la cantidad y tipo de vehículo que genera estas emisiones.

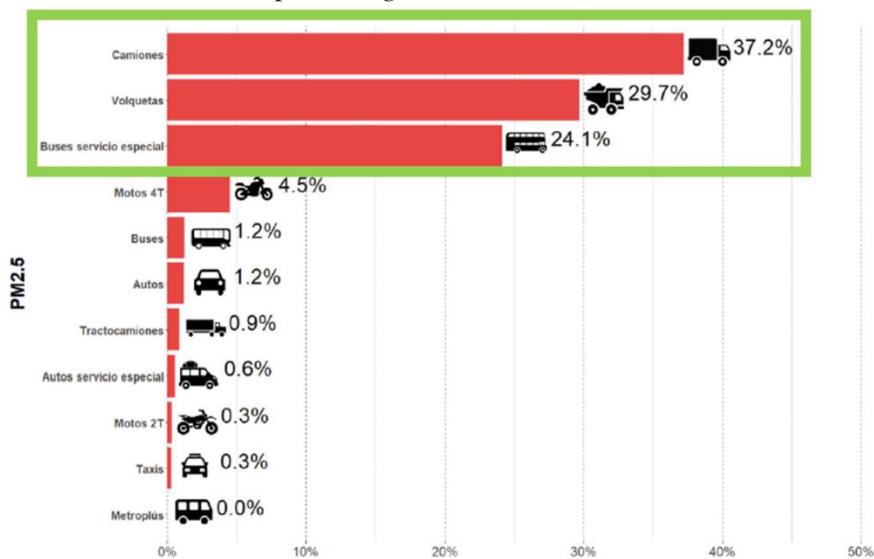
**Figura 34**  
Evolución de las emisiones de PM2.5



*Nota.* Es notable el aumento de PM2.5 en el Valle de Aburrá, lo que indica la curva ascendente asociada al parque automotor como fuente de estas emisiones. Adaptado de *Modelo de Emisiones Atmosféricas del Valle de Aburrá - MODEAM* (Área Metropolitana del Valle de Aburrá - AMVA, 2018).

En la figura 35 se especifica la distribución de emisiones con respecto a los vehículos que las generan y se resalta que los camiones, las volquetas y los buses de servicio especial, los mayores emisores de material particulado fino PM2.5 del Valle de Aburrá, estos tres son los responsables del 91% de la generación de este contaminante.

**Figura 35**  
Distribución de emisiones de PM2.5 por categoría vehicular, año 2018.

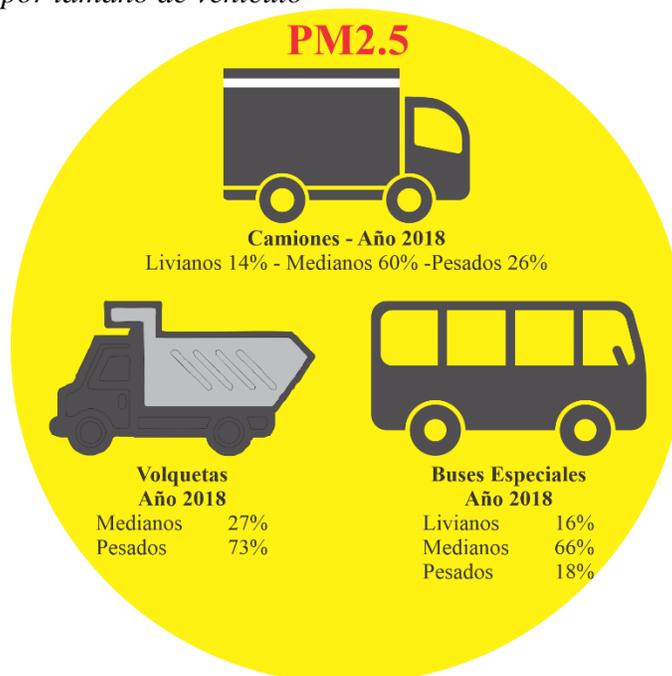


*Nota.* En la figura se observa que para el año 2018, los camiones con 37.2%, las volquetas con 29.7% y los buses de servicio especial, los mayores emisores de material particulado fino PM2.5; estas tres fuentes son las responsables del 91% del total de estas emisiones de PM2.5 presentes en el Valle de Aburrá y registradas por las estaciones de monitoreo del SIATA, así mismo, es importante tener en cuenta el Combustible Diesel es el principal aportante de PM2.5 con el 90% de las emisiones de estos contaminantes(Universidad EAFIT, 2018).

En la figura 36 se aprecia en detalle el tipo y tamaño de vehículos que generan la mayor cantidad de emisiones de Pm2.5 en el Valle de Aburrá, lo cual indica claramente que las medidas frente a la generación y concentración de este contaminante deben estar dirigidas a estos tipos de vehículos, teniendo en cuenta que lo de tamaño mediano, en el caso de camiones y buses de servicio especial, en volquetas los pesados, son a los que se les debe tener especial atención.

**Figura 36**

*Fuentes de PM2.5 por tamaño de vehículo*



*Nota.* En la figura se presentan la distribución de aporte a las emisiones de PM2.5 para el año 2018, con respecto al tipo y tamaño de los vehículos que generan la mayor cantidad de afectaciones a la calidad del aire, cabe resaltar que, en camiones y buses de servicio especial, la mayor generación de este material particulado las produce los vehículos medianos, mientras que en las volquetas, son los vehículos pesados. Adaptado de *Modelo del Emisiones Atmosféricas del Valle de Aburrá - MODEAM* (Área Metropolitana del Valle de Aburrá - AMVA, 2018).

En la figura 37 se presenta las estaciones de monitoreo de la red de medición SIATA que generan información con respecto al PM2.5 y están dentro del área de influencia del

barrio Belén, en donde el # 5 es la Estación I.E. Pedro Octavio Amado, que queda a 1,94 km del parque de belén y el #7 corresponde a la Estación I.E Pedro Justo Berrio, que está situada a 1,69 km del parque de Belén.

**Figura 37**

*Estaciones de monitoreo PM2.5 del SIATA dentro del área de influencia del barrio Belén*

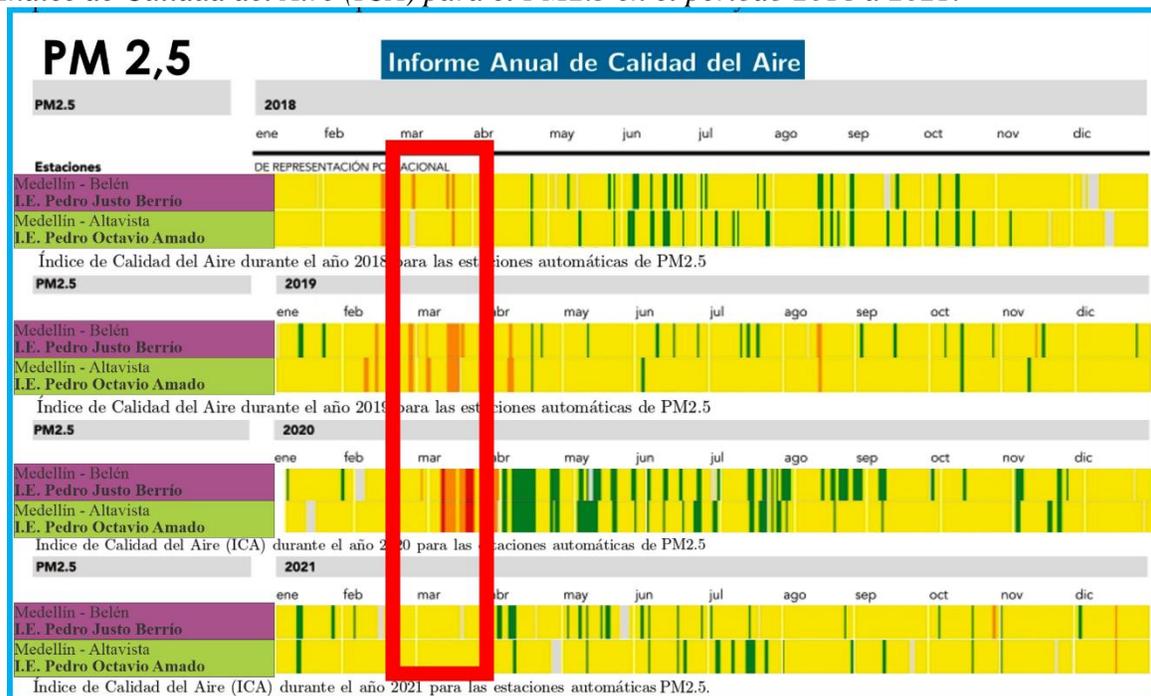


*Nota.* En la figura se describen las estaciones de medición de PM2.5 de la red SIATA, dentro del perímetro escogido para toma la de información de calidad del aire. Adaptado de la página web SIATA (SIATA, 2022).

Tomando datos arrojados por el SIATA, según el monitoreo que realizó las estaciones I.E. Pedro Octavio Amado y I.E Pedro Justo Berrio, se expone en la figura 38 el Índice de Calidad del Aire (ICA) para el PM2.5 en el periodo 2018 a 2021, en donde se resaltan los meses de marzo y abril como picos de mayor concentración de PM2.5 y que se evidencia que en el año 2020 fue el punto de mayor presencia de este contaminante durante estos cuatro años.

**Figura 38**

*Índice de Calidad del Aire (ICA) para el PM2.5 en el periodo 2018 a 2021.*



*Nota.* En la figura se compara el comportamiento del PM2.5 para el periodo comprendido entre año 2018 a 2021, describiendo las estaciones de monitoreo del SIATA que se encuentra dentro del perímetro escogido para toma la de información de calidad del aire y señalando a al mes de marzo y parte de abril como la época de mayor presencia de este contaminante. Adaptado de *los informes anuales de calidad del aire de los años 2018* (Universidad EAFIT, 2018), *2019* (Universidad EAFIT, 2019), *2020* (Universidad EAFIT, 2020) y *2021* (Universidad EAFIT, 2021)

**6.1.3.6 Emisión de contaminantes por vehículos.** En conclusión, el contenido analizado con respecto a las fuentes móviles y a los vehículos responsables de la mayor producción de contaminantes se expone en la figura 39 el resumen de fuentes y el tipo de contaminante que generaron en el año 2018.

**Figura 39**

*Fuentes Móviles, Vehículos en donde se concentra la mayor contaminación del aire en el Valle de Aburrá durante el año 2018.*

<b>Fuentes Móviles</b>							
EMISIONES FUENTES	NO <sub>x</sub>	NO <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	PM <sub>2.5</sub>	
Camiones	39.2%	25.0%	54.2%	21.0%	10.4%	37.2%	
Buses servicio especial	24.8%		35.6%	12.0%		24.1%	
Autos	13.7%	44.0%		33.0%	48.8%		
Motos 4T				13.0%	20.9%		
Volquetas						29.7%	
<b>TOTAL</b>	<b>77.7%</b>	<b>69.0%</b>	<b>89.8%</b>	<b>79.0%</b>	<b>80.1%</b>	<b>91.0%</b>	

*Nota.* En la figura se presentan el resumen de la distribución, en cuanto al aporte a las emisiones de PM<sub>2.5</sub> para el año 2018, con respecto al tipo de vehículos que generaron la mayor cantidad de afectaciones a la calidad del aire. Adaptado de *Modelo del Emisiones Atmosféricas del Valle de Aburrá - MODEAM* (Área Metropolitana del Valle de Aburrá - AMVA, 2018).

## **6.2 Análisis de medidas existentes para contrarrestar los periodos críticos de deterioro de la calidad del aire en el barrio Belén de la ciudad de Medellín, Colombia**

### **6.2.1 Extensión de Pico y Placa para los Buses de Servicio Especial**

Teniendo en cuenta que los buses de servicio especial son fuente de emisiones de NO<sub>x</sub>, CO, CO<sub>2</sub> y PM<sub>2.5</sub>, estos deben ser cobijados, de manera diferenciada, con la medida del Pico y Placa.

### **6.2.2 Aumento de la cantidad de buses eléctricos**

Para abril de 2022, en Medellín circulaban 65 buses 100 % eléctricos, de los cuales 25 pertenecían a la Línea 2 de Metroplús, iniciativa que buscó reducir las concentraciones de contaminantes en la atmósfera al disminuir las emisiones del transporte para así mejorar la calidad del aire y la salud de las personas (Alcaldía de Medellín, 2022).

### 6.2.3 Planes de Movilidad Empresarial Sostenible, Planes MES

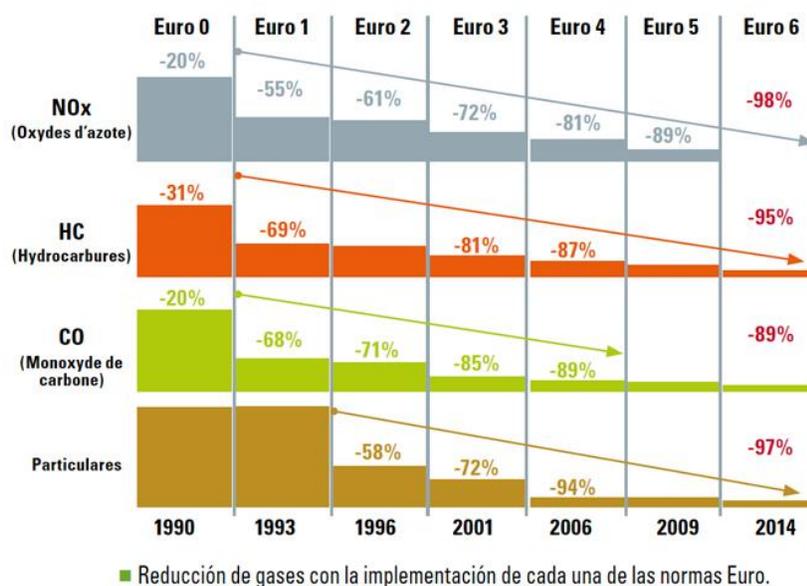
En la Resolución Metropolitana 1379 de 2017 se proponen las estrategias gestión organizacional que contribuya a disminuir la emisión de agentes contaminantes y gases de efecto invernadero mediante la transformación cultural de los colaboradores al llevar a la reflexión sobre el impacto que tienen sus desplazamientos desde y hacia el trabajo (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2019). Sin embargo, estas disposiciones aplican se deben ampliar a empresas medianas, de 50 empleados en adelante, con el fin de que se la formulación de los planes MES sea más fuerte el impacto en la reducción de CO<sub>2</sub> y PM<sub>2.5</sub>

### 6.2.4 Transición tecnológica a vehículos eléctricos y alineación a las normas EURO reducción de contaminantes

Esta transición hacia una movilidad eléctrica genera beneficios para los usuarios del servicio de transporte y para la ciudad, los buses eléctricos disminuyen considerablemente las emisiones atmosféricas y el ruido en la operación (Alcaldía de Medellín, 2022). De igual manera cabe resaltar que las normas EURO para el control de emisiones contaminantes que se aplican en la Unión Europea desde 1988 con el objetivo de regular los límites máximos de emisiones contaminantes de los vehículos (gasolina, diésel, camiones, autobuses, etc.), así mismo, controlan la emisión de todas aquellas sustancias consideradas tóxicas para la salud de las personas, como son los óxidos de nitrógeno, el monóxido de carbono, los hidrocarburos inquemados y las partículas (TotalEnergies, 2023). Lo anterior se ajusta al contexto de calidad del aire en el Valle de Aburrá. En la figura 40 se expone las reducciones de gases con la implementación de cada una de las normas EURO.

**Figura 40**

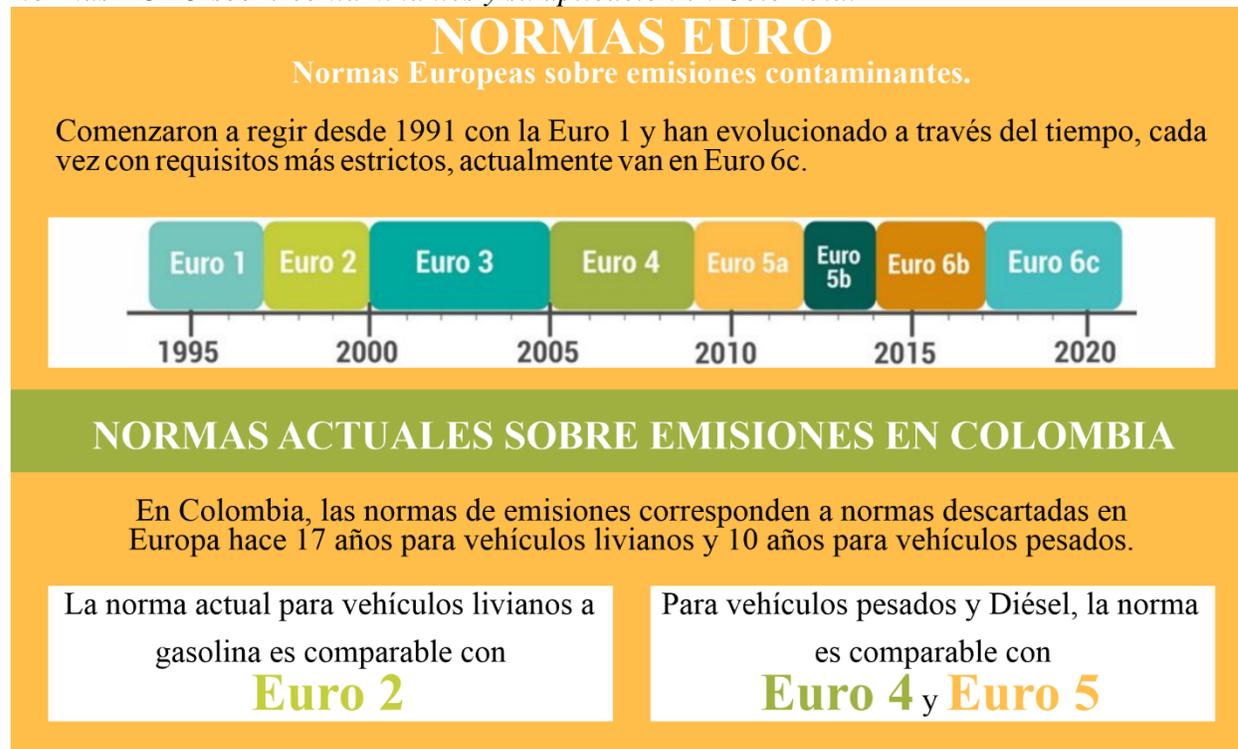
*Reducción de gases con la implementación de cada una de las normas EURO.*



*Nota.* En la figura se representa la constante evolución de la norma EURO, que ha buscado mejorar la calidad del aire pidiendo a los fabricantes implementar y acondicionar nuevas tecnologías que limpien cada vez más los gases de salida a toda clase de vehículos. Adaptado de *¿Qué son las normas EURO y por qué evolucionan?* (Auto Crash, 2019). En la figura 41 se exponen la evolución de la norma europea sobre emisiones contaminantes y las normas actuales sobre emisiones en Colombia.

**Figura 41**

*Normas EURO sobre contaminantes y su aplicación en Colombia.*



*Nota.* En la figura se representa las Normas EURO y las normas actuales sobre emisiones en Colombia. Adaptado de *Calidad del aire: las secuelas del parque automotor* (ZAPATA GIRALDO, 2017).

### 6.2.5 Árboles Artificiales Purificadores de Aire

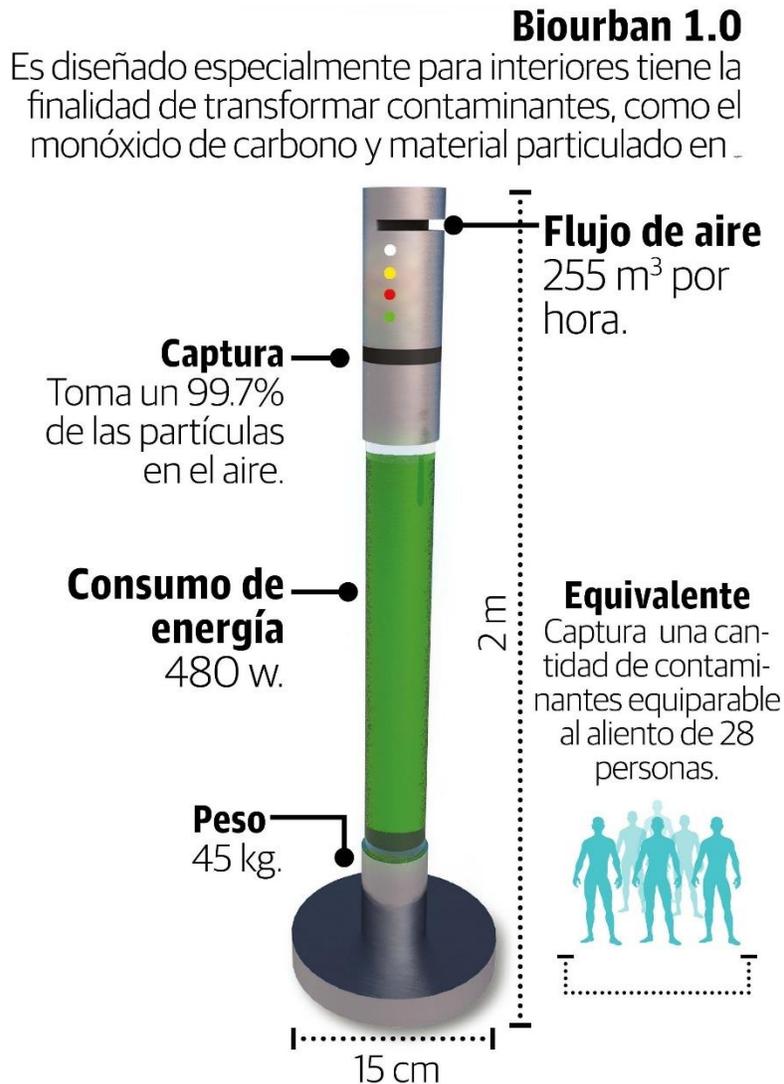
Tecnología de microalgas para purificar el aire a través del prototipo BioUrban, que es un sistema urbano desarrollado con tecnología verde, para biorremediación de agentes contaminantes tales como CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, Material particulado 2.5 y 10, así como el total de partículas en suspensión, convertirlos en aire oxigenado y biomasa a través de la fotosíntesis, incluyendo un sistema de monitoreo de aire calidad en tiempo real (Biomitech, 2021).

El prototipo BioUrban es un sistema urbano, desarrollado con tecnología verde, para biorremediación de agentes contaminantes tales como CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, Material particulado 2.5 y 10, así como el total de partículas en suspensión, convertirlos en aire oxigenado y biomasa a

través de la fotosíntesis, incluyendo un sistema de monitoreo de aire calidad en tiempo real (Biomitech, 2021). Actualmente existen tres tipos de soluciones de filtros de algas, las cuales son:

**6.2.5.1 BioUrban 1.0.** Sistema diseñado para limpiar el aire de espacios interiores como casas, oficinas, salas de juntas, lugares donde se reúnen personas, y se preocupan por la calidad del aire que respiran (Biomitech, 2021). En la Figura 42 se expone el prototipo BioUrban 1.0.

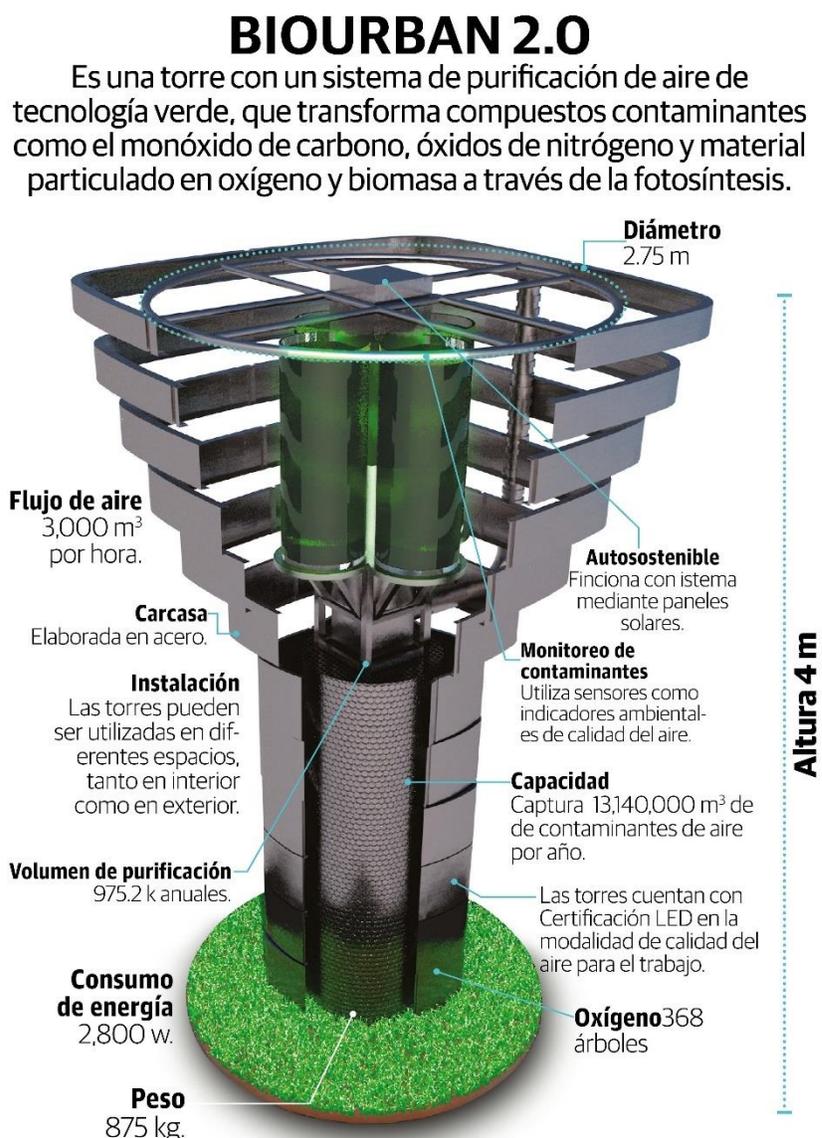
**Figura 42**  
*BioUrban 1.0*



Nota. En la figura se ilustra la forma, partes y funciones del prototipo BioUrban 1.0. Adaptado de Héctor Jiménez Landín @JimenezLandin (Jiménez Landín, 2019).

**6.2.5.2 BioUrban 2.0.** Sistema urbano para la captura de carbono en espacios urbanos, monitorea la calidad del aire y ayuda a purificarlo, haciéndolo más seguro para las personas que lo respiran y capturando la contaminación que los rodea en la urbe (Biomitech, 2021). En la Figura 43 se expone el prototipo BioUrban 2.0.

**Figura 43**  
BioUrban 2.0

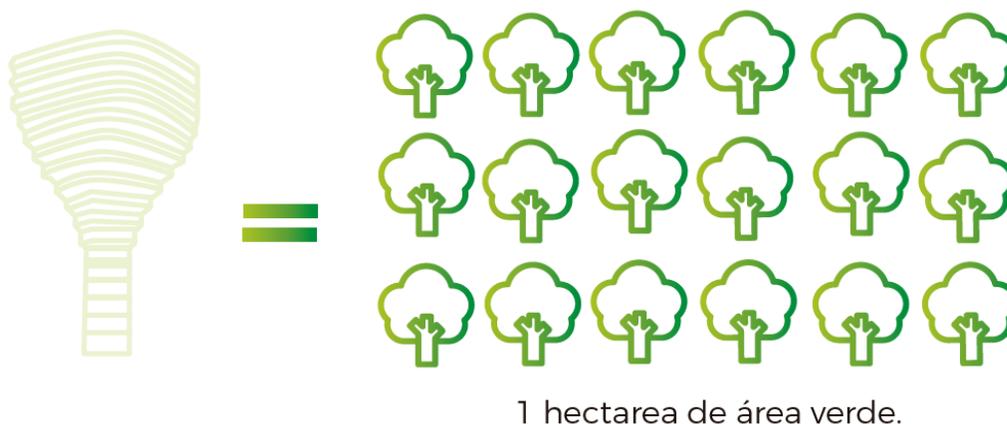


Nota. En la figura se ilustra la forma, partes y funciones del prototipo BioUrban 2.0. Adaptado de Héctor Jiménez Landín @JimenezLandin (Jiménez Landín, 2019).

Este prototipo de purificador de aire es conveniente para implementar en espacios urbanos, donde físicamente no hay espacio para plantar los suficientes árboles para procesar la cantidad de material particulado que se han generado, en el caso del Barrio Belén, es pertinente implementar este prototipo en las vías principales, como la calle 30, donde se encuentra el mayor tráfico de vehículos y por consiguiente el mayor volumen de partículas contaminantes suspendidas en el aire (Ver anexo 7). En la figura 44 se ilustra la equivalencia del sistema BioUrban 2.0 con el área verde.

#### Figura 44

*Equivalencia de BioUrban 2.0 con área verde*



*Nota.* En la figura se ilustra equivalencia de BioUrban 2.0 respecto a áreas verdes. Adaptado de *Smart Tech for a Green Future* (BiomiTech, 2019).

En la figura 45 se describen las especificaciones técnicas del sistema BioUrban 2.0, que corresponde a diámetro superior, altura, consumo energético, fuente de alimentación, peso, flujo de caudal de aire, captura de CO<sub>2</sub>, CO y NO<sub>x</sub>, capacidad de captura de PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub>, equivalencia en el aire limpio y mantenimiento del equipo.

**Figura 45**

*Especificaciones técnicas BioUrban 2.0*

### Especificaciones técnicas



Especificaciones:	Cifras
Diámetro parte superior:	2.75 m
Altura:	4.2 m
Consumo energético:	275 kWh
Fuente de alimentación:	120 V
Peso:	1 Ton
Flujo de caudal de aire:	3,300 m <sup>3</sup> /h
Captura de CO <sub>2</sub> , CO y NO <sub>x</sub> :	32.3 Ton/añual
Capacidad de captura PM 2.5 y 10:	Filtra hasta el 85% de las partículas
Equivalencia en aire limpio:	2,555 personas
Mantenimiento del equipo:	Cada 3 a 6 meses



*Nota.* En la figura se describió las especificaciones técnicas asociadas al sistema BioUrban 2.0. Adaptado de *Smart Tech for a Green Future* (Biomitech, 2019).

**6.2.5.3 BioUrban 3.0.** Nueva versión modificada para incrementar la eficiencia de captura de carbono y contaminantes ambientales, con mayor columna de biomasa y flujo de aire, cuenta con paneles solares y una pantalla para transmitir publicidad programática (Biomitech, 2021). En la figura 46 se expone el prototipo BioUrban 3.0.

**Figura 46**  
*BioUrban 3.0*



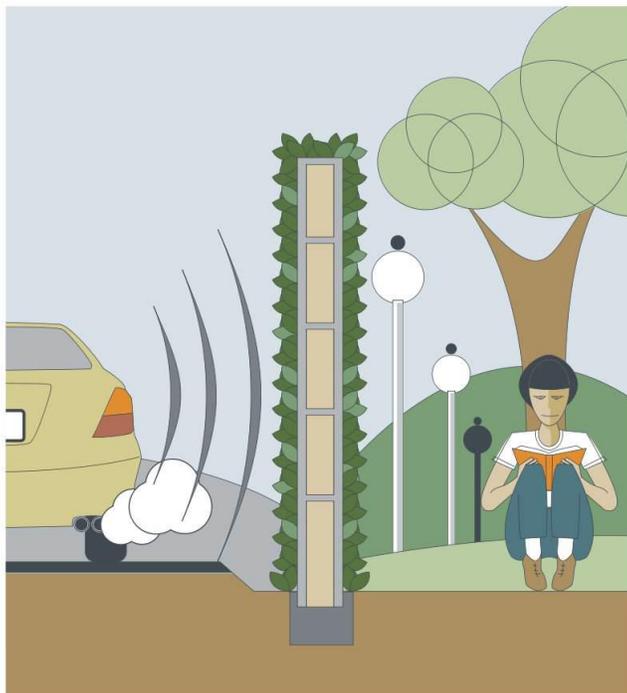
*Nota.* En la figura se ilustra la forma del prototipo BioUrban 3.0. Adaptado de *Biomitech NUESTRAS SOLUCIONES* (Biomitech, 2021).

### **6.2.6 Barreras Vegetales.**

Barreras vegetales autónomas y sostenibles para la mitigación acústica y compensación del CO<sub>2</sub> en vías de transporte, con seguimiento telemático, es un estudio realizado por la Universidad de Almería (2012), que, en la puesta en marcha del proyecto piloto, se tuvo como objetivo hacer uso de barreras vegetales para la reducción de contaminación acústica y de CO<sub>2</sub> en vías de transporte. En la figura 47 se ilustra el propósito del proyecto de combinar las especies vegetales con las pantallas acústicas y/o muros verdes.

## Figura 47

*Combinación de especies vegetales y pantallas acústicas.*



*Nota.* En la figura se ilustra el propósito del proyecto de combinar las especies vegetales con las pantallas acústicas y/o muros verdes. Adaptado de *SILENTVEG: Barreras vegetales autónomas y sostenibles para la mitigación acústica y compensación del CO2 en vías de transporte, con seguimiento telemático* (Universidad de Almería, 2012).

Las barreras vegetales se deben realizar en procesos comunitarios, con impacto social, concibiendo los muros verdes y las fachadas vegetales como valor agregado en las edificaciones, en donde la comunidad se capacite en el mantenimiento de esta vegetación, con especies nativas y en algunos casos se puedan adoptar el cultivo de hortalizas, que sea atractivo como aporte a la canasta familiar, en donde la comunidad funcione como actor en la producción de alimentos. Pero el fondo de la implementación de esta iniciativa sea la compensación de CO<sub>2</sub> y por ende al mejoramiento de la calidad del aire, así como también el aumento de la calidad de vida de los habitantes del barrio Belén. Este barrio ya consolidado puede implementar estrategias de adaptación física de estas alternativas de cultivo en edificaciones ya existentes, lo cual no requiere un cambio estructural (Ver anexo 7).

### 6.2.7 Techos verdes

Los techos verdes desde un punto de vista técnico, es una tecnología para el techado de una construcción en la cual las plantas son consideradas como un material importante (Getter & Rowe, 2008), estos techos verdes, proveen algunos beneficios ecológicos, económicos y sociales como el manejo de aguas de tormenta, conservación de la energía,

mitigación de los efectos de isla de calor urbana, incremento en la duración de las cubiertas, mitigación del ruido y la contaminación del aire, y el incremento de la biodiversidad urbana, adicionalmente, pueden proveer de un entorno más amigable y estético para los lugares de trabajo y vivienda (Getter, Kristin; Rowe, D. Bradley; Robertson, G. P; Gregg, B. M.; Andresen, J. A., 2009). Consecuente a esto es relevante mencionar el trabajo realizado por Yin et al (2010), en donde se resumió la aplicación de la teoría del consumo de oxígeno inducido por el hombre y la emisión de carbono en la región urbana y, sobre esta base, se construyó un nuevo modelo de balance urbano de carbono y oxígeno (UCOB) mediante el cálculo de los flujos de carbono y oxígeno (Ver anexo 7). En la figura 48 se presenta el esquema básico de Cubiertas Verdes

#### Figura 48

*Esquema básico de Cubiertas Verdes*



*Nota.* En la figura se ilustra mediante esquema, los componentes básicos de instalación de una Cubierta Verde, que, como alternativa de las cubiertas tradicionales, significa un avance valioso en el diseño de edificios sostenibles, así mismo la adición de un techo verde a un área árida de un edificio ofrece ventajas y beneficios sociales, ambientales y económicos. Adaptado de *CUBIERTAS VERDES VENTAJAS Y BENEFICIOS SOCIALES, AMBIENTALES Y ECONÓMICOS* (SIKA, 2021).

### 6.3 Plan de Acción propuesto para Contrarrestar los Periodos Críticos de Deterioro de la Calidad del Aire en el Barrio Belén de la Ciudad de Medellín, Colombia

En el siguiente subcapítulo se expondrá de manera detallada el plan de acción resultado del proceso investigativo expuesto anteriormente. En él se encontrarán medidas para la reducción de contaminantes, sobre la toma de decisiones de usabilidad de los vehículos y las múltiples opciones de movilidad. Además, el periodo de tiempo en la aplicación de estas medidas (en rangos de tiempo de 1, 3 y 5 años.), las cuales han sido clasificadas con respecto al tipo de vehículo y tecnología de emisión contaminante, como son los camiones, buses de servicio especial y las motos.

#### 6.3.1 Camiones

En la tabla 2 se muestran las restricciones de usabilidad, las tecnologías asociadas, la infraestructura requerida, así como, las implicaciones en el comportamiento del usuario (toma de decisiones de usabilidad) con respecto a los impactos en la calidad del aire.

**Tabla 2**

*Modelo de desarrollo para proyectos piloto de movilidad para zonas urbanas - AMVA, barrio Belén de Medellín, Camiones.*

MODELO DE DESARROLLO PARA PROYECTOS PILOTO DE MOVILIDAD PARA ZONAS URBANAS – AMVA, BARRIO BELÉN DE MEDELLÍN							
CAMIONES							
Medidas Actuales	PROPUESTA						
	Medidas	Reducción de contaminantes	Área de implementación	Tomador de decisiones	Opción de movilidad	Tiempo de aplicación de medidas	
<b>Restricción de Usabilidad</b>	No existe	• Circulación solo en vías perimetrales de orden regional y nacional.	• Disminución de los tiempos de circulación urbana del 30 al 50%	• Regional	• Área Metropolitana del Valle de Aburrá AMVA	•Desplazamiento del conductor a través del sistema integrado de transporte público.	<b>a 3 años - 25% de reducción de contaminantes</b>

MODELO DE DESARROLLO PARA PROYECTOS PILOTO DE MOVILIDAD PARA ZONAS URBANAS – AMVA, BARRIO BELÉN DE MEDELLÍN							
CAMIONES							
Medidas Actuales	PROPUESTA						
	Medidas	Reducción de contaminantes	Área de implementación	Tomador de decisiones	Opción de movilidad	Tiempo de aplicación de medidas	
<b>Restricción tecnológica</b>	No existe	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transferencia tecnológica a EURO 5 en el 80% de los vehículos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reducción de las emisiones del 98% de NOx y 89% de CO</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Regional</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Área Metropolitana del Valle de Aburrá AMVA</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Incentivos tributarios para los usuarios, entidades y empresas que reemplacen los vehículos de combustión (Gasolina, Gas Diesel) a vehículos de carga menos contaminantes</li> </ul>	<b>a 5 años - 50% de reducción de contaminantes</b>

MODELO DE DESARROLLO PARA PROYECTOS PILOTO DE MOVILIDAD PARA ZONAS URBANAS – AMVA, BARRIO BELÉN DE MEDELLÍN							
CAMIONES							
Medidas Actuales	PROPUESTA						
	Medidas	Reducción de contaminantes	Área de implementación	Tomador de decisiones	Opción de movilidad	Tiempo de aplicación de medidas	
<b>Restricción de Infraestructura</b>	No existe	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Articulación de puertos marítimos y aéreos con vías férreas, vehículos de gran tamaño, centro de acopio y vehículos de menor tamaño para la distribución de mercancía en el valle de Aburrá.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Disminución de recorrido de Camiones pesados en un 15 al 30% para una reducción del 20 al 30 % de NOx, NO2, CO, CO2, SO2 y PM2,5</li> <li>• Disminución de recorrido de Camiones medianos en un 20 al 40% para una reducción del 30 al 45 % de NOx, NO2, CO, CO2, SO2 y PM2,5.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Regional</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Área Metropolitana del Valle de Aburrá AMVA</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Red de transferencia de carga que corresponda al tamaño del vehículo, la carga y la vía de transito</li> </ul>	<b>a 5 años - 25% de reducción de contaminantes</b>

MODELO DE DESARROLLO PARA PROYECTOS PILOTO DE MOVILIDAD PARA ZONAS URBANAS – AMVA, BARRIO BELÉN DE MEDELLÍN							
CAMIONES							
Medidas Actuales	PROPUESTA						
	Medidas	Reducción de contaminantes	Área de implementación	Tomador de decisiones	Opción de movilidad	Tiempo de aplicación de medidas	
<b>Restricción Asociada al usuario</b>	No existe	<ul style="list-style-type: none"> <li>Incentivar mediante beneficios tributarios, el uso de aplicaciones móviles que permitan la optimización de los recorridos del 15 al 30%.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aumento de la movilidad</li> <li>Disminución de los tiempos de circulación y reducción de 10 al 20%, lo que representa una rebaja de emisiones del 20 al 30 % de NOx, NO2, CO, CO2, SO2 y PM2,5</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Municipal</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Alcaldía municipal</li> <li>Empresa privada</li> <li>Usuario</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Articulación de vehículos de gran tamaño, centro de acopio y vehículos de menor tamaño para la distribución de mercancía</li> </ul>	<b>a 3 años - 25% de reducción de contaminantes</b>

MODELO DE DESARROLLO PARA PROYECTOS PILOTO DE MOVILIDAD PARA ZONAS URBANAS – AMVA, BARRIO BELÉN DE MEDELLÍN							
CAMIONES							
Medidas Actuales	PROPUESTA						
	Medidas	Reducción de contaminantes	Área de implementación	Tomador de decisiones	Opción de movilidad	Tiempo de aplicación de medidas	
Afectación a la Calidad del aire	No existe	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Circulación solo en vías perimetrales de orden regional y nacional.</li> <li>• Transferencia tecnológica a EURO 5 en el 80% de los vehículos.</li> <li>• Articulación de puertos marítimos y aéreos con vías férreas, vehículos de gran tamaño, centro de acopio y vehículos de menor tamaño para la distribución de mercancía en el valle de Aburrá.</li> <li>• Incentivar mediante beneficios tributarios, el uso de aplicaciones móviles que permitan la optimización de los recorridos del 15 al 30%.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Disminución de los tiempos de circulación urbana del 30 al 50%</li> <li>• Reducción de las emisiones del 98% de NOx y 89% de CO</li> <li>• Disminución de recorrido de Camiones pesados en un 15 al 30% para una reducción del 20 al 30 % de NOx, NO2, CO, CO2, SO2 y PM2,5</li> <li>• Disminución de recorrido de Camiones medianos en un 20 al 40% para una reducción del 30 al 45 % de NOx, NO2, CO, CO2, SO2 y PM2,5.</li> <li>• Aumento de la movilidad.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Regional</li> <li>• Municipal</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Área Metropolitana del Valle de Aburrá AMVA</li> <li>• Alcaldía municipal</li> <li>• Empresa privada</li> <li>• Usuario</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desplazamiento del conductor a través del sistema integrado de transporte público.</li> <li>• Incentivos tributarios para los usuarios, entidades y empresas que reemplacen los vehículos de combustión (Gasolina, Gas Diesel) a vehículos de carga menos contaminantes</li> <li>• Articulación de vehículos de gran tamaño, centro de acopio y vehículos de menor tamaño para la distribución de mercancía.</li> </ul>	<p><b>a 5 años - 50% de reducción de contaminantes, que para para el año 2018 las emisiones por cuenta de este vehículo fueron de:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• NOx 39.2%</li> <li>• NO2 25.0%</li> <li>• CO 54.2%</li> <li>• CO2 21.0%</li> <li>• SO2 10.4%</li> <li>• PM2.5 37.2%</li> </ul>

### 6.3.2 Buses de Servicio Especial

En la tabla 3 se muestran las restricciones de usabilidad, las tecnologías asociadas, la infraestructura requerida, así como, las implicaciones en el comportamiento del usuario (toma de decisiones de usabilidad) con respecto a los impactos en la calidad del aire.

**Tabla 3**

*Modelo de desarrollo para proyectos piloto de movilidad para zonas urbanas - AMVA, barrio Belén de Medellín, Buses de Servicio Especial.*

Modelo de desarrollo para proyectos piloto de movilidad para zonas urbanas – AMVA, Barrio Belén de Medellín							
BUSES DE SERVICIO ESPECIAL							
Medidas Actuales	PROPUESTA						
	Medidas	Reducción de contaminantes	Área de implementación	Tomador de decisiones	Opción de movilidad	Tiempo de aplicación de medidas	
<b>Restricción de Usabilidad</b>	No existe	a• Para Buses de servicio intermunicipal: Implementación de pico y placa, de lunes a viernes, durante los periodos de mayor tráfico y concentración de contaminantes, de 07:30 am a 09:00 am, de 11:30am a 01:30 pm y de 05:30 pm a 07:00 pm. b• Para Buses de Servicio Público: Cambio de Frecuencia, aumentando al triple la circulación en horas pico (07:30 am a 09:00 am, de 11:30am a 01:30 pm y de 05:30 pm a 07:00 pm) y disminución	a• Reducción de circulación del 15 al 30% de los Buses de servicio público = Reducción del 10 al 20% de NOx, del 15 al 30% de CO, del 5 al 12% de CO2 y 8 al 24% de PM2,5 b• Reducción del 40 al 70% en el tiempo de recorrido de ruta de Buses de Servicio Público.	a• Municipal b• Área Metropolitana	a• Secretaría de movilidad municipal b• Área Metropolitana del Valle de Aburrá AMVA	• Cambio de rutas a otros municipios	<b>a 1 año - 10% de reducción de contaminantes</b>

Modelo de desarrollo para proyectos piloto de movilidad para zonas urbanas – AMVA, Barrio Belén de Medellín						
BUSES DE SERVICIO ESPECIAL						
Medidas Actuales	PROPUESTA					
	Medidas	Reducción de contaminantes	Área de implementación	Tomador de decisiones	Opción de movilidad	Tiempo de aplicación de medidas
	a la mitad de los vehículos en horas valle.					

Modelo de desarrollo para proyectos piloto de movilidad para zonas urbanas – AMVA, Barrio Belén de Medellín							
BUSES DE SERVICIO ESPECIAL							
Medidas Actuales	PROPUESTA						
	Medidas	Reducción de contaminantes	Área de implementación	Tomador de decisiones	Opción de movilidad	Tiempo de aplicación de medidas	
<b>Restricción tecnológica</b>	No existe	<ul style="list-style-type: none"> <li>Transferencia tecnológica a EURO 5 en el 80% de los vehículos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reducción de las emisiones del 98% de NOx y 89% de CO</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Regional</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Área Metropolitana del Valle de Aburrá AMVA</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Incentivos tributarios para los usuarios, entidades y empresas que reemplacen los vehículos de combustión (Gasolina, Gas Diesel) a vehículos de transporte menos contaminantes</li> </ul>	<b>a 5 años - 50% de reducción de contaminantes</b>
<b>Restricción de Infraestructura</b>	No existe	<ul style="list-style-type: none"> <li>Implementación de Árboles Artificiales Purificadores de Aire de nivel urbano en sitios de parqueo, semáforos y concentración masiva de Buses.</li> <li>Implementación de Barreras vegetales en los puntos de mayor concentración vehicular en las vías urbanas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Cada árbol artificial urbanos equivalente a 1ha de área verde, purifica el 2% del área del barrio Belén.</li> <li>Disminución de hasta de un 50 % de la dispersión de contaminantes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Barrio Belén</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Alcaldía municipal</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bicicleta</li> </ul>	<b>a 5 años - 50% de reducción de contaminantes</b>

Modelo de desarrollo para proyectos piloto de movilidad para zonas urbanas – AMVA, Barrio Belén de Medellín							
BUSES DE SERVICIO ESPECIAL							
Medidas Actuales	PROPUESTA						
	Medidas	Reducción de contaminantes	Área de implementación	Tomador de decisiones	Opción de movilidad	Tiempo de aplicación de medidas	
<b>Restricción Asociada al usuario</b>	Para vehículos de transporte público existen rutas de movilidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>Incentivar mediante beneficios tributarios, el uso de Vehículos compartidos, mediante aplicaciones móviles a buses pequeños.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aumento del 10 al 20% de recorridos de vehículos con cupo lleno, reducción de emisiones de NOx del 5% al 10%, CO 8 al 15%, CO2 del 3 al 6% y PM2.5 del 6 al 12%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Municipal</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Usuarios</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>vehículos eléctricos</li> <li>Bicicletas</li> <li>Plan de movilidad Empresarial sostenible ampliada a empresas de 50 empleados en adelante</li> </ul>	<b>a 1 año - 10% de reducción de contaminantes</b>

<p style="text-align: center;"><b>Afectación a la Calidad del aire</b></p>	<p>No existe</p>	<p>a• Para Buses de servicio intermunicipal: Implementación de pico y placa, de lunes a viernes, durante los periodos de mayor tráfico y concentración de contaminantes.  b• Para Buses de Servicio Público: Cambio de Frecuencia, aumentando al triple la circulación en horas pico y disminución a la mitad de vehículos en horas valle.  • Transferencia tecnológica a EURO 5 en el 80% de los vehículos. • Implementación de Árboles Artificiales Purificadores de Aire de nivel urbano en sitios de parqueo, semáforos y concentración masiva de Buses.  • Implementación de Barreras vegetales en los puntos de mayor concentración vehicular en las vías urbanas.  • Incentivar mediante beneficios tributarios, el uso de Vehículos compartidos, mediante aplicaciones móviles a buses pequeños.</p>	<p>a• La reducción de circulación del 15 al 30% de los Buses de servicio público representa una reducción del 10 al 20% de NOx, del 15 al 30% de CO, del 5 al 12% de CO2 y 8 al 24% de PM2,5  b• Reducción del 40 al 70% en el tiempo de recorrido de ruta de Buses de Servicio Público.  • Reducción de las emisiones del 98% de NOx y 89% de CO  • Cada árbol artificial urbanos equivalente a 1ha de área verde, purifica el 2% del área del barrio Belén.  • Disminución de hasta de un 50 % de la dispersión de contaminantes.</p>	<p>a• Municipal  b• Área Metropolitana  • Regional  • Barrio Belén  • Municipal</p>	<p>a• Secretaría de movilidad municipal  b• Área Metropolitana del Valle de Aburrá AMVA  • Área Metropolitana del Valle de Aburrá AMVA  • Alcaldía municipal  • Usuarios</p>	<p>• Cambio de rutas a otros municipios  • Incentivos tributarios para los usuarios, entidades y empresas que reemplacen los vehículos de combustión (Gasolina, Gas Diesel) a vehículos de transporte menos contaminantes  • Bicicleta  • vehículos eléctricos  • Bicicletas  • Plan de movilidad Empresarial sostenible ampliada a empresas de 50 empleados en adelante</p>	<p><b>a 5 años - 50% de reducción de contaminantes registrados en 2018.</b></p>
--	------------------	--	---	---	--	--	---

### 6.3.3 Motos

En la tabla 4 se muestran las restricciones de usabilidad, las tecnologías asociadas, la infraestructura requerida, así como, las implicaciones en el comportamiento del usuario (toma de decisiones de usabilidad) con respecto a los impactos en la calidad del aire.

**Tabla 4**

*Modelo de desarrollo para proyectos piloto de movilidad para zonas urbanas - AMVA, barrio Belén de Medellín, Motos.*

Modelo de desarrollo para proyectos piloto de movilidad para zonas urbanas – AMVA, Barrio Belén de Medellín							
MOTOS							
Medidas Actuales	PROPUESTA						
	Medidas	Reducción de contaminantes	Área de implementación	Tomador de decisiones	Opción de movilidad	Tiempo de aplicación de medidas	
<b>Restricción de Usabilidad</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pico y placa, restricción diaria de lunes a viernes en dos dígitos del último número de la placa del vehículo, en toda el área metropolitana.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prohibición de movilidad en el 40% del barrio Belén que corresponde la centralidad zonal de carácter mixto, según POT.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Del 30% al 70% de CO</li> <li>• Del 30% al 70% de CO2</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Centralidad Zonal urbana de carácter mixto (Dotacional y Económica) entorno al parque Belén</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Secretaría de movilidad municipal</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vehículos no motorizados</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>a 1 año - 10% de reducción de contaminantes</b></li> </ul>

Modelo de desarrollo para proyectos piloto de movilidad para zonas urbanas – AMVA, Barrio Belén de Medellín							
MOTOS							
Medidas Actuales	PROPUESTA						
	Medidas	Reducción de contaminantes	Área de implementación	Tomador de decisiones	Opción de movilidad	Tiempo de aplicación de medidas	
<b>Restricción tecnológica</b>	Restricción de fabricación de Motos 2T	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transferencia tecnológica a vehículos eléctricos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Del 30 al 40% de las motos del Valle de Aburrá sean eléctricas</li> <li>• Aumento comercial de la oferta de alternativas vehiculares menos contaminantes en un 40%.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Regional</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Área Metropolitana del Valle de Aburrá AMVA</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bicicletas</li> <li>• Plan de movilidad Empresarial sostenible ampliada a empresas de 50 empleados en adelante</li> </ul>	<b>a 5 años - 50% de reducción de contaminantes</b>
<b>Restricción de Infraestructura</b>	No existe	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Circulación solo en vías de bajo tráfico vehicular</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Disminución de la circulación de motos del 20 al 30%</li> <li>• Aumento del uso del transporte público del 10 al 20%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Municipal</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alcaldía municipal</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Movilidad no motorizada</li> <li>• vehículos eléctricos</li> <li>• Bicicletas</li> </ul>	<b>a 3 años - 25% de reducción de contaminantes</b>

Modelo de desarrollo para proyectos piloto de movilidad para zonas urbanas – AMVA, Barrio Belén de Medellín							
MOTOS							
Medidas Actuales	PROPUESTA						
	Medidas	Reducción de contaminantes	Área de implementación	Tomador de decisiones	Opción de movilidad	Tiempo de aplicación de medidas	
<b>Restricción Asociada al usuario</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pico y placa, restricción diaria de lunes a viernes en dos dígitos del último número de la placa del vehículo, en toda el área metropolitana</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Restricción de circulación de motos a gasolina en todas las centralidades urbanas de Medellín</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Disminución del 15 al 30% de la compra de motos de gasolina</li> <li>• Aumento de la compra de motos eléctricas del 20% al 40%</li> <li>• Reducción 5 al 10% de CO2 y del 9 al 18% de SO2</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Municipal</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alcaldía municipal</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• vehículos eléctricos</li> <li>• Bicicletas</li> <li>• Plan de movilidad Empresarial sostenible ampliada a empresas de 50 empleados en adelante</li> </ul>	<b>a 3 años - 25% de reducción de contaminantes</b>

Modelo de desarrollo para proyectos piloto de movilidad para zonas urbanas – AMVA, Barrio Belén de Medellín							
MOTOS							
Medidas Actuales	PROPUESTA						
	Medidas	Reducción de contaminantes	Área de implementación	Tomador de decisiones	Opción de movilidad	Tiempo de aplicación de medidas	
Afectación a la Calidad del aire	Para motos 4t: • CO 13.0% • CO2 20.9%	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prohibición de movilidad en el 40% del barrio Belén que corresponde la centralidad zonal de carácter mixto, según POT.</li> <li>• Transferencia tecnológica a vehículos eléctricos</li> <li>• Restricción de circulación de motos a gasolina en todas las centralidades urbanas de Medellín</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Del 30% al 70% de CO</li> <li>• Del 30% al 70% de CO2</li> <li>• Del 30 al 40% de las motos del Valle de Aburrá sean eléctricas</li> <li>• Aumento comercial de la oferta de alternativas vehiculares menos contaminantes en un 40%.</li> <li>• Disminución del 15 al 30% de la compra de motos de gasolina</li> <li>• Aumento de la compra de motos eléctricas del 20% al 40%</li> <li>• Reducción 5 al 10% de CO2 y del 9 al 18% de SO2</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Centralidad Zonal urbana de carácter mixto (Dotacional y Económica) entorno al parque Belén</li> <li>• Regional</li> <li>• Municipal</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Secretaría de movilidad municipal</li> <li>• Área Metropolitana del Valle de Aburrá AMVA</li> <li>• Alcaldía municipal</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vehículos no motorizados</li> <li>• Bicicletas</li> <li>• Plan de movilidad Empresarial sostenible ampliada a empresas de 50 empleados en adelante</li> <li>• vehículos eléctricos</li> <li>• Bicicletas</li> <li>• Plan de movilidad Empresarial sostenible ampliada a empresas de 50 empleados en adelante</li> </ul>	<b>a 5 años - 50% de reducción de contaminantes</b>

### 6.3.4 Implementación de medidas a 1 año para lograr un 10% de reducción de contaminantes

En la tabla 5 se exponen, las medidas (restricciones de usabilidad, las tecnologías asociadas, la infraestructura requerida, así como, las implicaciones en el comportamiento del usuario en la toma de decisiones de usabilidad) aplicadas a Buses de servicios especial y Motos, con respecto a los impactos en la calidad del aire para conseguir un 10% en la reducción de los contaminantes en 1 año.

**Tabla 5**

*Modelo de desarrollo para proyectos piloto de movilidad para zonas urbanas - AMVA, barrio Belén de Medellín, primer año de implementación.*

<b>Modelo de desarrollo para proyectos piloto de movilidad para zonas urbanas – AMVA, Barrio Belén de Medellín</b>		
a 1 año - 10% de reducción de contaminantes		
<b>Vehículo</b>	<b>Medidas</b>	<b>Reducción de contaminantes</b>
Buses de Servicio Especial	<ul style="list-style-type: none"> <li>a• Para Buses de servicio intermunicipal: Implementación de pico y placa, de lunes a viernes, durante los periodos de mayor tráfico y concentración de contaminantes, de 07:30 am a 09:00 am, de 11:30am a 01:30 pm y de 05:30 pm a 07:00 pm.</li> <li>b• Para Buses de Servicio Público: Cambio de Frecuencia, aumentando al triple la circulación en horas pico (07:30 am a 09:00 am, de 11:30am a 01:30 pm y de 05:30 pm a 07:00 pm) y disminución a la mitad de los vehículos en horas valle.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>a• Reducción de circulación del 15 al 30% de los Buses de servicio público = Reducción del 10 al 20% de NOx, del 15 al 30% de CO, del 5 al 12% de CO2 y 8 al 24% de PM2,5</li> <li>b• Reducción del 40 al 70% en el tiempo de recorrido de ruta de Buses de Servicio Público.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Incentivar mediante beneficios tributarios, el uso de Vehículos compartidos, mediante aplicaciones móviles a buses pequeños.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumento del 10 al 20% de recorridos de vehículos con cupo lleno, reducción de emisiones de NOx del 5% al 10%, CO 8 al 15%, CO2 del 3 al 6% y PM2.5 del 6 al 12%</li> </ul>
Motos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prohibición de movilidad en el 40% del barrio Belén que corresponde la centralidad zonal de carácter mixto, según POT.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Del 30% al 70% de CO</li> <li>• Del 30% al 70% de CO2</li> </ul>

### 6.3.5 Implementación de medidas a 3 años para lograr un 25% de reducción de contaminantes

En la tabla 6 se exponen, las medidas (restricciones de usabilidad, las tecnologías asociadas, la infraestructura requerida, así como, las implicaciones en el comportamiento del usuario en la toma de decisiones de usabilidad) aplicadas a Camiones y Motos, con respecto a los impactos en la calidad del aire para conseguir un 25% en la reducción de los contaminantes en 3 años.

**Tabla 6**

*Modelo de desarrollo para proyectos piloto de movilidad para zonas urbanas - AMVA, barrio Belén de Medellín, segundo año de implementación.*

<b>Modelo de desarrollo para proyectos piloto de movilidad para zonas urbanas – AMVA, Barrio Belén de Medellín</b>		
a 3 años - 25% de reducción de contaminantes		
<b>Vehículo</b>	<b>Medidas</b>	<b>Reducción de contaminantes</b>
Camiones	• Circulación solo en vías perimetrales de orden regional y nacional.	• Disminución de los tiempos de circulación urbana del 30 al 50%
	• Incentivar mediante beneficios tributarios, el uso de aplicaciones móviles que permitan la optimización de los recorridos del 15 al 30%.	• Aumento de la movilidad • Disminución de los tiempos de circulación y reducción de 10 al 20%, lo que representa una rebaja de emisiones del 20 al 30 % de NOx, NO2, CO, CO2, SO2 y PM2,5
Motos	• Circulación solo en vías de bajo tráfico vehicular	• Disminución de la circulación de motos del 20 al 30% • Aumento del uso del transporte público del 10 al 20%
Motos	• Restricción de circulación de motos a gasolina en todas las centralidades urbanas de Medellín	• Disminución del 15 al 30% de la compra de motos de gasolina • Aumento de la compra de motos eléctricas del 20% al 40% • Reducción 5 al 10% de CO2 y del 9 al 18% de SO2

### 6.3.6 Implementación de medidas a 5 años para lograr un 50% de reducción de contaminantes

En la tabla 7 se exponen, las medidas (restricciones de usabilidad, las tecnologías asociadas, la infraestructura requerida, así como, las implicaciones en el comportamiento del usuario en la toma de decisiones de usabilidad) aplicadas a Camiones, Buses de Servicio Especial y Motos, con respecto a los impactos en la calidad del aire para conseguir un 50% en la reducción de los contaminantes en 5 años.

**Tabla 7**

*Modelo de desarrollo para proyectos piloto de movilidad para zonas urbanas - AMVA, barrio Belén de Medellín, tercer año de implementación.*

<b>Modelo de desarrollo para proyectos piloto de movilidad para zonas urbanas – AMVA, Barrio Belén de Medellín</b>		
a 5 años - 50% de reducción de contaminantes		
<b>Vehículo</b>	<b>Medidas</b>	<b>Reducción de contaminantes</b>
Camiones	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transferencia tecnológica a EURO 5 en el 80% de los vehículos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reducción de las emisiones del 98% de NOx y 89% de CO</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Articulación de puertos marítimos y aéreos con vías férreas, vehículos de gran tamaño, centro de acopio y vehículos de menor tamaño para la distribución de mercancía en el valle de Aburrá.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Disminución de recorrido de Camiones pesados en un 15 al 30% para una reducción del 20 al 30 % de NOx, NO2, CO, CO2, SO2 y PM2,5 •</li> <li>Disminución de recorrido de Camiones medianos en un 20 al 40% para una reducción del 30 al 45 % de NOx, NO2, CO, CO2, SO2 y PM2,5.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Circulación solo en vías perimetrales de orden regional y nacional.</li> <li>• Transferencia tecnológica a EURO 5 en el 80% de los vehículos.</li> <li>• Articulación de puertos marítimos y aéreos con vías férreas, vehículos de gran tamaño, centro de acopio y vehículos de menor tamaño para la distribución de mercancía en el valle de Aburrá.</li> <li>• Incentivar mediante beneficios tributarios, el uso</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Disminución de los tiempos de circulación urbana del 30 al 50%</li> <li>• Reducción de las emisiones del 98% de NOx y 89% de CO</li> <li>• Disminución de recorrido de Camiones pesados en un 15 al 30% para una reducción del 20 al 30 % de NOx, NO2, CO, CO2, SO2 y PM2,5 •</li> <li>Disminución de recorrido de Camiones medianos en un 20 al 40% para una reducción del 30 al 45 %</li> </ul>

<b>Modelo de desarrollo para proyectos piloto de movilidad para zonas urbanas – AMVA, Barrio Belén de Medellín</b>		
a 5 años - 50% de reducción de contaminantes		
<b>Vehículo</b>	<b>Medidas</b>	<b>Reducción de contaminantes</b>
	de aplicaciones móviles que permitan la optimización de los recorridos del 15 al 30%.	de NOx, NO2, CO, CO2, SO2 y PM2,5. • Aumento de la movilidad.
Buses de Servicio Especial	• Transferencia tecnológica a EURO 5 en el 80% de los vehículos.	• Reducción de las emisiones del 98% de NOx y 89% de CO
	• Implementación de Árboles Artificiales Purificadores de Aire de nivel urbano en sitios de parqueo, semáforos y concentración masiva de Buses. • Implementación de Barreras vegetales en los puntos de mayor concentración vehicular en las vías urbanas.	• Cada árbol artificial urbanos equivalente a 1ha de área verde, purifica el 2% del área del barrio Belén. • Disminución de hasta de un 50 % de la dispersión de contaminantes.
	a• Para Buses de servicio intermunicipal: Implementación de pico y placa, de lunes a viernes, durante los periodos de mayor tráfico y concentración de contaminantes. b• Para Buses de Servicio Público: Cambio de Frecuencia, aumentando al triple la circulación en horas pico y disminución a la mitad de vehículos en horas valle. • Transferencia tecnológica a EURO 5 en el 80% de los vehículos. • Implementación de Árboles	a• La reducción de circulación del 15 al 30% de los Buses de servicio público representa una reducción del 10 al 20% de NOx, del 15 al 30% de CO, del 5 al 12% de CO2 y 8 al 24% de PM2,5 b• Reducción del 40 al 70% en el tiempo de recorrido de ruta de Buses de Servicio Público. • Reducción de las emisiones del 98% de NOx y 89% de CO • Cada árbol artificial urbanos equivalente a 1ha de área verde, purifica el 2% del área del barrio

<b>Modelo de desarrollo para proyectos piloto de movilidad para zonas urbanas – AMVA, Barrio Belén de Medellín</b>		
a 5 años - 50% de reducción de contaminantes		
<b>Vehículo</b>	<b>Medidas</b>	<b>Reducción de contaminantes</b>
	<p>Artificiales Purificadores de Aire de nivel urbano en sitios de parqueo, semáforos y concentración masiva de Buses.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Implementación de Barreras vegetales en los puntos de mayor concentración vehicular en las vías urbanas.</li> <li>• Incentivar mediante beneficios tributarios, el uso de Vehículos compartidos, mediante aplicaciones móviles a buses pequeños.</li> </ul>	<p>Belén.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Disminución de hasta de un 50 % de la dispersión de contaminantes.</li> </ul>
Motos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transferencia tecnológica a vehículos eléctricos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Del 30 al 40% de las motos del Valle de Aburrá sean eléctricas</li> <li>• Aumento comercial de la oferta de alternativas vehiculares menos contaminantes en un 40%.</li> </ul>
Motos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prohibición de movilidad en el 40% del barrio Belén que corresponde la centralidad zonal de carácter mixto, según POT.</li> <li>• Transferencia tecnológica a vehículos eléctricos</li> <li>• Restricción de circulación de motos a gasolina en todas las centralidades urbanas de Medellín</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Del 30% al 70% de CO</li> <li>• Del 30% al 70% de CO2</li> <li>• Del 30 al 40% de las motos del Valle de Aburrá sean eléctricas</li> <li>• Aumento comercial de la oferta de alternativas vehiculares menos contaminantes en un 40%.</li> <li>• Disminución del 15 al 30% de la compra de motos de gasolina</li> <li>• Aumento de la compra de motos eléctricas del 20% al 40%</li> <li>• Reducción 5 al 10% de CO2 y del 9 al 18% de SO2</li> </ul>

## 7 Conclusiones

- Para los Camiones es fundamental la articulación de vehículos de gran tamaño, centro de acopio y vehículos de menor tamaño para la distribución de mercancía en el valle de Aburrá, de manera que la circulación de estos vehículos sea solo en vías perimetrales de los cascos urbanos, de manera óptima, reduciendo el tiempo y distancia de los recorridos, lo cual impacta positivamente en la calidad del aire al disminuir las emisiones de partículas contaminantes.
- Para los Buses de Servicios Especial se deben adoptar medidas que requieren de inversión desde el sector público en infraestructura para la instalación de Árboles artificiales purificadores de aire de nivel urbano y Barreras vegetales en sitios de parqueo, semáforos y puntos de mayor concentración vehicular en las vías urbanas; Adicional a un modelo de comportamiento y de diferentes toma de decisiones en el usuario que deberá ser impulsado por las campañas de comunicación de los entes gubernamentales, con esto se busca que haya una reducción significativa en las emisiones de gases contaminantes.
- Este estudio evidencia que es indispensable que las Motos se rijan con la medida de prohibición de movilidad en el 40% del barrio Belén (correspondiente a la centralidad zonal de carácter mixto, según el POT), contribuyendo así a la reducción de las emisiones contaminantes del aire y el correcto uso del vehículo; para posteriormente llevar estas medidas a escala metropolitana, impulsando al transporte público y la movilidad no motorizada como la mejor manera de desplazarse.
- En esta conclusión es importante enfatizar que la conclusión del estudio a escala Belén, es un punto de salida para posteriormente llevarlo a escala metropolitana
- Para futuros estudios de movilidad, se deberá desarrollar un estudio específico para vehículos particulares, con el fin de establecer las medidas a futuro, teniendo en cuenta el aumento significativo que se presenta cada año.
- Se identificaron brechas de información en cuanto a la cantidad de vehículos que circulan por el área metropolitana del valle de Aburrá, así mismo, la falta de actualización del inventario de emisiones, que des del año 2018 no se tienen nuevos datos.
- Es importante para poder llevar a cabo una implementación, como la planteada, el que haya proceso de planeación a nivel regional y municipal, en donde se cuente con recursos económicos y presupuestal para la inversión en infraestructura, en donde se podrán incorporar modelos de negocios del sector privado para facilitar otras alternativas de movilidad, con el uso de otras tecnologías que se tendrán que desarrollar instrumentos de política pública que vayan acotando la usabilidad de las tecnologías, donde en los primeros años se vaya haciendo una transición a tecnologías

de combustible fósil más limpia, como las que se buscan con la implementación de la norma Euro 5, pero que en los siguientes años tendrán que irse desplazando estas tecnologías a combustión por tecnologías híbridas o asociadas a la electromovilidad.

- Se cumplió con el objetivo general de orientar estrategias y medidas de mitigación de gases contaminantes en el parque automotor a una escala del barrio Belén de la ciudad de Medellín, Colombia, como proyecto piloto para que posteriormente pueda ser implementado a escala metropolitana. Además, estas medidas se establece un plan de acción que contrarresta los periodos críticos de deterioro de la calidad del aire.
- Se identificaron a los camiones, los buses de servicios especial, los autos, las motos 4t y las volquetas, como los vehículos y sistemas de movilidad responsables de la mayor concentración de material particulado presentes en la atmósfera del área de influencia del barrio Belén de Medellín, en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, en donde se enfocaron los recursos para estudiar a los camiones, los buses de servicios especial y las motos.
- Se Determinó los factores contaminantes en el aire del aire (NOx, NO2, CO, CO2 y PM2.5 asociados a sus fuentes de emisiones), en la demarcación de la ciudad de Medellín y su área metropolitana. Entre ellos la dimensión social y económica, dentro del contexto de la calidad de vida y del aire.
- Se Estableció el plan de acción para contrarrestar los periodos críticos de deterioro de la calidad del aire, enfocado a la mitigación de los contaminantes presentes en el aire del área de influencia del barrio belén de la ciudad de Medellín, Colombia.

### **7.1 Recomendaciones para la movilidad particular (Vehículos particulares)**

A continuación, se presentan 5 medidas que sugieren una mejor movilidad particular, aunque no es el objeto de este estudio.

- Fomentar la educación ciudadana y la conciencia del uso adecuado de vehículos particulares mediante las campañas de comunicación que divulguen las múltiples formas de movilidad existentes y proyectos a futuro.
- Establecer tarifas de movilidad para que al usuario le sea más rentable usar los medios de transporte público que sacar el vehículo propio.
- Desarrollo de modelos de negocios públicos o privados de renta, en donde se pague por los kilómetros de transporte o el tiempo del desplazamiento; de igual manera,
- Fortalecer los planes de movilidad compartida existentes y fomentar la implementación de nuevos modelos, mediante un programa organizacional que dentro de las empresas se crean comunidades con una ruta fijan de desplazamientos oficina-

casa y casa-oficina de los trabajadores, garantizando el cupo lleno del vehículo, disminuyendo así las emisiones de contaminantes generadas por el consumo de combustible fósil.

- Implementar beneficios tributarios que facilite la oferta vehículos con tecnologías híbridas o asociadas a la electromovilidad, que favorezca la reducción de las emisiones, de igual forma a vehículos pequeños, preferiblemente híbridos o eléctricos que contribuyan a descongestionar las vías, al ocupar menos espacio.

## Referencias

- Administración de la Comunidad Autónoma del País Vasco. (2019). *ECONOMÍA CIRCULAR DE EUSKADI 2030*. Donostia-San Sebastián: Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco.
- AEMET. (2018). *Meteoglosario Visual*.  
[https://meteoglosario.aemet.es/es/termino/360\\_calidad-del-aire](https://meteoglosario.aemet.es/es/termino/360_calidad-del-aire)
- Alcaldía de Medellín. (2011). *BIO 2030 PLAN DIRECTOR MEDELLÍN, VALLE DE ABURRÁ*. Medellín: MesaEditores.
- Alcaldía de Medellín. (2022). *medellin*.  
<https://www.medellin.gov.co/es/programas/movilidad-con-tecnologias-mas-limpias-y-nuevas-tendencias/>
- Alcaldía de Medellín. (22 de abril de 2022). *Medellin*. <https://www.medellin.gov.co/es/sala-de-prensa/noticias/en-medellin-ya-funciona-una-flota-100-electrica-para-la-linea-2-de-metroplus/#:~:text=Medell%C3%ADn%20cuenta%20con%2065%20buses,a%20tra%20v%C3%A9s%20de%20diez%20cargadores>
- Alcaldía de Medellín. (13 de noviembre de 2022). *Medellin*.  
<https://www.medellin.gov.co/es/secretaria-de-movilidad/pico-placa-medellin-segundo-semester-2022/>
- Alcaldía de Medellín. (2023). *Medellin*. <https://www.medellin.gov.co/es/conoce-algunos-datos-generales-de-la-ciudad/#:~:text=Villa%20Hermosa%2C%20La%20Mansi%C3%B3n%2C%20San,Las%20Estancias%2C%20Villa%20Lilliam>
- Alcaldía de Medellín. (s.f.). *medellin*.  
<https://www.medellin.gov.co/irj/go/km/docs/documents/ServiciosLinea/PlaneacionMunicipal/ObservatorioPoliticPublicas/resultadosSeguimiento/docs/pot/Documentos/medellinCentralidades.pdf>
- Alghamdi, H. (2022). A review of cementitious alternatives within the development of environmental sustainability associated with cement replacement. *Environmental science and pollution research international*, 29, 42433–42451.
- AMVA. (2019). *metropol*. Retrieved febrero de 2022, from  
<https://www.metropol.gov.co/area/Paginas/somos/Historia.aspx>
- AMVA. (3 de Septiembre de 2021). *metropol*.  
<https://www.metropol.gov.co/Paginas/Noticias/pico-y-placa-empezara-a-regir-a-partir-del-6-de-septiembre.aspx>
- AMVA. (2022). *Metropol*. <https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/PublishingImages/ambientales/calidad-del-aire/generalidades/condiciones-especiales/Infograficos%20Aire%20Cuadrados-06.png>
- AMVA, O. A. (4 de marzo de 2021). *metropol*.  
<https://www.metropol.gov.co/Paginas/Noticias/el-valle-de-aburra-tiene-listo-su-diagnostico-para-enfrentar-el-cambio-climatico.aspx>
- AMVA-UPB. (2017). *PIGECA - Plan Integral de Gestión de la Calidad del Aire para el Área Metropolitana del Valle de Aburrá*. Washington D.C.: Clean Air Institute.

- Andi. (2022). *ANDI - Asociación Nacional de Empresarios de Colombia*. Retrieved 11 de 02 de 2022, from <http://www.andi.com.co/>
- ANDINA, C. D. (2008). *DECISION 706 Armonización de legislaciones en materia de productos de higiene*. LIMA - PERÚ: Comunidad Andina.
- ANLA. (2018). *anla*. <http://portal.anla.gov.co/registro-y-seguimiento-detergentes-y-jabonesuso->
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá . (2019). *Metropol*. Retrieved febrero de 2022, from <https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/Paginas/Generalidades/ICA.aspx>
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá - AMVA. (2018). <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiODM3M2Y2N2EtMTY1NS00ODg5LTllYzYtNjlmOWM5ZTU1YTg2IiwidCI6IjRkZWI0ZjAwLTNhOTgtNDcwMi04Nzk2LTlxNmRiMDljMzA3YyIsImMiOiR9&pageName=ReportSection4eb34d929a6077a2e767>
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2009). *SIMULACIONES ESPECIALES TAREA 1: ACTUALIZACIÓN DEL INVENTARIO DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS*. Universidad Pontificia Bolivariana.
- Área metropolitana del Valle de Aburrá. (2016). *PLAN METROPOLITANO DE GESTIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES*. Metropol.
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2018). *ACTUALIZACIÓN INVENTARIO DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS DEL VALLE DE ABURRÁ AÑO 2018*.
- ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ. (2018). *Actualización Inventario de Emisiones Atmosféricas del Valle de Aburrá - 2018*. Universidad Pontificia Bolivariana.
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2019). *metropol*. Retrieved 02 de 2022, from <https://www.metropol.gov.co/ambientales/calidad-del-aire/generalidades/condiciones-especiales>
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2019). *Metropol*. <https://www.metropol.gov.co/Paginas/Noticias/el-valle-de-aburra-tiene-listo-su-diagnostico-para-enfrentar-el-cambio-climatico.aspx>
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2019). *Metropol*. <https://www.metropol.gov.co/movilidad/Paginas/movilidad-activa/acciones-de-promocion/planes-mes.aspx>
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2019). *METROPOL*. <https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/>
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2021). *YouTube*. Historia del Área Metropolitana del Valle de Aburrá: <https://www.youtube.com/watch?v=YLWQnXLrwLE&t=67s>
- Auto Crash. (9 de mayo de 2019). *revistaautocrash*. <https://www.revistaautocrash.com/que-son-las-normas-euro-y-por-que-evolucionan/>
- Autoridad Nacional de Licencias Ambientales ANLA. (19 de Marzo de 2021). *storymaps.arcgis*. Retrieved 02 de 11 de 2022, from <https://storymaps.arcgis.com/stories/4ad53ca81a384c7793910e80271c4874>
- Banco Mundial. (20 de abril de 2020). *bancomundial*. Retrieved febrero de 2022, from <https://www.bancomundial.org/es/topic/urbandevelopment/overview#1>

- Bedoya, J., & Martínez, E. (2009). CALIDAD DEL AIRE EN EL VALLE DE ABURRÁ ANTIOQUIA -COLOMBIA. *Dyna*, 76(158), 4-15.
- Beleño Montagut, L., Colegial Gutierrez, J. D., & Barrera Perez, M. L. (2020). Correlación entre el flujo vehicular, el PM<sub>2,5</sub> y variables meteorológicas, un estudio de caso al oriente de Bucaramanga (Colombia). *BISTUA*, Vol. 18 (2), (2020) 15-25.
- Bernal, V. C. (17 de Julio de 2021). *El Espectador*. <https://www.elespectador.com>
- Biointropic. (2018). *ANÁLISIS SECTOR COSMÉTICO Y ASEO*. Medellín.
- Biomitech. (2019). *solumeksa*.  
<https://www.solumeksa.com/pdf/2.%20Ficha%20T%C3%A9cnica%20BioUrban%202.0.pdf>
- Biomitech. (2021). *Biomitech*. <http://biomitech.org/>
- Caballero, M., Lozano, S., & Ortega, B. (2017). Efecto invernadero, calentamiento global y cambio climático: una perspectiva desde las ciencias de la tierra. *Revista Digital Universitaria Volumen 8 Número 10*, 1-12.
- Cadavid Giraldo, N., Orrego Guarín, A. Z., & Barrera Jimenez, H. (2021). Calidad del aire en el Valle de Aburrá, ¿Qué podríamos esperar de la ciudad inteligente? *Ingeniería y Ciencia*, 17(33), 185-222. <https://doi.org/10.17230/ingciencia.17.33.8>
- Capital, W. S. (2022). *Midiendo el impacto socioeconómico*. Conches-Geneva, Switzerland: WBCSD Social Capital.
- Casajuana, N. (10 de agosto de 2019). <https://www.revoprosper.org/2019/08/10/como-medir-el-bienestar-social-y-la-salud-del-planeta%EF%BB%BF/>
- Castán Broto, V., Allen, A., & Rapoport, E. (2012). *Interdisciplinary Perspectives on Urban*. Londres: University College London.
- CEPAL. (junio de 2019). *CEPAL*. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/44551-informe-avance-cuatrenal-progreso-desafios-regionales-la-agenda-2030-desarrollo>
- CEPAL NACIONES UNIDAS. (2022). *CEPAL*. <https://www.cepal.org/es/acerca/estados-miembros>
- CODASC. (2014). *Concentration Data of Street Canyon*. <http://www.ifh.uni-karlsruhe>.
- Comfenalco Antioquia. (2022). *Servicio de Información Local - Comfenalco Antioquia*. <https://infolocal.comfenalcoantioquia.com/index.php/comunas-y-barrios>
- Comisión Europea. (1 de agosto de 2019). *Comisión Europea*. Proyecto BURBA: Selección de abajo hacia arriba, recogida y gestión de residuos urbanos: <https://cordis.europa.eu/project/id/265177>
- COMISIÓN EUROPEA. (2019). *COMUNICACIÓN DE LA COMISIÓN AL PARLAMENTO EUROPEO, AL CONSEJO EUROPEO, AL CONSEJO, AL COMITÉ ECONÓMICO Y SOCIAL EUROPEO Y AL COMITÉ DE LAS REGIONES*. Bruselas.
- Comisión Europea. (11 de diciembre de 2019). *eur-lex*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=COM%3A2019%3A640%3AFIN>
- Comisión Europea. (22 de Julio de 2021). *Comisión Europea*. WATERSIGN: Monitoreo inteligente del agua y detección de fugas: <https://cordis.europa.eu/project/id/848537>
- Comisión Europea. (22 de marzo de 2022). *Comisión Europea*. ERA-Net Digitalización de Sistemas y Redes de Energía: <https://cordis.europa.eu/project/id/883973/es>
- Comisión Europea. (16 de marzo de 2022). *Comisión Europea*. Retrieved 18 de marzo de 2022, from 4. Películas de embalaje novedosas y textiles con final de vida a medida

- y rendimiento basado en copolímeros y recubrimientos de base biológica:  
<https://cordis.europa.eu/project/id/837761>
- Comisión Europea. (2022). *Comisión Europea*. Plan Estratégico de Tecnologías Energéticas: [https://energy.ec.europa.eu/topics/research-technology-and-innovation/strategic-energy-technology-plan\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/research-technology-and-innovation/strategic-energy-technology-plan_en)
- Comisión Europea. (16 de Marzo de 2022). *Comisión Europea*. Productos de construcción ecoinnovadores para la construcción sostenible en una economía circular: <https://cordis.europa.eu/project/id/946255>
- Condorchem. (2022). *condorchem*. Retrieved febrero de 2022, from <https://condorchem.com/es/blog/indicadores-de-sostenibilidad-ambiental/#:~:text=Entre%20los%20indicadores%20de%20sostenibilidad,una%20poblaci%C3%B3n%20comunidad%20u%20organizaci%C3%B3n>.
- Congreso de Colombia. (1998). *LEY 435*. Diario Oficial No. 43.241 de 19 de febrero de 1998.
- DANE. (2016). *Encuesta Anual Manufacturera -EAM-*.
- Decker, E. H., Elliott, S., Smith, F. A., Blake, D. R., & Rowland, F. S. (2000). Energy and material flow through the urban ecosystem. *Annual Review of Energy and the Environment*, 25: 685-740.
- Deloitte & Co. S.A. (2018). *Cadena de valor sostenible Una metodología de trabajo colaborativa*. Rosario Norte 407.
- Echeverri Londoño, C. A., & Jaime Maya Vasco, G. (2008). Relación entre las partículas finas (PM 2.5) y respirables PM 10) en la ciudad de Medellín. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 7(12), 23-42.
- EcoAct. (2022). *eco-act*. <https://eco-act.com/es/servicios/emisiones-de-alcance-3/#:~:text=o%20producci%C3%B3n%20agr%C3%ADcola,-,Las%20emisiones%20de%20Alcance%203%20son%20aquellas%20que%20provienen%20de,o%20uso%20de%20los%20productos>.
- ecoinventos. (13 de diciembre de 2019). *ecoinventos*. <https://ecoinventos.com/biourban/>
- Ellen MacArthur Foundation. (2012). *ellenmacarthurfoundation*. [https://ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/glossary?utm\\_source=linkedin&utm\\_medium=organic\\_social](https://ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/glossary?utm_source=linkedin&utm_medium=organic_social)
- Ellen MacArthur Foundation. (2021). *ellenmacarthurfoundation*. [https://ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/glossary?utm\\_source=linkedin&utm\\_medium=organic\\_social](https://ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/glossary?utm_source=linkedin&utm_medium=organic_social)
- EPA Cartagena. (2020). *EPA Cartagena*. <http://observatorio.epacartagena.gov.co/gestion-ambiental/calidad-ambiental/sistema-urbano/indice-de-la-calidad-del-aire/>
- Fernando Daniels, E. M. (2007). *Contaminación Atmosférica y efectos sobre la salud de la población Medellín y su área metropolitana*. Universidad de antioquia, antioquia.
- FIBK. (16 de mayo de 2022). *fundacionbankinter*. [https://www.fundacionbankinter.org/noticias/serie-tecnologias-limpias-transporte-sostenible/?\\_adin=02021864894](https://www.fundacionbankinter.org/noticias/serie-tecnologias-limpias-transporte-sostenible/?_adin=02021864894)
- FMI. (julio de 2021). *ifm*. <https://www.imf.org/es/Publications/WEO/Issues/2021/07/27/world-economic-outlook-update-july-2021>

- Fundación Naturgy. (2018). *La calidad del aire en la ciudades - Un reto mundial*. 28033 Madrid: Fundación Naturgy.
- Gandy, M. (2004). Rethinking urban metabolism: Water, space and the modern city, *City*, 8(3): 365-379.
- Getter, K., & Rowe, D. B. (2006). The role of extensive green roofs in sustainable. *HortScience*, vol. 41, N° 5: 1276-1285.
- Getter, K., Rowe, D. B., Robertson, G. P., Gregg, B. M., & Andresen, J. A. (2009). Carbon Sequestration potential of extensive green roofs. *Environmental Science & Technology*, vol. 43, N° 19, 7564-7570.
- girozero. (14 de septiembre de 2021). girozero. <https://girozero.uniandes.edu.co/blog/tecnologias-vehiculares-que-direccionan-en-transporte-automotor-de-carga-hacia-zero-emisiones>
- GREENHOUSE GAS PROTOCOL. (2022). *ghgprotocol*. <https://ghgprotocol.org/scope-3-evaluator>
- Greenvita. (09 de septiembre de 2019). *Greenvita*. <https://greenvita.com>
- Guerrero Rojas, N. K. (2020). *Alternativas Para La Reducción De Contaminantes Atmosféricos Emitidos Por El Sistema Vehicular En Bogotá D.C*. Bogotá: UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA.
- (2013). *Guía práctica sobre derechos humanos y empresas*. San José, Costa Rica: CEGESTI.
- Heinz, O., & Heinz, H. (2021). Cement Interfaces: Current Understanding, Challenges, and Opportunities. *Langmuir : the ACS journal of surfaces and colloids*, 37(21), 6347–6356.
- Holmgren, D. (2002). *PERMACULTURE Principles & Pathways Beyond Sustainability*. Permanent Publications.
- IDEAM. (2018). *IDEAM*. <http://sisaire.ideam.gov.co/ideam-sisaire-web/aprendizaje.xhtml?de=GLOSARIO>
- Ihobe, Sociedad Pública de Gestión Ambiental. (2018). *INDICADORES DE ECONOMÍA CIRCULAR EUSKADI 2018*. Bilbao: Ihobe, Sociedad Pública de Gestión Ambiental.
- Ihobe, Sociedad Pública de Gestión Ambiental. (2018). *INDICADORES DE ECONOMÍA CIRCULAR EUSKADI 2018 Marco de seguimiento europeo*. Ihobe, Sociedad Pública de Gestión Ambiental.
- INABIO. (2022). *inabio.biodiversidad*. <http://inabio.biodiversidad.gob.ec/gestion-de-la-informacion/>
- Inclán, D. J. (2022). ECUADOR: Instituto Nacional de Biodiversidad – INABIO. En N. Unidas, *Desafíos regionales en el marco del Acuerdo de Escazú - Gestión de la información sobre biodiversidad en países megadiversos* (págs. 35-37). Naciones Unidas.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC. (2011). *Norma Técnica Colombiana NTC 5131*. Bogotá, D.C.
- INTA para BIO4. (2016-2017). *Análisis de Emisiones Producción de Bioetanol y subproductos*. Lujan: Universidad de Lujan.
- IPCC. (2018). *Anexo I: Glosario [Matthews J.B.R. (ed.)]*. En: *Calentamiento global de 1,5 °C, Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5*

- °C con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias correspondientes que deberían segu. Francia/Reino Unido: Mustapha Babiker (Sudán), Heleen De Coninck (Países Bajos/Unión Europea), Sarah Connors (Francia/Reino Unido), Renée van Diemen (Reino Unido/Países Bajos), Riyanti Djalante (Japón/Indonesia), Kristie L. Ebi (Estados Unidos de América), Neville Ellis (Aus. Jakobson, M. M. (1999). *THE RELATION OF ECO-EFFECTIVENESS AND ECO-EFFICIENCY - AN IMPORTANT GOAL IN DESIGN FOR ENVIRONMENT*. Trondheim, Norway: The Norwegian University of Science and Technology.
- Janhäll, S. (2015). *Review on urban vegetation and particle air pollution e Deposition*. Swedish National Road and Transport Research Institute-VTI, Sweden.
- Jeanjean, A., Hinchliffe, G., McMullan, W., Monks, P., & Leigh, R. (2015). A CFD study on the effectiveness of trees to disperse road traffic emissions at a city scale. *Atmospheric Environment*, 120, 1-14.
- jesuiseduardo. (29 de agosto de 2022). *wikipedia*.  
[https://es.wikipedia.org/wiki/Comisi%C3%B3n\\_Econ%C3%B3mica\\_para\\_Am%C3%A9rica\\_Latina\\_y\\_el\\_Caribe#/media/Archivo:Economic\\_Commission\\_for\\_Latin\\_America\\_and\\_the\\_Caribbean\\_Member\\_States.svg](https://es.wikipedia.org/wiki/Comisi%C3%B3n_Econ%C3%B3mica_para_Am%C3%A9rica_Latina_y_el_Caribe#/media/Archivo:Economic_Commission_for_Latin_America_and_the_Caribbean_Member_States.svg)
- Jiménez Landín, H. (20 de febrero de 2019). *twitter*.  
<https://twitter.com/JimenezLandin/status/1098098248512954368>
- Jurado Falconi, E., Sáenz Yaya, D., Velásquez, M., Azáldegui Moscol, A., & Benavides Cavero, O. (2017). *Riesgos del uso de detergentes domésticos en la calidad del agua en poblaciones en transición de lo rural a lo urbano: Churín 2017*.  
<https://www.aulavirtualusmp.pe/ojs/index.php/AF/article/view/1763>
- Kristin, G., & D. Bradley, R. (2008). Selection plants for extensive green roofs in the United States. *Extension Bulletin*, 3047.
- Linares, C., & Díaz, J. (2008). Un buen indicador de la contraminación urbana por causas antropogénicas Las PM 2,5 y su afectación a la salud. *Ecologista*, 46-49.
- Medellín cómo vamos 2021. (2023). *medellincomovamos*.  
<https://www.medellincomovamos.org/territorio/area-metropolitana-del-valle-de-aburra#:~:text=El%20C3%81rea%20metropolitana%20del%20Valle,y%20Barbo sa%20en%20el%20norte>.
- Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *millenniumassessment*.  
<https://www.millenniumassessment.org/documents/document.439.aspx.pdf>
- MinAmbiente, República de Colombia. (2014).  
<http://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article/1385-plantillanegocios->
- MinAmbiente, SIAC. (12 de 11 de 2022). *IDEAM*.  
<http://www.ideam.gov.co/web/siac/emisionesaire#:~:text=La%20contaminaci%C3%B3n%20atmosf%C3%A9rica%20es%20generada,industrias%20servicios%20y%20veh%C3%ADculos>.
- Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible - República de Colombia. (2022). *minambiente*. <https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/residuos-de-aparato-electricos-y-electronicos-raee/>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). *POLÍTICA NACIONAL Gestión Integral de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos*.

- Ministerio de la Protección Social, República de Colombia. (2008). *RESOLUCION NÚMERO 1974 DE 2008*. Bogotá D. C.
- Ministerio de Salud y Protección Social, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, República de Colombia. (2016). *RESOLUCIÓN 0689 DE 2016*. Bogotá, D.C.
- Naciones Unidas. (2022). *Acuerdo Regional sobre el Acceso a la Información, la Participación Pública y el Acceso a la Justicia en Asuntos Ambientales en América Latina y el Caribe*. Naciones Unidas.
- Naciones Unidas. (2022). *Desafíos regionales en el marco del Acuerdo de Escazú - Gestión de la información sobre biodiversidad en países megadiversos*. Naciones Unidas.
- Naciones Unidas, Konrad-Adenauer-Stiftung e.V y BID. (2021). *Recuperación económica tras la pandemia COVID-19 empoderar a América Latina y el Caribe para un mejor aprovechamiento del comercio electrónico y digital*. Ciudad de Panamá, Panamá: CEPAL.
- Notimex. (Agosto de 2018). *noticiasncc*. <https://noticiasncc.com/cartelera/articulos-o-noticias/11/05/premio-uso-microalgas-purificar-aire/>
- Oliveros, G. F. (09 de octubre de 2015). *La Republica*. Retrieved 11 de 02 de 2022, from <https://www.larepublica.co>
- OMS. (2006). *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre*. Ginebra: Organización Mundial de la Salud.
- OMS. (2 de mayo de 2018). *who*. [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- OMS. (22 de Septiembre de 2021). *WHO*. [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- ONU. (2022). *un*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/infrastructure/>
- ONU Programa para el Medio Ambiente. (mayo 2020). *CARBONO CERO AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE*. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA).
- Onudi. (2015). *Dinámica comercial y económica del sector cosméticos e ingredientes naturales en Colombia*. Bogotá: Programa Safe.
- Ortiz, P. L. (2021). *INFLUENCIA DEL CALENTAMIENTO GLOBAL EN LOS ECOSISTEMAS TERRESTRES DEL PERÚ*. Cajamarca: UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA.
- Oxfam Internacional. (2021). *oxfam*. <https://www.oxfam.org/en/research/oxfam-poverty-footprint>
- Pardo, D. (27 de Junio de 2019). *tomorrow*. <https://tomorrow.city/a/metabolismo-urbano-cuando-las-ciudades-se-integran-en-el-entorno-natural>
- Pasquier, A., & André, M. (2017). *Considering criteria related to spatial variabilities for the assessment of air pollution from traffic*. Shanghai: Conferencia Mundial sobre Investigación en Transporte.
- PEIRON, M. (19 de 11 de 2018). *opcions*. <https://opcions.org>
- PORTAFOLIO. (10 de Febrero de 2022). *PORTAFOLIO*. <https://www.portafolio.co/economia/finanzas/comercio-menor-dinamica-de-consumo-por-la-alta-inflacion-en-colombia-561631>

- Posada Henao, J. J., Farbiarz Castro, V., & González Calderón, C. A. (2011). ANÁLISIS DEL “PICO Y PLACA” COMO RESTRICCIÓN A LA. *DYNA. Revista de la Facultad de Minas; Vol 78, No 165*, 112-121.
- Posada, E., Gómez, M., & Almanza, J. (2017). ANÁLISIS COMPARATIVO Y MODELACIÓN DE LAS SITUACIONES DE CALIDAD DEL AIRE EN UNA MUESTRA DE CIUDADES DEL MUNDO. COMPARACIÓN CON EL CASO DE MEDELLÍN. *Revista Politécnica*, 13(25), 9-29. <https://doi.org/ISSN 1900-2351>
- Procolombia. (15 de Mayo de 2020). *Procolombia*. Retrieved 11 de 02 de 2022, from <https://www.procolombia.co>
- Quijano Parra, A., Quijano Vargas, M. J., & Meléndez Gélvez, I. (2016). Influencia de la combustión vehicular en la calidad del aire de Pamplona-Colombia. *Bistua*, 14(1), 17-31. <https://doi.org/10.24054/01204211.v1.n1.2016.1929>
- Raworth, K. (febrero de 2012). *oxfam*. Oxford, UK: Oxfam GB for Oxfam International under. [https://www-cdn.oxfam.org/s3fs-public/file\\_attachments/dp-a-safe-and-just-space-for-humanity-130212-en\\_5.pdf](https://www-cdn.oxfam.org/s3fs-public/file_attachments/dp-a-safe-and-just-space-for-humanity-130212-en_5.pdf)
- República de Chile. (2015). *Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire*. <https://sinca.mma.gob.cl/index.php/pagina/index/id/glosario>
- República de Colombia. (1995). *Decreto 948 de 1995, Reglamento de protección y control de la calidad del aire*. Bogotá: Ministerio del Medio Ambiente.
- República de Colombia. (2012). *Diagnóstico Nacional de Salud Ambiental*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- República de Colombia. (2017). *RESOLUCIÓN 2254 DE 2017*. Bogotá: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- República De Colombia. (2018). *CONPES 3943*. Bogotá, D.C.: Departamento Nacional de Planeación.
- Revista Don Bodega. (2015). *Detergentes: Limpio Negocio. Sección En Campaña. Edición 33*. <http://donbodega.pe/en-campana/detergentes-limpio-negocio>
- Rodríguez Puentes, A. L. (2009). *Acción sin daño y reflexiones sobre prácticas de paz: una aproximación sobre la experiencia colombiana - Módulo 1*. Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia.
- ROJAS, N. K. (2020). *Alternativas para la reducción de contaminantes atmosféricos emitidos por el sistema vehicular en bogotá d.c.* Bogotá: Universidad Católica de colombia.
- Roupsard, P. A. (2013). Measurement in a wind tunnel of dry deposition velocities of submicron aerosol with associated turbulence onto rough and smooth urban surfaces. *Journal of Aerosol Science*, 12-24.
- Rowe, D. B. (2011). Green roofs as a mean of pollution. *Environmental Pollution*, 2100-2110.
- Salvo Tierra, A. A., & Flores Moya, A. (6 de diciembre de 2020). *El Español*. [https://www.lespanol.com/ciencia/medio-ambiente/20201206/peligros-ocultos-talar-arboles-ciudad-molestan/540946580\\_0.html](https://www.lespanol.com/ciencia/medio-ambiente/20201206/peligros-ocultos-talar-arboles-ciudad-molestan/540946580_0.html)
- Santamaría, J. M. (marzo-abril de 2008). *zonahospitalaria*. Retrieved febrero de 2022, from <https://zonahospitalaria.com/efectos-del-material-particulado-en-la-salud/#:~:text=Los%20principales%20efectos%20vinculados%20a,en%20caso%20de%20enfermedades%20cardiovasculares>.

- SHDB. (2019). *socialhotspot*. <http://www.socialhotspot.org/>
- SIATA. (2021). *SIATA*. [https://siata.gov.co/sitio\\_web/index.php/quienesSomos](https://siata.gov.co/sitio_web/index.php/quienesSomos)
- SIATA. (2022). *SIATA*. [https://siata.gov.co/siata\\_nuevo/](https://siata.gov.co/siata_nuevo/)
- SIKA. (2021). *CUBIERTAS VERDES VENTAJAS Y BENEFICIOS SOCIALES, AMBIENTALES Y ECONÓMICOS*. SIKA ARGENTINA S.A.I.C.
- sostenibleosustentable. (2022). *Sostenible o Sustentable*. <https://sostenibleosustentable.com/es/casas-ecologicas/arquitectura-sostenible-ecodisenos/>
- Statista. (02 de Febrero de 2022). *Statista*. Retrieved 11 de Febrero de 2022, from <https://www.statista.com/statistics/673641/global-market-value-for-natural-cosmetics/>
- Toledo Leyva, C. (27 de julio de 2022). *DW*. <https://www.dw.com/es/acuerdo-de-escaz%C3%BA-en-colombia-se%C3%B1al-de-una-nueva-pol%C3%ADtica-medioambiental/a-62619536>
- TotalEnergies. (2023). *TotalEnergies*. <https://services.totalenergies.es/nuestros-productos/tendencias-de-mercado/norma-euro-para-el-control-de-emisiones>
- UNESCO. (19 de octubre de 2005). *portal.unesco*. [http://portal.unesco.org/es/ev.php-URL\\_ID=31058&URL\\_DO=DO\\_TOPIC&URL\\_SECTION=201.html](http://portal.unesco.org/es/ev.php-URL_ID=31058&URL_DO=DO_TOPIC&URL_SECTION=201.html)
- Universidad de Almería. (2012). *SILENTVEG: Barreras vegetales autónomas y sostenibles para la mitigación acústica y compensación del CO2 en vías de transporte, con seguimiento telemático*. Almería: Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía.
- Universidad de Chile. (2021). *atmósfera*. [http://www.atmosfera.cl/HTML/glosario/glosario\\_02.html](http://www.atmosfera.cl/HTML/glosario/glosario_02.html)
- Universidad de Manizales. (s.f.). *investigacion.umanizales*. [https://investigacion.umanizales.edu.co/congreso\\_medio\\_ambiente/](https://investigacion.umanizales.edu.co/congreso_medio_ambiente/)
- Universidad EAFIT. (2018). *Informe Anual de Calidad del Aire 2018*. Universidad EAFIT.
- Universidad EAFIT. (2019). *Informe Anual de Calidad del Aire 2019*. Universidad EAFIT.
- Universidad EAFIT. (2020). *Informe Anual de Calidad del Aire 2020*. Universidad EAFIT.
- Universidad EAFIT. (2021). *Informe anual de Calidad del Aire 2021*. Medellín: Universidad EAFIT.
- UNO, U. U., DOS, D. D., TRES, T. T., & CUATRO, C. C. (10 de ENERO de 2022). *123*. 456.
- vamosahaceralgoporlatierra. (27 de febrero de 2019). *vamosahaceralgoporlatierra*. Retrieved febrero de 2022, from <http://vamosahaceralgoporlatierra.com/huella-de-carbono-calcula-la-tuya/>
- Vidal, A. (25 de julio de 2020). *carder*. Corporación Autónoma Regional de Risaralda: <https://www.carder.gov.co/calidad-del-aire/>
- WBCSD. (24 de agosto de 2006). *wbcds*. <https://www.wbcds.org/contentwbc/download/2328/29257/1>
- WBCSD. (2020). *Compromiso WASH: Principios rectores Un compromiso empresarial con WASH*. CEMDES Consejo Empresarial para el Desarrollo Sostenible del Ecuador.

- WBCSD. (2022). *World Business Council for Sustainable Development*.  
<https://www.wbcsd.org/Programs/Food-and-Nature/Water/Resources/Global-Water-Tool>
- Y. García, W. R. (2012). *scielo*. Matanzas, Cuba: Pastos y Forrajes vol.35 no.2 Matanzas.  
[http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0864-03942012000200001](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03942012000200001)
- Yin, K., Zhao, Q., Xuanqi, L., Shenghui, C., Lihong, H., & Tao, L. (2010). A new carbon and. *Chinese Geographical Science*, vol. 20, N° 2: 144-151.
- ZAPATA GIRALDO, V. (25 de Marzo de 2017). *Esfera Viva*.  
<https://esferaviva.com/calidad-del-aire-las-secuelas-del-parque-automotor/>

## 8 Anexos

**8.1.** La OMS expone que para el año 2016, el 91% de la población mundial vive en lugares donde no se respetan los valores guía de calidad del aire y estiman que la contaminación atmosférica local a nivel troposférico, tanto en las ciudades como en las zonas rurales de todo el mundo, provoca cada año tres millones de muertes humanas prematuras (Fundación Naturgy, 2018).

**8.2.** Una definición general de contaminación atmosférica es la presencia en la atmósfera de materia, sustancias o energía que puedan implicar riesgos o daños para la seguridad o la salud de los seres humanos, el medio ambiente y los bienes de cualquier naturaleza. Estos riesgos o daños se dan en las 3 escalas. La escala global, la escala meso o escala media, La micro-escala (Fundación Naturgy, 2018).

En relación con lo anterior y teniendo en cuenta las escalas de riesgos y daños generados por la contaminación atmosférica, según la clasificación dada por la fundación Naturgy (2018), éstos se clasifican de tres maneras:

- Escala global: Se refiere al efecto de calentamiento global (corto plazo) y cambio climático (efecto sostenido de largo plazo) producido por la acumulación masiva de gases y partículas de efecto invernadero (GEI), así como la destrucción de la capa de ozono estratosférico por las emisiones de compuestos halogenados, son ejemplos claros de las causas y consecuencias de los contaminantes emitidos (Fundación Naturgy, 2018).

- Escala media: Se refiere a aquellos contaminantes que debido a fenómenos meteorológicos viajan largas distancias (hasta miles de kilómetros) causando alteraciones en las condiciones de las zonas receptoras; el Valle de Aburrá ha venido consolidándose como aglomeración urbana, estructurada en función de la movilidad vehicular privada, debido a la baja cobertura de los medios de transporte público masivo. Esta situación ha generado una fuerte contaminación atmosférica, ocasionada principalmente por la emisión de gases de las fuentes móviles, y agravada por la difícil topografía del valle que dificulta la circulación y el reciclaje natural del aire (BIO 2030 PLAN DIRECTOR MEDELLÍN, VALLE DE ABURRÁ, 2011).

- Microescala:, Se refiere a aquellos que afectan directamente la calidad del aire a escala local como son las zonas urbanas, industriales o rurales, expuestas directamente a las emisiones de contaminantes que ellas mismas producen desde fuentes fijas y móviles.

**8.3.** Las Resoluciones, 2254 noviembre 01 de 2017 y 601 del 4 de abril de 2006, 2154 de 2010, el Decreto 948 DE 1995, las Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre, el Diagnóstico de Salud Ambiental del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Republica de Colombia, el CONPES 3943 Política Para El Mejoramiento De La Calidad Del Aire, el informe Anual de Calidad del Aire 2020 del Área Metropolitana del Valle de Aburrá y el Bio 2030 Plan Director Medellín, Valle De Aburrá; bajo parámetros de su marco legal en la

Constitución Política de Colombia, Enfoque u Objeto, Autoridades a cargo de la aplicación, Responsabilidad, Perspectiva, Regulaciones Base, Compromisos Nacionales en materia de Sustentabilidad y Cambio Climático, Estrategia Nacional de Desarrollo & Estrategia de Cambio Climático de Medio Siglo, así como también el Ecodiseño Producto, Diseño para la durabilidad, Diseño para la adaptabilidad y desensamblable, Ecodiseño de servicios, Producto como servicio, Actualización o reparación, Materialización del producto, Responsabilidad compartida, Industria 4.0 Para la EC, Marco De Referencia Y Monitoreo Del Progreso A La EC, Estrategias Circulares, Residuos, Residuos Sólidos Urbanos (RSU), Residuos Peligrosos (RP), Incentivos Y Beneficios Fiscales, Sanciones Administrativas y Exclusiones.

El CONPES 3943 es la herramienta política ideal para afrontar la contaminación del aire, porque tiene en cuenta que la exposición de la población a la contaminación del aire tiene efectos negativos en la salud, generando costos sociales y económicos representados en enfermedades, restricción en el desarrollo de actividades, atenciones por el sistema de salud y muertes; entre otras cosas, propone acciones para reducir las concentraciones de contaminantes en el aire a través de la renovación y modernización del parque automotor, la reducción del contenido de azufre en los combustibles, la implementación de mejores técnicas y prácticas en la industria, la optimización de la gestión de información, el desarrollo de la investigación, el ordenamiento del territorio y la gestión del riesgo por contaminación del aire (República De Colombia, 2018).

El Informe Anual de Calidad del Aire 2020, es la herramienta más relevante para el sector económico, porque tiene como tarea fundamental alertar en tiempo real a los organismos gestores de riesgos y a la comunidad, frente a la posible ocurrencia de un fenómeno natural que pueda generar una emergencia, es ahí donde las entidades gubernamentales y sociales pueden tomar decisiones que busquen salvaguardar la dinámica comercial del AMVA, también es importante tener en cuenta la calidad del aire que se ve afectada por las actividades humanas como generadoras de material particulado.

Este informe tiene por objeto el monitoreo, análisis en tiempo real de variables hidrológicas, meteorológicas, seguimiento de condiciones morfodinámicas y sísmicas, y de calidad del aire y demás variables atmosféricas que permitan hacer el análisis holístico en el territorio metropolitano y la región vecina para la toma de decisiones e investigación científica y aplicada para la gestión del riesgo en el contexto de los subprocesos de conocimiento, reducción del riesgo y manejo del desastre mediante el desarrollo, fortalecimiento y operación del SIATA (Universidad EAFIT, 2020).

El instrumento social más adecuado para el estudio de la calidad del aire son las Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre; es un instrumento de gestión social para la evaluación de riesgos ambientales en cuanto a material particulado y gases de efecto invernadero que afectan directamente la calidad del aire.

Estas guías de la calidad del aire de la OMS tienen por objeto ofrecer orientación sobre la manera de reducir los efectos de la contaminación del aire en la salud (OMS, 2006). Para el sector tecnológico del manejo de la calidad del aire, se toma la Resolución 2254 de

noviembre 01 de 2017, en donde se establece la norma de calidad del aire o nivel de inmisión y adopta disposiciones para la gestión del recurso aire en el territorio nacional, con el objeto de garantizar un ambiente sano y minimizar el riesgo sobre la salud humana que pueda ser causado por la exposición a los contaminantes en la atmósfera (República de Colombia, 2017).

Este instrumento de gestión social es primordial, en cuanto a que establece los niveles máximos permisibles de contaminación del aire, si bien esto no es un aliciente en cuanto a la generación de estos contaminantes, el cual debe ser cero, es un límite y control a la generación de estos materiales particulados que afectan la salud humana y condicionan las dinámicas sociales, es ahí donde el componente tecnológico debe hacerse presente en la implementación de nuevos modelos de gestión especializados, que generen menos agentes contaminantes.

En el sector ambiental se ha escogido como documento base de estudio, el Diagnóstico nacional de salud ambiental, el cual enfatiza en la contaminación hídrica, la contaminación atmosférica, las radiaciones no ionizantes, los residuos sólidos y peligrosos, y las sustancias tóxicas. En Colombia existe un interés creciente relacionado con la problemática y degradación ambiental que genera la contaminación atmosférica; esta preocupación ha tomado fuerza en los últimos años debido al incremento de los efectos que se han causado a la salud de las personas y al ambiente, más aún cuando es conocido que las pérdidas causadas anualmente en el país por la contaminación local del aire ascienden a 5,700 billones de pesos (República de Colombia, 2012). Este impacto de pérdidas humanas y de contaminación ambiental repercute en el ecosistema inmediato que determina la acción a establecer medidas de control y seguimiento de actividades que frene la degradación ambiental.

El Decreto 948 de 1995, Reglamento de protección y control de la calidad del aire es el documento base para el sector legal del tema de estudio de este trabajo de grado, porque este decreto tiene por objeto definir el marco de las acciones y los mecanismos administrativos de que disponen las autoridades ambientales para mejorar y preservar la calidad del aire, evitar y reducir el deterioro del medio ambiente, los recursos naturales renovables y la salud humana, ocasionados por la emisión de contaminantes químicos y físicos al aire; a fin de mejorar la calidad de vida de la población y procurar su bienestar bajo el principio del desarrollo sostenible (República de Colombia, 1995). Si bien esta resolución ha tenido modificaciones a través de los años, es una herramienta de punto de partida de la reglamentación del aire, puesto que se establece las definiciones de todo lo relacionado al aire, su contaminación y mejoramiento de su calidad.

**8.4.** Los procesos del SIATA consisten, en primer lugar, el monitoreo para la gestión de riesgos: Cuenta con una extensa red de sensores, instalados en todo el Valle de Aburrá, que monitorean las condiciones y variables ambientales del territorio.

En segundo lugar, hace uso de la Modelación numérica y estadística: Realiza simulaciones basadas en modelos que determinan la probabilidad de eventos de lluvia próximos y la forma en que se traduce esto en términos de niveles y cuencas. La modelación

hidrológica simula los procesos del suelo, en cuanto al flujo de agua, desde la caída de la lluvia hasta la salida por un punto de la cuenca. Para esto se sirven de los datos de pendientes, tipos de suelo y coberturas.

En tercer lugar, posee una Investigación aplicada, en donde desarrolla diversas investigaciones que contribuyen al fortalecimiento del proyecto, soportadas por trabajos de grado, trabajos de maestría y tesis doctorales. Así mismo, trabaja en el desarrollo de tecnología local, es decir, el desarrollo y adaptación de sensores de acuerdo a las necesidades del territorio.

Cuarto está el Monitoreo para la Educación y trabajo comunitario: Genera procesos educativos y de divulgación científica y tecnológica, a partir de una propuesta de apropiación social del conocimiento científico. Además, traza las directrices para que los habitantes de cada comunidad en riesgo puedan responder de manera oportuna ante una emergencia; el desarrollo de estos procesos se enmarca en los semilleros de ciudadanos científicos en instituciones educativas.

Por último, está la Generación de Alertas tempranas: Los Sistemas de Alerta Temprana Comunitarios -SATC- son estrategias territoriales que reconocen al ciudadano como protagonista de la gestión del riesgo. Nos integramos a esta estrategia, al entregar información oportuna y eficaz a las comunidades en situación de vulnerabilidad, y al apoyar la construcción de los Planes Comunitarios de Gestión del Riesgo de Desastres - PCGRD-, desarrollados por el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (SIATA, 2021).

**8.5.** El mejoramiento de las condiciones ambientales exige la oferta de alternativas que reduzcan las emisiones de gases de efecto de invernadero y de contaminantes atmosféricos de los vehículos; además, determina la necesidad de controlar tanto la fragmentación del espacio público como las emisiones de ruido generadas por el transporte (BIO 2030 PLAN DIRECTOR MEDELLÍN, VALLE DE ABURRÁ, 2011).

**8.6.** Viabilidad de Alternativas de Contrarrestar los Picos de Contaminación Ambiental

A continuación se detallan los avances investigativos y tecnológicos más consecuentes con el tema central de este trabajo de grado, los cuales son árboles artificiales purificadores de aire, barreras vegetales y techos verdes, que aportan a la construcción de nuevo conocimiento enfocado en la contribución de una dinámica sostenible del metabolismo urbano y plantear lineamientos de aplicación de tecnologías, en el barrio Belén de Medellín, con el fin de establecer una red de acción que pueda actuar durante los picos de mayor contaminación, reduciendo los índices contaminantes que afectan la calidad del aire del área metropolitana del valle de Aburrá.

**8.6.1. Árboles Artificiales Purificadores de Aire.** La investigación de antecedentes de manejo de la calidad del aire se inicia con la ciudad de México y Puebla en México, en donde se usa tecnología de microalgas para purificar el aire por parte de la empresa mejicana

Biomitech, la cual ganó el Innovation Award en la Expo Contaminación 2018, en la ciudad de Birmingham con un sistema de filtración de aire con microalgas (Notimex, 2018).

La finalidad del uso de este sistema de filtración de aire tiene los impactos sociales como la rehabilitación de espacios públicos con altos índices de contaminación, como sumideros de carbono inteligentes; las empresas pueden comunicar su compromiso con el medio ambiente a través de donaciones y/o exposición de su marca en puntos de captura; se contribuye a las iniciativas contra el cambio climático de ONU a través de programas intensivos de reforestación; se apoya la economía circular, transformando contaminantes en biomasa que, procesada, se puede utilizar como fertilizante para las zonas verdes aledañas; se reduce la huella de carbono a partir del aporte a la red eléctrica del excedente de consumo de cada BioUrban y se generan datos sobre la contaminación ambiental en tiempo real (Biomitech, 2021).

Este prototipo de purificador de aire es conveniente para implementar en espacios urbanos, donde físicamente no hay espacio para plantar los suficientes árboles para procesar la cantidad de material particulado que se generan, en el caso del Barrio Belén, es pertinente implementar este prototipo en las vías principales, como la calle 30, donde se encuentra el mayor tráfico de vehículos y por consiguiente el mayor volumen de partículas contaminantes suspendidas en el aire.

**8.6.2. Barreras vegetales. SILENTVEG:** Barreras vegetales autónomas y sostenibles para la mitigación acústica y compensación del CO<sub>2</sub> en vías de transporte, con seguimiento telemático, es un estudio realizado por la Universidad de Almería (2012), que consiste en la aplicación de muros verdes en los procesos constructivos, permitiendo establecer una clasificación de los sistemas utilizados en dos grandes grupos: fachadas vegetales y paredes vivas. Dentro de las fachadas vegetales, pueden realizarse la implantación de la vegetación con trepadoras, o bien con doble piel, con plantas trepadoras y jardineras perimetrales; por su parte, el sistema de paredes vivas suele realizarse con geotextiles, o bien con paneles cultivados. En la puesta en marcha del proyecto piloto, se tuvo como objetivo hacer uso de barreras vegetales para la reducción de contaminación acústica y de CO<sub>2</sub> en vías de transporte, tal como comentan los autores uno de los problemas fue la de poder adaptar la vegetación a elementos inertes, para esto dispusieron de plantas autóctonas que requerían menos mantenimientos garantizando la funcionalidad del sistema. Dentro del desarrollo de este trabajo tuvieron en cuenta conceptos de drenajes, geotextiles y sustratos de cultivo, realizando control de emisiones de carbono y también analizando el comportamiento de las masas de aire mediante imágenes computarizadas (ROJAS, 2020).

Las barreras vegetales se deben realizar en procesos comunitarios, con impacto social, concibiendo los muros verdes y las fachadas vegetales como valor agregado en las edificaciones, en donde la comunidad se capacite en el mantenimiento de esta vegetación, con especies nativas y en algunos casos se puedan adoptar el cultivo de hortalizas, que sea atractivo como aporte a la canasta familiar, en donde la comunidad funcione como actor en la producción de alimentos. Pero el fondo de la implementación de esta iniciativa sea la compensación de CO<sub>2</sub> y por ende al mejoramiento de la calidad del aire, así como también

el aumento de la calidad de vida de los habitantes del barrio Belén. Este barrio ya consolidado puede implementar estrategias de adaptación física de estas alternativas de cultivo en edificaciones ya existentes, lo cual no requiere un cambio estructural.

**8.6.3. Techos verdes.** Los techos verdes desde un punto de vista técnico, es una tecnología para el techado de una construcción en la cual las plantas son consideradas como un material importante (Getter & Rowe, 2008), estos techos verdes, proveen algunos beneficios ecológicos, económicos y sociales como el manejo de aguas de tormenta, conservación de la energía, mitigación de los efectos de isla de calor urbana, incremento en la duración de las cubiertas, mitigación del ruido y la contaminación del aire, y el incremento de la biodiversidad urbana, adicionalmente, pueden proveer de un entorno más amigable y estético para los lugares de trabajo y vivienda (Getter, Kristin; Rowe, D. Bradley; Robertson, G. P; Gregg, B. M.; Andresen, J. A., 2009). Consecuente a esto es relevante mencionar el trabajo realizado por Yin et al (2010), en donde se resumió la aplicación de la teoría del consumo de oxígeno inducido por el hombre y la emisión de carbono en la región urbana y, sobre esta base, se construyó un nuevo modelo de balance urbano de carbono y oxígeno (UCOB) mediante el cálculo de los flujos de carbono y oxígeno.

El objetivo era resaltar el papel de la vegetación en los ecosistemas urbanos y evaluar los efectos de diversas actividades humanas en el consumo anual de oxígeno urbano y la emisión de carbono. Con suerte, el modelo sería útil en teoría para mantener el equilibrio regional de carbono y oxígeno, y brindar orientación y apoyo para la planificación de la vegetación urbana en el futuro. Para probar el modelo UCOB, se seleccionó como estudio de caso el distrito Jimei de la ciudad de Xiamen, provincia de Fujian, China, una región urbana muy típica. Los resultados muestran que el servicio de vegetación de Jimei en emisión de oxígeno y secuestro de carbono no pudo satisfacer la demanda de la población urbana, y se deben agregar más de 31,49 veces el área de vegetación para satisfacer todo el consumo de oxígeno en Jimei mientras que 9,60 veces el área de vegetación es necesaria para cumplir con los objetivos de secuestro de carbono.

Los resultados muestran que el nuevo modelo UCOB tiene un gran potencial para ser aplicado a la planificación cuantitativa de la vegetación urbana y los mecanismos regionales de eco-compensación. En consecuencia, se debe tener en cuenta que la expansión del consumo de suelo urbano supera el crecimiento de la población hasta en un 50%, lo que se espera que en tres décadas añada al mundo 1,2 millones de km<sup>2</sup> de nueva superficie urbana. Esa expansión ejerce presión sobre la tierra y los recursos naturales, lo que produce resultados indeseables: las ciudades son responsables de dos tercios del consumo mundial de energía y de más del 70 % de las emisiones de gases de efecto invernadero (Banco Mundial, 2020).

Se debe adoptar culturalmente el uso de los techos verdes e implementarse para compensar la huella de concreto que se genera sobre la superficie de la tierra, lo cual según el Plan de Ordenamiento Territorial POT de Medellín, la densidad habitacional predominante es alta y en el caso puntual del barrio Belén es de media; la opción de implementar esta alternativa es viable, en el sentido que se mitiga de manera constante el material suspendido en el aire, se pueden hacer cultivos que generen recursos para los habitantes de las viviendas

y las edificaciones, así mismo se suma a la tendencia de la permacultura, que según Bill Mollison y David Holmgren (2002) es un sistema de diseño enfocado al uso sustentable de la tierra para lograr una vida sostenible, lo cual se enfoca en las oportunidades de apropiarse de espacios para producir vegetación que aumente la huella verde en las ciudades y como valor agregado se pueda beneficiar a la población mediante el suministro de alimentos producidos a corta distancia, disminuyendo así la cadena de contaminación que se genera en el transporte de alimentos desde puntos lejanos en vehículos que consumen combustible de origen fósil.