

## Aspectos relevantes de la movilidad y su relación con el medio ambiente en el Valle de Aburrá: una revisión

Relevant aspects of the mobility and its relation with environment in the Valle de Aburrá: a review

Beatriz Elena Pineda\*

*Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, PCJIC (Colombia)*

Claudia Helena Muñoz\*\*

*Universidad de Antioquia*

Harveth Gil\*\*\*

*Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, PCJIC (Colombia)*

\* Grupo de Investigación de Ingeniería Civil (Gridic), Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid PCJIC, Carrera 48 n.º 7-151, Medellín, Colombia. [beatrizpineda@elpoli.edu.co](mailto:beatrizpineda@elpoli.edu.co)

\*\* Escuela Ambiental, Universidad de Antioquia. UdeA, Calle 70 n.º 52-21 Of. 20-248, Medellín, Colombia. [orcid.org/0000-0003-4961-5308](https://orcid.org/0000-0003-4961-5308). [claudia.munoz1@udea.edu.co](mailto:claudia.munoz1@udea.edu.co)

\*\*\* Grupo de Investigación Innovación y Sostenibilidad Aplicadas a las Infraestructuras en Ingeniería-ISAI, Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid PCJIC, Carrera 48 n.º 7-151, Medellín, Colombia. [hghil@elpoli.edu.co](mailto:hghil@elpoli.edu.co)

**Correspondencia:** Harveth Gil. [hghil@elpoli.edu.co](mailto:hghil@elpoli.edu.co)

## Resumen

Debido al creciente número de la población vehicular en las ciudades y la necesidad de realizar desplazamientos urbanos, se han generado perjuicios a la sociedad como, por ejemplo, la contaminación ambiental y la congestión del tráfico vehicular. Este artículo presenta una revisión bibliográfica del estado del arte de los aspectos más importantes de este problema, investigaciones que se han realizado para reducirlo y, en particular, las estrategias propuestas aplicadas en Medellín por parte del Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Finalmente, se realiza una comparación con las diferentes aproximaciones que se han implementado en algunas ciudades del mundo altamente pobladas.

**Palabras clave:** contaminación, medio ambiente, movilidad urbana.

## Abstract

Due to the growing number of vehicular population in the cities and the need to carry out urban displacements, it has been generated harm to the society such as environmental pollution and traffic congestion. This article presents a review of the most important aspects of this problem, research that have been done to reduce them and in particular, strategies proposed by Metropolitan area of the Valle de Aburrá applied to Medellín city. Finally, a comparison was made of the different approaches implemented in some highly populated cities.

**Keywords:** environment, pollution, urban mobility.

*Fecha de recepción:* 26 de septiembre de 2017  
*Fecha de aceptación:* 16 de marzo de 2018

## I. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas se han experimentado unos niveles de contaminación atmosférica por encima de las normas permitidas por la Organización Mundial de la Salud (OMS). Por esta razón, investigadores ambientales realizan esfuerzos encaminados a cuantificar los contaminantes y analizar los posibles efectos sobre la salud de las personas, sobre los materiales y sobre el ecosistema en general. Una de las fuentes de contaminación atmosférica proviene del sector transporte, área que ha representado un problema ambiental para el Valle de Aburrá, como consecuencia de la necesidad de movilidad de pasajeros y de carga.

Dado lo anterior, dos de los retos más importantes en el propósito de lograr un transporte sostenible en la actualidad, son la contaminación urbana con motivo del rápido crecimiento de las ciudades y su industrialización [1], y el cambio climático global causado, principalmente, por el incremento en la concentración de los gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera [2].

Los problemas originados por el tráfico vehicular dan origen a la necesidad de encontrar soluciones técnicas tales como el uso de combustibles bajos en azufre y convertidores catalíticos [2]. Algunos investigadores argumentan que a fin de reducir las emisiones provenientes del transporte es imperativo encontrar soluciones técnicas en cuanto a la eficiencia de combustibles, así como promover el cambio a combustibles alternativos, como, por ejemplo, los biocombustibles y los sistemas de energía renovable [3]-[7]. También son necesarias las soluciones en el ámbito de las buenas técnicas de conducción que hagan más eficiente el funcionamiento de los vehículos. Según Sams *et al.* [8] existe una diferencia entre las emisiones de un vehículo en condiciones de velocidad estable y las de aquellos que no la mantienen (la mayoría de los casos en las ciudades).

El objetivo de este trabajo es llevar a cabo una revisión sobre la problemática de la contaminación vehicular, cómo se ha manejado en el Valle de Aburrá y cuáles son las soluciones que se encuentran a nivel mundial, enfocadas en la utilización de medios de transporte más sostenibles, lo cual permita proporcionar un contexto local de posibles mejoras en la disminución de los niveles de contaminación.

## II. MARCO TEÓRICO

### A. Contaminantes atmosféricos

La utilización de combustibles fósiles utilizados en el transporte produce una mezcla compleja de contaminantes a los que la población está expuesta en la vida urbana. Las características precisas de la mezcla dependen tanto de las diferentes fuentes de contaminación como del tráfico vehicular y la generación de energía. Todas las mezclas contienen ciertos contaminantes gaseosos primarios – como el dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) y el monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ) – que son directamente emitidos por la fuente de combustión [8]. Además, todos los procesos de combustión producen partículas, las cuales – en su mayoría – son tan pequeñas que pueden ser inhaladas bien sea como emisiones primarias (tales como hollín producido por diesel), o bien como partículas secundarias a través de la transformación atmosférica (como, por ejemplo, las partículas de sulfato formadas a partir de la quema de combustible que contenga azufre) [9].

El material particulado (PM) es el nombre que se usa para todas las partículas sólidas y líquidas encontradas en el ambiente. En otras palabras, son aquellas que pueden estar suspendidas en el aire y se transportan por él antes de depositarse [10]. El rango de tamaño del PM va desde partículas visibles al ojo humano, hasta partículas que son microscópicas. El PM se crea mediante procesos naturales (p. ej., polvos de suelos), y por actividades humanas (p. ej., los productos de combustión en automóviles, plantas eléctricas y actividades domésticas).

El PM puede categorizarse de acuerdo con el tamaño de la partícula. La fracción “gruesa” (diámetro medio entre 2,5 y 10  $\mu\text{m}$ ) puede surgir de la erosión del suelo y otros procesos mecánicos. La fracción “fina” (diámetro medio entre 0,1 y 2,5  $\mu\text{m}$ ) se asocia con las actividades humanas, pero también están incluidas allí las bacterias. Estas partículas por lo general permanecen suspendidas en la atmósfera por largos periodos de tiempo, mucho más que la fracción gruesa. Mientras que partículas menores a 0,1  $\mu\text{m}$  de diámetro se refieren como “ultrafinas”.

En el caso de Medellín, el 80 % de las partículas contaminantes ( $\text{PM}_{2,5}$ ) las aportan las fuentes móviles y los vehículos [11], no solo por el combustible,

sino también por el desgaste de las llantas, de los frenos y de las vías. Su tamaño hace que sean 100 % respirables, por lo que penetran el aparato respiratorio, se depositan en los alvéolos pulmonares y pueden llegar al torrente sanguíneo. Pero además de ser más agresivas para la salud, su tamaño hace que también sean más livianas y, por ende, generalmente permanecen por más tiempo en el aire.

## **B. Combustibles colombianos**

En la medida en que el parque automotor de la ciudad continúe en constante crecimiento, la contaminación del aire cobrará cada vez mayor importancia en cuanto a la regulación y las políticas urbanas. El 20 % de la contaminación producida por los vehículos automotores proviene de los vapores producidos por la gasolina, con un 20 % constituido por los hidrocarburos con pequeñas cantidades de CO y NO<sub>x</sub>. En los vehículos nuevos, el 95 % de la contaminación proviene de la formación de hidrocarburos como CO<sub>2</sub> y el CO [12].

Los combustibles colombianos han presentado un contenido de azufre exageradamente elevado para el sector automotor. Hace algunos años se tenían combustibles del orden de 4500 partes por millón (ppm) de azufre, cuando en Europa se tenían combustibles con 10 ppm de azufre. En la actualidad, esta situación ha mejorado, en parte por la presión que han ejercido diversos medios sobre Ecopetrol (principal compañía petrolera de Colombia), organización que ha realizado un esfuerzo importante para una mejora sustancial del combustible [13]. El contenido de azufre en el combustible diesel en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá bajó de 2100 ppm a 500, y luego a 50 ppm. Ese cambio implicó una disminución en la contaminación atmosférica valorado en 3 µg/m<sup>3</sup> de PM<sub>2.5</sub> [14].

Además de las mejoras en el combustible, es necesario implementar otras medidas de movilidad que incluyan estrategias como, por ejemplo, la disminución de las paradas de los vehículos o una forma de conducción más controlada, con el objeto de obtener una reducción más significativa en las partículas y así bajar de los 32 µ/m<sup>3</sup> de PM<sub>2.5</sub> de promedio anual que se presentan en Medellín, y estar cada vez más cerca de los 10 µg/m<sup>3</sup> de PM<sub>2.5</sub> de media anual que exige la OMS [15].

## C. Metodología

Con el fin de revisar el tema de la problemática de la contaminación ambiental del transporte vehicular se realizó una búsqueda completa de fuentes de información relacionadas con los tipos de contaminantes atmosféricos, fuentes naturales y antropogénicas, efectos sobre la salud de las personas y sobre los materiales expuestos al ambiente. Adicionalmente, se revisaron las estrategias que se han utilizado en diversos países del mundo con el propósito de disminuir la contaminación de vehículos en movimiento. Para esto, se utilizó una ventana de información de poco más de tres décadas atrás en bases de datos especializadas, así como información pública disponible del Área Metropolitana, lo que permitió encontrar estadísticas de transporte aplicadas a los municipios del Valle de Aburrá, y de esta forma realizar un análisis que permita contextualizar mejor la problemática a nivel local e identificar sus puntos claves.

## III. EFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN VEHICULAR

### A. Efectos en la salud

Cada vez que una persona respira, sus pulmones inhalan sustancias y partículas procedentes de la contaminación de automóviles, industrias u otras fuentes relacionadas con la actividad humana. Las vías se han convertido en una fuente importante de aglomerados de partículas, dado que son depósitos de diferentes materiales provenientes de la erosión del suelo, hollín, desgaste de llantas, frenos y otros procesos allí involucrados.

A fin de estudiar los efectos de la polución en la salud humana se deben analizar variables como, por ejemplo, la concentración del contaminante y la duración individual de la exposición, pero también son de gran importancia la variación espacial de la concentración de las partículas ( $PM_{10}$  o  $PM_{2.5}$ ) y la movilidad de los individuos [16].

Entre los principales contaminantes con capacidad de afectar la salud de los individuos se encuentran los que provienen de emisiones primarias o transformaciones atmosféricas. Los vehículos automotores son la fuente más importante de algunos de estos contaminantes (en particular el CO), óxidos de nitrógeno, hidrocarburos no quemados, ozono y otros oxidantes

fotoquímicos, plomo y, en menor proporción, las partículas suspendidas totales de bióxido de azufre y los compuestos orgánicos volátiles (VOC) [17].

Los contaminantes que más afectan a los individuos – además de los gases – son las partículas en suspensión producidas por vehículos grandes que transportan pasajeros o carga y operan con combustible diesel. Su peligrosidad está en relación inversa con su tamaño, pues cuanto más pequeñas son estas partículas más facilidad tienen de penetrar en el organismo humano. Las partículas con un diámetro de menos de 10  $\mu\text{m}$  pueden acceder a la parte superior del tracto respiratorio, y las partículas de menos de 2,5  $\mu\text{m}$  pueden llegar hasta los alvéolos pulmonares, por lo que son potencialmente más peligrosas. En Ciudad de México, en las últimas décadas, se reportan evidencias sobre la asociación entre los contaminantes atmosféricos y el incremento de las consultas de urgencias por enfermedades respiratorias [18].

La exposición a  $\text{PM}_{2.5}$  se ha asociado al aumento en la mortalidad y la morbilidad. Se ha encontrado, por ejemplo, que el  $\text{PM}_{2.5}$  urbano ha sido asociado en cerca de 28 000 mortalidades prematuras en Estados Unidos, Canadá y Cuba [9], [19]. La gestión de la calidad del aire a nivel internacional ha ponderado esta evidencia científica al focalizar las políticas de control en la reducción del  $\text{PM}_{2.5}$  y  $\text{PM}$  ultra fino. Algunos valores que estiman estudios de impactos en salud disponibles en el mundo muestran que un incremento en 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  in  $\text{PM}_{2.5}$  es asociado a 1,04 % de incremento en el riesgo de muerte [20].

## **B. Efecto sobre los materiales**

Los efectos perjudiciales de los contaminantes atmosféricos sobre los materiales ha sido objeto de estudio desde hace mucho tiempo [21]. El  $\text{SO}_2$  es el gas más corrosivo para los metales [22]. Este contaminante toma parte en una serie de reacciones que pueden resultar en la formación de óxidos cuya cantidad depende, a su vez, de la cantidad del gas presente en la atmósfera [23].

Las emisiones de  $\text{SO}_2$  reflejan el nivel de desarrollo industrial de las regiones, por lo que las atmósferas contaminadas con este gas se clasifican habitualmente como ambiente industrial o urbano [22]. Atmósferas rurales presentan velocidades de deposición de  $\text{SO}_2$  más bajas que 10  $\text{mg}/\text{m}^2\text{día}$ . Sin embargo, en atmósferas urbanas, dichos valores están en un rango entre 10 y 100  $\text{mg}/\text{m}^2\text{día}$ , mientras que para zonas industriales los valores

son más grandes que  $100 \text{ mg/m}^2\text{día}$  [24], [25]. Resultados de investigación registrados en Medellín demuestran que en estaciones categorizadas como “ambiente urbano”, la deposición del PM y  $\text{SO}_2$  inducen a efectos corrosivos apreciables en acero al carbono [26].

La mayor fuente del  $\text{NO}_2$  es la combustión a alta temperatura con la quema de combustibles fósiles, aunque también es significativa su liberación a través de la quema de la biomasa [22]. La concentración mínima estimada de  $\text{NO}_2$  para que induzca corrosión metálica se cree que está en  $30 \text{ mg/m}^3$  [27].

El PM también puede ser perjudicial para los materiales. Los efectos que ejercen las partículas al llegar al material incluyen acidificación o alcalinización de cualquier película de agua en la superficie, e incremento del tiempo de humectación por capilaridad o efectos higroscópicos. Las partículas actúan como sumideros para otros contaminantes activos como cátodos de las celdas de corrosión electroquímicas, o fuentes de celdas de aireación diferencial.

Con respecto a los procesos de corrosión, más importante que la velocidad de transporte de las partículas es su velocidad de deposición. Todas las partículas continuamente se acumulan en las superficies en ausencia de efectos mecánicos o de limpieza, aunque algunos elementos de las partículas pueden reaccionar con la superficie o con algunos contaminantes para formar nuevos productos.

Por otra parte, se ha encontrado que el  $\text{PM}_{10}$  evidencia un efecto cinético en la corrosión atmosférica del cobre [28] y en diferentes componentes electrónicos [29]. Asimismo, estudios que han utilizado técnicas electroquímicas sobre muestras de cobre y plata con PM depositado reflejan que la corrosión atmosférica es mayor con relación a muestras sin PM depositado [30].

#### **IV. ESTRATEGIAS PARA LA MITIGACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN VEHICULAR**

##### **A. Propuestas aplicadas en algunos países del mundo**

Existe gran preocupación a nivel mundial sobre el tema de la contaminación ambiental y es por esto que se han tomado diferentes medidas para atenuarlo. A continuación, se muestra una síntesis de algunas de dichas

medidas en diferentes lugares del mundo con el fin de que la movilidad conlleve a una menor contaminación ambiental.

Estados Unidos promulgó en 1955 la Ley para el Control de la Contaminación del Aire, lo cual supuso el comienzo del proceso de concienciación con respecto a este problema medioambiental. Mediante esta ley se planteó una serie de actuaciones encaminadas a la investigación científica y técnica acerca de los efectos del aire contaminado en la salud humana y sus posibles soluciones [31]. La Ley Británica del Aire Puro de 1956 supuso a nivel europeo un gran avance en este sentido, después de la gravedad del episodio de smog ocurrido en Londres en 1952. Posteriormente, la Ley del Aire Puro americana de 1963 (Clean Air Act) inició la puesta en marcha de soluciones relacionadas directamente con el tráfico vehicular como fuente de emisiones. Al ser la utilización de los combustibles fósiles la principal causa de contaminación, la investigación en el uso de energías alternativas se muestra como la solución más decidida para la reducción de las emisiones [31].

La contaminación del aire en Beijing era severa en la década de los noventa del siglo XX. En 1998, Beijing comenzó a reportar semanalmente la calidad del aire y se encontró que la contaminación debida al  $\text{NO}_x$  y CO en áreas de tráfico vehicular eran severas [32]. Con motivo de la organización de los Juegos Olímpicos en 2008, Beijing se enfrentó al reto de mejorar la calidad del aire y continuar con su desarrollo económico, e incrementó la cantidad de vehículos. A fin de lograrlo, se enfocó en el control de la contaminación por  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  y PM, y se tomaron medidas de control de emergencia como se observa en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Algunas medidas de control de emergencia en Beijing. Adaptado de [32]

Medidas	Control
Control de la contaminación por quema de carbón.	Promover el uso de carbón de alta calidad. Promover el uso de combustible limpio. Desulfurización en plantas.
	Establecimiento de distritos sin carbón. Uso de quemadores de bajo NOx en calderas industriales.
Control de la contaminación industrial.	Control de emisiones en plantas. Producción más limpia en las industrias. Cierre y remoción de plantas altamente contaminantes. Control de emisiones industriales.
Control de la contaminación vehicular.	Promover la chatarrización de vehículos. Inspección de vehículos en uso. Restricción urbana de vehículos con altas emisiones. Reemplazo por combustibles limpios en taxis y buses. Fortalecimiento de estándares de emisión para nuevos vehículos.
Control de la contaminación por polvo.	Control de polvo en sitios de construcción. Control de polvo en apilamiento de materiales. Plantación de árboles. Control de emisión de PM en la industria de materiales de construcción. Cierre de canteras.

Una alternativa importante en la reducción de la contaminación en Beijing fue la de retirar de la ciudad la mitad de los vehículos que en ella circulan (1,5 millones), a través de la medida del pico y placa [33].

En San Pablo, a pesar del aumento del 60% del parque automotor en las últimas dos décadas, los niveles de contaminación por CO, hidrocarburos y NO<sub>x</sub> en la Región Metropolitana se ha reducido significativamente. La mejora de la calidad del aire se da no solo por la migración de las industrias y por la expansión del sector de servicios, sino como resultado del Programa de Control de la Polución del Aire por Vehículos Automotores (Proconve), por el cual se incorporaron tecnologías en los fabricantes que redujeron las emisiones de contaminantes en más del 90 % en los automóviles y en 80 % en los camiones [34].

La movilidad y el transporte en Santiago de Chile reflejan un impacto ambiental negativo que se traduce en un incremento de la congestión y en el

aumento en las emisiones por habitante. Esto ha llevado a que se realicen obras de infraestructura que permiten la descongestión y la marcha hacia un plan de transporte público lo suficientemente eficiente para atraer a la ciudadanía. A partir del 2000 se comenzó a formar lo que se conoce como el Plan de Transporte para Santiago (PTUS). Al entrar en vigencia el PTUS, se retiraron 2000 buses, de manera que quedaron solo alrededor de 5500, todos con alta tecnología no contaminante [35].

En el estado de México, entre otras medidas, se señala la mejora en los combustibles y la limitación a la entrada al Distrito Federal de los autobuses, la ampliación de las líneas del metro, la incorporación parcial de turbocargadores en la ruta 100, entre otros. Asimismo, se concertó en la Ciudad de México un programa contra la contaminación ambiental denominado “Programa de Concertación DDF-Grupos Ecologistas”, en el que se busca desalentar voluntariamente el uso del automóvil mediante el impulso al programa “Hoy No Circula” [36].

## **B. Propuestas colombianas**

A nivel nacional y local se han diseñado e implementado diversas medidas de control en la última década. Estas medidas se han orientado correctamente y han permitido disminuir el aumento de la contaminación por PM. Sin embargo, es importante destacar que en un escenario de crecimiento económico sostenido, se requiere profundizar las medidas de control de emisiones a fin de reducir de forma significativa el PM.

Con la perspectiva de avanzar en la reducción de las emisiones vehiculares, en el sector transporte se avanza en los siguientes temas:

- Tecnologías de control de emisiones disponibles en el mundo que pueden ser implementadas: filtros antipartículas, cuya función es atrapar las partículas cancerígenas que emiten los motores diésel; tecnología Euro V (Diesel) con filtros antipartículas en vehículos livianos y medianos, ingreso al mercado de vehículos híbridos y motos eléctricas.
- Aplicación de normas de entrada más exigentes para los vehículos nuevos, a partir de la disponibilidad de mejores combustibles. Esto permitirá una mayor competitividad a la industria local. La Resolución 2604 de 2009 obliga a cumplir la norma Euro IV a partir del 1 de enero de 2013.

- Generación de incentivos que operen en función de las emisiones.
- Renovación del sistema de transporte público con incorporación de tecnologías de control y combustibles limpios para incentivar su utilización, de modo que se disminuya el uso del auto particular.

Una de las medidas que más se ha llevado a cabo en Colombia es la de restricción a la circulación de vehículos por medio del denominado “pico y placa”, en el que se prohíbe durante una fracción del día, dos veces a la semana, la circulación de aquellos vehículos particulares cuya placa termina en cierto número.

Por otra parte, por medio del Proyecto de Ley 023 de 2010 se pretende establecer medidas de todo tipo para la promoción e implementación de modos de transporte que incorporen tecnología de tracción eléctrica — nueva en Colombia —, y que por esto mismo no se ha contemplado, por ejemplo, para los casos de exención de pico y placa [37].

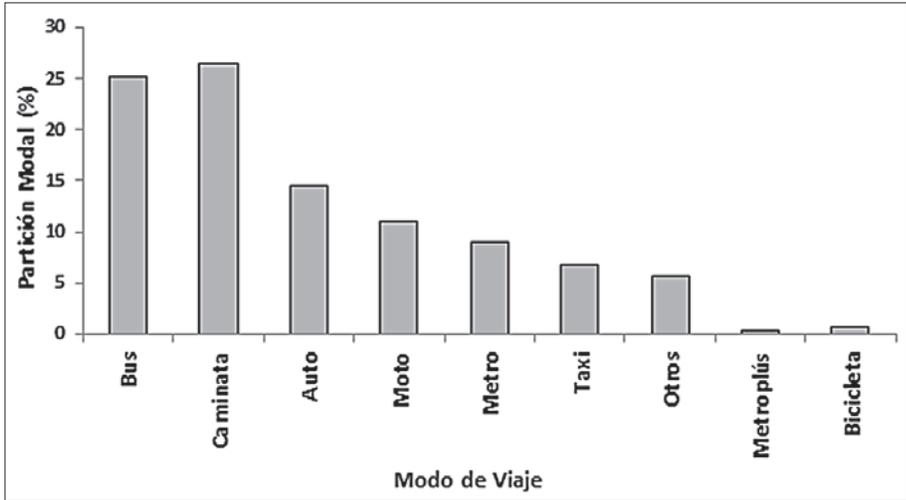
El programa nacional de chatarrización es otra medida de gestión nacional para mejorar la calidad del aire al ser un modelo de gestión integral de los vehículos en el que se generan múltiples beneficios ambientales [38].

### **C. Caso del Valle de Aburrá**

Es necesario delimitar geográficamente los problemas de movilidad a las áreas metropolitanas de los municipios capitales de departamentos, ya que la zona de influencia directa de una medida adoptada en cualquiera de ellos, afecta todo el entorno metropolitano. Por esto, desde el 2002, se declara el transporte de orden metropolitano.

La primera encuesta origen y destino de los municipios del Valle de Aburrá se realizó con aplicación completa del modelo de transporte en sus cuatro etapas: generación, atracción, distribución de viajes y repartición modal. Con este primer insumo, con los datos de población, los usos del suelo, la caracterización de la red vial y de transporte público y los conteos de velocidades, se calibró el modelo de planeamiento multimodal que permitió establecer el Plan Maestro de Movilidad para la Región Metropolitana del Valle de Aburrá, con las políticas de los diferentes modos de transporte en todo el territorio metropolitano hasta el 2020. En la Figura 1 se muestra

la partición modal de los viajes realizados en el Valle de Aburrá según la actualización del 2012.



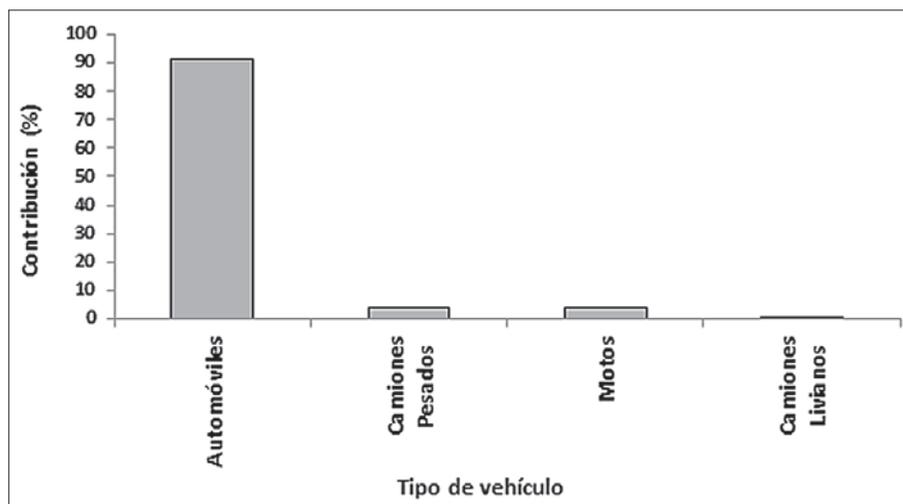
**Figura 1.** Partición modal de los viajes realizados en el Valle de Aburrá. Adaptado de la Encuesta Origen y Destino de Hogares 2012 [39].

Como se observa en la figura, entre los automóviles, los buses, las motos y los taxis se alcanza más del 50 % de los viajes realizados, hecho que contribuye directamente a la contaminación del Valle de Aburrá.

El Plan Maestro de Movilidad para la Región Metropolitana del Valle de Aburrá es un instrumento predictivo para la planificación estratégica e integrada de los diversos modos de transporte y del espacio público asociado. Permite, entre otros factores, estimar los impactos por emisiones atmosféricas contaminantes basados en la cuantificación de la variación de las emisiones totales generadas por el tránsito vehicular en consideración tanto de la situación base (año 2005) como de cada escenario de proyecto en los años 2010, 2015 y 2020. Todo esto según las obras de infraestructura y de transporte público contemplados para cada una de estas fechas. Para la realización de la evaluación ambiental se consideraron únicamente las emisiones atmosféricas (CO y PM), cuyos impactos se estimaron para los escenarios 2010, 2015 y 2020, al considerar las variaciones del parque automotor por tipo de combustible y tecnología utilizada.

Sin embargo, también es claro que dicho impacto está directamente relacionado con el tipo de combustible utilizado y con la edad de los vehículos. La emisión de contaminante CO para un bus a gasolina de 18 años es casi 10 veces mayor a la emisión de un bus de cuatro años [12].

La repercusión del transporte en el medio ambiente del Valle de Aburrá se centra en las emisiones al aire, tales como PM en suspensión, CO y concentraciones de ozono. El mayor aporte en cuanto a contaminantes corresponde al CO, el cual se genera, principalmente, en el sector del transporte y está relacionado con procesos de combustión incompleta, los cuales son típicos de las condiciones de operación de los motores a gasolina y diesel que impulsa el parque automotor dentro del sistema de transporte del Valle de Aburrá. En la Figura 2 se muestra la contribución de cada tipo de vehículo a la producción de emisiones de CO, y son los automóviles los que más contribuyen con un 91 %.



**Figura 2.** Contribución de los vehículos a la producción de emisiones de CO. Adaptado del Diagnóstico del Plan Maestro de Movilidad para la Región Metropolitana del Valle de Aburrá, 2005-2020 [12].

En una zona metropolitana como la del Valle de Aburrá — que concentra el 63 % de la población de Antioquia —, donde el 70 % de la contaminación del aire es causada por las fuentes móviles, fue necesario hacer un pacto con Ecopetrol a fin de disminuir el contenido de azufre en el combustible

de 50 a 25 ppm. Dado que se ha demostrado cómo esta reducción no es suficiente para tener una buena calidad del aire, se han utilizado otras estrategias complementarias dentro del llamado “Plan de descontaminación del Valle de Aburrá”.

Además de las malas condiciones de ventilación que se observan a lo largo de todo el año en el Valle de Aburrá, también se registran altos niveles de radiación solar, fenómenos que generan las condiciones propicias para la formación de ozono troposférico ( $O_3$ ). La acción conjunta de estos dos contaminantes ( $PM_{2.5}$  y  $O_3$ ) agrava los impactos adversos sobre la salud. La cuantificación de estos impactos será prioritaria para el Plan de Descontaminación, porque constituirá su principal fundamento. Como se observa en otras ciudades con problemas similares, una mayor proporción de los impactos sobre la salud está asociada con las altas concentraciones de  $PM_{2.5}$  [16].

Las estrategias del Plan de Descontaminación de la entidad gubernamental Área Metropolitana del Valle de Aburrá, incluyen la implementación de la norma de emisiones para fuentes móviles; ejecución de operativos en la vía pública con el fin de verificar las emisiones vehiculares con el acompañamiento de las autoridades de tránsito; restricción vehicular (pico y placa) establecida por la autoridad de tránsito con el apoyo técnico del Área Metropolitana del Valle de Aburrá; auditoría técnica a los Centros de Diagnóstico Automotor (CDA) habilitados por el Ministerio de Transporte; diseño e implementación del Sistema Integrado de Transporte para el Valle de Aburrá (SIT-VA); programa de chatarrización, mecanismo que permitirá reducir la sobreoferta y, finalmente, educación ambiental en prácticas de conducción y mantenimiento mecánica de los vehículos [11].

Es por esto de vital importancia de que se estimule un transporte público de calidad, con tiempos de recorrido bajos, económicos, cómodos, seguros y compatibles con el medio ambiente. Por medio del sistema metro se transportan los habitantes del Valle de Aburrá, desde Niquía hasta La Estrella, y pasan por Medellín, Envigado, Itagüí y Sabaneta, y en Medellín de oriente a occidente en los cables aéreos de las líneas J y K y con el tranvía de Aya-cucho. Todo esto a través de la energía eléctrica. Desde el 2010, cada año el Metro de Medellín mide los impactos negativos y positivos que recaen sobre el entorno como consecuencia de su operación con metodologías desarrolladas por terceros.

Del mismo modo, es necesario incentivar el uso de modos de transporte no motorizados como la bicicleta, ya que es evidente que su uso es mínimo, independientemente de cuál sea su nivel socioeconómico.

El centro de producción más limpia ha logrado la capacitación de buenas prácticas de conducción y mantenimiento a vehículos con los conductores o propietarios del Valle de Aburrá de más de 2200 camiones, 5500 buses, 18800 motos, 1500 vehículos de servicio especial y 1800 volquetas. La meta del Plan de Descontaminación del Área Metropolitana del Valle de Aburrá es reducir los niveles de  $PM_{2.5}$  a  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  como promedio anual en el 2020.

A diciembre 31 del 2016 se estimaban 100 carros eléctricos en el Valle de Aburrá, y que entraran en operación dos ecoestaciones de carga pública rápida de Empresas Públicas de Medellín (EPM). Además, se planea instalar ecoestaciones de carga pública lenta en hospitales, centros comerciales, universidades y parques.

## V. CONCLUSIONES

Es necesario generar conciencia ciudadana acerca del uso racional del automóvil particular, pues el uso amplio de vehículos contribuye al aumento de la contaminación ambiental. Además, se requiere motivar el uso de tecnologías limpias como las utilizadas en el transporte público en el sistema metro, metrocable, tranvía, metroplús y vehículos eléctricos, las cuales no emiten gases contaminantes a la atmósfera.

La contaminación atmosférica debida a las fuentes móviles requiere soluciones efectivas que permitan disminuir la cantidad de las partículas contaminantes más pequeñas, las cuales son las más nocivas para el ser humano y causan deterioro en diferentes tipos de materiales.

En movilidad urbana, además del “pico y placa”, existen diversas medidas de control y restricción vehicular, como, por ejemplo, la unidireccionalidad de vías, los carriles para vehículos con al menos un pasajero, la reversibilidad de carriles y los carriles solo bus que buscan optimizar el uso de las vías y así obtener menos congestión y menos contaminación. Cada una de ellas debe estudiarse en detalle antes de su implementación a fin de medir sus beneficios y desventajas.

En Colombia se ha mejorado la calidad del diesel, particularmente en Medellín, lo que ha contribuido a la disminución de la contaminación atmosférica. Sin embargo, es claro que se requieren otras medidas de movilidad en cuanto a optimización del uso de las vías y a los hábitos de conducción, a fin de que de una forma integral se logre una mejoría al problema.

La entidad gubernamental Área Metropolitana del Valle de Aburrá realiza estudios y programas con el propósito de mejorar el problema de la contaminación ambiental desde los ámbitos investigativos, hasta el educacional, con el objetivo de aplicar soluciones integrales a la población mediante regulación y educación.

Es importante entender que el cuidado del aire es una responsabilidad social de todos, por lo que es vital contribuir con la mejora de su calidad y no sufrir de nuevo situaciones como la vivida en Medellín en marzo del 2016, en la que se declaró alerta roja debido a la cantidad de material particulado persistente en el aire.

## REFERENCIAS

- [1] M. J. Molina y L. T. Molina, "Megacities and atmospheric pollution", *J. of Air & Waste Manag. Ass.*, vol. 54, pp. 644-680, 2004. doi: 10.1080/10473289.2004.10470936
- [2] P. Moriarty y D. Honnery, "The prospects for global green car mobility", *J. Clea. Prod.*, vol. 16, pp. 1717-1726, 2008. doi: 10.1016/j.jclepro.2007.10.025.
- [3] R. H. Socolow y S. W. Pacala, "A plan to keep carbon in check", *Sci. Am.*, vol. 295, pp. 50-57, 2006.
- [4] A. B. Lovins, "More profit with less carbon", *Sci. Am.*, vol. 293, pp. 74-83, 2005.
- [5] H. Turton, "Sustainable global automobile transport in the 21st century: an integrated scenario analysis", *Tech. Forec. Soc. Ch.*, vol. 73, pp. 607-629, 2006. [En línea]. doi: 10.1016/j.techfore.2005.10.001.
- [6] J. R. Agudelo, P. Benjumea, E. G. Meneses y J. F. Pérez, "Biodiesel una revisión del desempeño mecánico y ambiental", *Ingen. y Des.*, vol. 13, pp. 1-14, 2003.
- [7] P. P. Ballesteros y A. Escobar, "Revisión del estado del arte del problema de ruteo de vehículos con recogida y entrega (VRPPD)", *Inv. y Des.*, vol. 34, pp. 463-482, 2016.

- [8] T. Sams y J. Tieber, "Use of rape-and used-frying-oil-methyl ester under real world engine operation", Information Paper Technical University of Graz (Austria), 1996.
- [9] A. J. Cohen *et al.*, "Urban air pollution", *Comparative Quantification of Health Risks; Global and Regional Burden of Disease Attributable to Selected Major Risk Factors*, vol. 2, pp. 1353-1433, 2004.
- [10] J. Grau-Bové y M. Strlič, "Fine particulate matter in indoor cultural heritage: a literature review", *Her. Sc.*, vol. 1, p. 1, 2013. [En línea]. doi: 10.1186/2050-7445-1-8.
- [11] M. V. T. Gómez, E. M. Vásquez, J. S. Patiño, M. F. Gómez y G. E. R. Casas, "Plan de descontaminación del aire en la región metropolitana del Valle de Aburrá", *Prod. más Lim.*, vol. 5, 2010.
- [12] Área Metropolitana del Valle de Aburrá. *Diagnóstico del Plan Maestro de Movilidad para la Región Metropolitana del Valle de Aburrá, 2005-2020, Informe para Revisión*, 2005.
- [13] M. Salamanca, F. Mondragón, J. R. Agudelo P. Benjumea y A. Santamaría, "Variations in the chemical composition and morphology of soot induced by the unsaturation degree of biodiesel and a biodiesel blend", *Comb. and Fl.*, vol. 159, pp. 1100-1108, 2012. doi: 10.1016/j.combustflame.2011.10.011
- [14] Área Metropolitana del Valle de Aburrá. *Evaluación del impacto de la reducción del contenido de azufre en la gasolina del Valle de Aburrá*, 2011.
- [15] E. P. Espinoza y C. E. Molina, "Contaminación del aire exterior Cuenca-Ecuador, 2009-2013. Posibles efectos en la salud", *Rev. de la Fac. de Cien. Méd.*, vol. 32, pp. 6-17, 2014.
- [16] F. He *et al.*, "Individual-level PM<sub>2.5</sub> exposure and the time course of impaired heart rate variability: the APACR Study", *J. Exp. Sc. Env. Epid.*, vol. 21, pp. 65-73, 2011. [En línea]. doi: 10.1038/jes.2010.21
- [17] M. Romero-Placeres, F. Diego-Olite y M. Álvarez-Toste, "La contaminación del aire: su repercusión como problema de salud", *Rev. Cub. de Hig. y Epide.*, vol. 44, pp. 1-14, 2006.
- [18] I. Romieu *et al.*, "Effects of air pollution on the respiratory health of asthmatic children living in Mexico City", *Am. J. of Resp. Crit. Ca. Med.*, vol. 154, pp. 300-307, 1996. [En línea]. doi: 10.1164/ajrccm.154.2.8756798
- [19] A. J. Cohen *et al.*, "The global burden of disease due to outdoor air pollution", *J. of Tox. Env. He.*, Part A, vol. 68, pp. 1301-1307, 2005. [En línea]. doi: 10.1080/15287390590936166.
- [20] R. W. Atkinson, S. Kang, H. R. Anderson, I. C. Mills y H. A. Walton, "Epidemiological time series studies of PM<sub>2.5</sub> and daily mortality and

- hospital admissions: a systematic review and meta-analysis”, *Thorax*, p. thoraxjnl-2013-204492, 2014. [En línea]. doi: 10.1136/thoraxjnl-2013-204492.
- [21] V. Kucera y S. Fitz, “Direct and indirect air pollution effects on materials including cultural monuments”, *Wat. Air & Soil Poll.*, vol. 85, pp. 153-165, 1995. [En línea]. doi: 10.1007/BF00483697.
- [22] J. Rocha, *Productos electro-electrónicos en ambientes tropicales*. Madrid: Cytel, 2003.
- [23] J. C. Scully, *The fundamentals of corrosion*. Pergamon Press, 1975.
- [24] I. Rosenfeld, *Atmospheric corrosion of metals*. Houston: NACE, 1972.
- [25] H. Guttman y P. Sereda, “Metal corrosion in the atmosphere, astm stp 435”, SW Dean Jr y EC Rhea, Philadelphia, p. 223, 1968.
- [26] H. Gil, J. Calderón, C. Buitrago, A. Echavarría y F. Echeverría, “Indoor atmospheric corrosion of electronic materials in tropical-mountain environments”, *Corr. Sc.*, vol. 52, pp. 327-337, 2010. doi: 10.1016/j.corsci.2009.09.019
- [27] C. Arroyave y M. Morcillo, “The effect of nitrogen oxides in atmospheric corrosion of metals”, *Corr. Sc.*, vol. 37, pp. 293-305, 1995. [En línea]. doi: 10.1016/0010-938X(94)00136-T.
- [28] D. Saha, A. Pandya, J. Singh, S. Paswan y D. Singh, “Role of environmental particulate matters on corrosion of copper”, *Atm. Poll. Res.*, vol. 7, pp. 1037-1042, 2016. [En línea]. doi: 10.1016/j.apr.2016.06.007
- [29] D. M. Marín, M. A. Gómez, R. Mira y F. Echeverría, “Obtención y evaluación de películas de materiales con aplicaciones electrónicas mediante pruebas aceleradas de corrosión”, *Ingen. y Des.*, vol. 23, pp. 59-71, 2008.
- [30] H. Gil, C. Buitrago y J. Calderón, “Atmospheric corrosion of copper and silver influenced by particulate matter”, *J. Sol. St. Electroch.*, pp. 1-9, 2016. doi: 10.1007/s10008-016-3467-1.
- [31] M. Alcaide López de la Manzanara, *Efectos ambientales del tráfico urbano: la evaluación de la contaminación atmosférica en Madrid*. 2000.
- [32] J. Hao y L. Wang, “Improving urban air quality in China: Beijing case study”, *J. Air Waste Manag. Ass.*, vol. 55, pp. 1298-1305, 2005. [En línea]. doi: 10.1080/10473289.2005.10464726.
- [33] C.-Y. C. Lin, W. Zhang y V. I. Umanskaya, “The effects of driving restrictions on air quality: São Paulo, Bogotá, Beijing, and Tianjin”, en *2011 Annual Meeting*, jul. 2011, pp. 24-26.
- [34] C. A. Lin, L. Pereira, D. Nishioka, G. Conceição, A. Braga y P. Saldiva, “Air pollution and neonatal deaths in Sao Paulo, Brazil”, *Braz. J. Med. Bio. Res.*, vol. 37, pp. 765-770, 2004. doi: 10.1590/S0100-879X2004000500019

- [35] O.Figueroay A.Orellana, "Transantiago: gobernabilidad e institucionalidad", *EURE Santiago*, vol. 33, pp. 165-171, 2007. [En línea]. doi: 10.4067/S0250-71612007000300010
- [36] M. Vera, D. R. Romero y E. G. F. Mata, "El programa 'Hoy no circula' como política de movilidad sustentable fallida, que puede provocar migración una mirada en retrospectiva de 25 años", *Gobernanza Ambiental Origenes CS5.1.indd*, vol. 81, pp 81-99, 2015.
- [37] Escuela de Ingeniería de Antioquia, "Electromovilidad: nuevos tiempos para el transporte sostenible", en *Memorias: Seminario Nacionl Transporte Eléctrico como Alternativa de Movilidad Urbana*, oct. 2010.
- [38] J. A. Gómez-Romo y J. W. González-Rivera, "Formulación del plan de gestión integral de residuos sólidos para los proyectos de perforación exploratoria, sísmica y exploración de hidrocarburos desarrollados por petróleos del Norte SA (Departamento del Cesar)", tesis de grado, Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga, 2009.
- [39] Área Metropolitana del Valle de Aburrá. *Encuesta origen-destino a hogares del Valle de Aburrá*, 2012.