

# Factores de emisión de fuentes móviles en el Valle de Aburrá



**UNIVERSIDAD  
DE ANTIOQUIA**





# Factores de emisión de fuentes móviles en el Valle de Aburrá



**UNIVERSIDAD  
DE ANTIOQUIA**



**Nota Derechos Reservados**

Está prohibida la reproducción parcial o total de esta publicación y mucho menos para finales comerciales. Para utilizar información contenida en ella se deberá citar la fuente.

## **Factores de emisión de fuentes móviles en el Valle de Aburrá**

UN PROYECTO DE

### **ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ**

Eugenio Prieto Soto

**Director**

María del Pilar Restrepo Mesa

**Subdirectora Ambiental**

Diana Fernanda Castro Henao

**Líder Programa Gestión Ambiental**

EJECUTA

### **Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia**

Grupo de Manejo Eficiente de la Energía (GIMEL)

### **EQUIPO DE INVESTIGACIÓN**

John Ramiro Agudelo Santamaría

Andrés Felipe Agudelo Santamaría

Ricardo Moreno Sánchez

Fernando Cardeño López

Andrés Felipe López García

Óscar David Hincapié García

Jackeline Saldarriaga, Ing. Administrativa

Freddy Giovanni Melo, Técnico y Tecnólogo electromecánico

### **Asesores**

José Eddy Torres, Economista, experto en política energética

Jaime Augusto Torres Novoa, Ing. Químico, experto en combustibles y normatividad energética y ambiental

### **SUPERVISIÓN**

#### **Área Metropolitana del Valle de Aburrá**

Ana Zuleima Orrego Guarín

Gloria Estella Ramírez Casas

Registro ISBN

18-diciembre-2019

**Primera edición**



# PRÓLOGO

El Área Metropolitana del Valle de Aburrá, como autoridad ambiental urbana de los 10 municipios que la integran, y como entidad comprometida con el desarrollo sostenible de nuestra región, ha mantenido su firme compromiso de garantizarle a sus ciudadanos mayor bienestar y mejor calidad de vida mediante el diálogo, la articulación y la concertación con actores de la administración pública, el sector empresarial y la academia. En ese camino hemos buscado entregarle al territorio los instrumentos necesarios para afrontar desde todos los ejes misionales de la entidad, es decir desde la planeación, el ambiente, la movilidad, la seguridad y la convivencia, la gestión y la cooperación, la comunicación pública y la movilización social, las mejores herramientas posibles para abordar soluciones sostenibles a los principales macroproblemas que padecemos en la región. El Plan Integral de Gestión de Calidad del Aire 2017-2030 (PIGECA), aprobado mediante Acuerdo Metropolitano N°16 del 06 de diciembre de 2017, se ha convertido en uno de esos instrumentos de gestión potentes para consolidar el modelo de Gobernanza que necesita el Valle de Aburrá. Fue concebido y creado concertadamente buscando mejorar progresivamente la calidad del aire en el Área Metropolitana, salvaguardar la salud pública de sus habitantes, proteger el ambiente, elevar el bienestar social, y propiciar un desarrollo metropolitano sostenible.

Este libro es el resultado de dos convenios interadministrativos de asociación con la Universidad de Antioquia (1096 de 2016 y 888 de 2017) ejecutados entre finales de 2016 y 2019, los cuales buscaron fortalecer el primer eje temático del PIGECA, a saber, generación, aprovechamiento y fortalecimiento del conocimiento científico y la tecnología. Aunamos esfuerzos técnicos, económicos y financieros entre la entidad, la Universidad de Antioquia, y varias empresas, de las que me permito destacar el compromiso y protagonismo asumido por la Empresa Colombiana de Petróleos (Ecopetrol), para determinar los factores de emisión medidos localmente en vehículos livianos, motocicletas, buses, busetas, camiones y volquetas representativos de los que circulan por nuestra región. La importancia de conocer los factores de emisión de estas fuentes móviles radica en que nos entregó elementos que permitieron afinar nuestros instrumentos de política pública, enmarcados en posibles medidas de restricción de movilidad selectiva, establecimiento de límites cada vez más estrictos de emisiones contaminantes, conocimiento más preciso de la carga de contaminantes arrojada a la atmósfera del Valle, y finalmente el enriquecimiento de nuestro inventario de emisiones, el cuál según el PIGECA, se debe mejorar continuamente.

Hemos dirigido las estrategias de reducción de la contaminación del aire a los sectores de transporte, combustibles e industria, por ser los más relevantes según nuestros diagnósticos. Sin embargo el énfasis principal lo enfocamos hacia acciones relacionadas con la movilidad sostenible, ya que los estudios de

nuestro inventario de emisiones han permitido identificar a las fuentes móviles como los principales aportantes a la contaminación del aire. Más del 80% de la contaminación por material particulado en el aire de nuestro valle proviene de los vehículos automotores, y dentro de éstos con mayor énfasis los que tienen motores a ciclo diésel.

En la ciudad de Medellín y su área metropolitana hemos padecido episodios críticos de contaminación atmosférica por altas concentraciones de material particulado en el aire, debido en parte a las condiciones particulares de nuestra topografía y dinámica atmosférica. A este escenario contribuye también, el elevado y creciente número de vehículos en circulación, su tecnología estrechamente ligada a la calidad de los combustibles, así como a la debilidad de los mecanismos de regulación y control de las emisiones de vehículos. Es así como encontramos en la ejecución de este proyecto conocido como FEVA: Factores de Emisión del Valle de Aburrá, elementos técnicos claves para apuntalar nuestra gestión hacia medidas encaminadas a mitigar el impacto negativo de las fuentes móviles en el Valle de Aburrá.

Con el proyecto FEVA logramos inicialmente determinar los ciclos de conducción propios de motocicletas y de cada familia de vehículos. Por primera vez, se presenta a la comunidad nacional e internacional, unos ciclos que además de recoger la manera como conducimos en nuestras vías, como termómetro cultural y geográfico, lograron incorporar la topografía particular de nuestro Valle, ubicado a gran altura sobre el nivel del mar. Entregamos una herramienta que permite de manera repetitiva y confiable establecer un patrón de comparación entre diferentes iniciativas que busquen mitigar el impacto de las fuentes móviles sobre la calidad del aire en nuestra región. Por otra parte, los ciclos de conducción se utilizaron para determinar los factores de emisión que enriquecen nuestro inventario de emisiones actual. En este proyecto también se identificaron los tipos de vehículos del parque automotor que más contribuían con la emisión de contaminantes a la atmósfera, y se identificaron falencias técnicas en la medición de contaminantes durante la revisión técnico mecánica y de gases, establecida en la Resolución 910 de 2008, las cuales comunicamos oportunamente al Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, y al Ministerio de Transporte.

Mediante una aproximación novedosa, basada en el denominado Análisis Modal de Emisiones introducida por la Agencia de Protección del Medioambiente de los Estados Unidos (*EPA*) a comienzos del año 2000, y refinada posteriormente por los autores del modelo internacional de emisiones de vehículos (*IVE*) hacia 2008, los investigadores a cargo de FEVA, lograron estimar a partir de sus mediciones de emisiones contaminantes a bordo de los vehículos y las motocicletas, el impacto que tienen los patrones de movilidad de nuestras dos Zonas Urbanas de Aire Protegido (ZUAP). Así, el lector encontrará en este libro, que en la ZUAP del centro, las emisiones contaminantes gaseosas y el PM<sub>2.5</sub> llegan a triplicarse, por el constante número de paradas y arranques a los que están sometidos los vehículos en esta zona de la ciudad.

Finalmente, este proyecto nos permitió establecer un mecanismo con fundamentación técnica y científica que buscaba beneficiar a aquellas empresas transportadoras que firmaron el pacto por la calidad del aire, y que respondieron a las solicitudes hechas por la Entidad, mediante las Resoluciones Metropolitanas 911 de 2017 y 901 de 2019, de modo que aquellos vehículos con motor a ciclo diésel que contaminaban poco porque estaban por debajo de los umbrales de emisión de material particulado establecidos en el proyecto FEVA, se hacían acreedores a un distintivo ambiental que les permitió circular durante los días de restricción de movilidad por episodios críticos de calidad de aire que tuvieron lugar

durante el período de transición a lluvias (octubre-noviembre) de 2019. Esta iniciativa fue bien recibida por los gremios y empresas del sector.

En nuestro propósito de empoderar a la ciudadanía con los resultados de nuestros proyectos, como instrumento esencial de gestión para mejorar la calidad del aire que respiramos, invito pues al lector a entrar en diálogo con este libro, fruto de cerca de tres años de trabajo arduo, riguroso y comprometido, entre la autoridad ambiental local, la empresa y la Universidad.

***Eugenio Prieto Soto***

***Director***

***Área Metropolitana del Valle de Aburrá***

# INTRODUCCIÓN

El modelo de desarrollo económico que hemos adoptado como humanidad, marcado históricamente a partir de la revolución industrial que tuvo lugar en Inglaterra hacia la segunda década del siglo XIX, supone una marcada dependencia de los combustibles. Es el petróleo principalmente el que irriga las venas de una sociedad altamente concentrada en grandes centros urbanos. Desafortunadamente, el uso de los combustibles, en su gran mayoría de origen fósil, pasa inexorablemente por un proceso que conocemos como combustión. Para que tenga lugar, en dicho proceso existen las llamadas irreversibilidades, aquel peaje que nos cobra la naturaleza por el uso de sus recursos naturales. El límite de máximo aprovechamiento de la combustión no supera el 60%, el resto se pierde en el medio en forma de calor y en emisiones contaminantes, que terminan, como lo padecemos actualmente, ahogándonos en nuestro propio invento.

Los motores de ciclo diésel son los más eficientes desarrollados a la fecha por el ser humano, y en el mejor de los casos, especialmente en los de gran tamaño, no superan el 55% de eficiencia de conversión de combustible en energía útil (tracción o electricidad). Por su parte, los conocidos como de ciclo Otto, a lo sumo han llegado al 35%. Eso se traduce en que por cada 10 galones de combustible que usemos en estos motores, entre 4.5 y 6.5, en el mejor de los casos, se convierten en desperdicios que van a nuestra atmósfera, calentándola y contaminándola. Las emisiones contaminantes que se producen por el uso de combustibles fósiles, dependen marcadamente de factores como la calidad del combustible, el nivel de desarrollo tecnológico de la fuente de transformación, y si se trata de vehículos, de la pauta o cultura en la conducción, de la topografía de la región y del estado y disposición de la malla vial por la que se conduce.

Por lo anterior, las autoridades ambientales locales requieren conocer con precisión los denominados inventarios de emisiones, ya que conociendo la carga de contaminantes (toneladas/año) que van al aire ambiente, pueden tomar sus medidas de control sobre las fuentes fijas y móviles que los generan. A su vez, los inventarios de emisiones requieren conocer con detalle los llamados Factores de Emisión (FE), que son indicadores, es decir números, que cuantifican la masa (gramos o toneladas) de una determinada emisión contaminante, con la actividad que lo genera, es decir, si son fuentes móviles sería la masa por unidad de distancia recorrida (kilómetro), y si es una fuente fija, por unidad de energía usada en la industria. Determinar los FE localmente es normalmente dispendioso, costoso y demanda de equipos especializados y de personal altamente calificado. Por esta razón, varias autoridades ambientales alrededor del mundo han propuesto modelos para estimarlos. En Estados Unidos de Norteamérica, la Agencia de Protección del Medioambiente (EPA) propuso el modelo MOVES. La Agencia de Medioambiente de Europa (EEA), propuso el COPERT, mientras que, para países en vía de desarrollo, un equipo de trabajo multidisciplinar e internacional, propuso el denominado Modelo Internacional de Emisiones Vehiculares (IVE).

El inventario de emisiones del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA), autoridad ambiental local integrada por 10 municipios, ha adoptado el modelo IVE para obtener los factores de emisión de fuentes móviles.

Las limitaciones que supone el uso de este modelo, con diferencia el más apropiado para nuestra región entre los tres mencionados arriba, han servido como punto de partida para la ejecución de este megaproyecto denominado FEVA: Factores de Emisión medidos localmente en el Valle de Aburrá. Como lo recomiendan explícitamente los autores del IVE, lo más adecuado para una ciudad o región metropolitana compuesta por varias ciudades, sería medir localmente sus propios FE. De este modo se recogen con más precisión características como la tipología y tecnología propia de su flota de vehículos, calidad de sus combustibles, su topografía, pautas de conducción altamente marcadas por el patrón cultural de la región, estado y conformación de su malla vial, y condiciones climáticas.

Fue así como un grupo multidisciplinario de profesionales de la Universidad de Antioquia nos unimos a mediados de 2016 para proponerle al equipo técnico de calidad de aire esta necesidad. Por fortuna para la región, la propuesta fue bien recibida por su Director, Dr. Eugenio Prieto Soto, y aprobada finalmente por la Junta Metropolitana, dando lugar a dos convenios interadministrativos de asociación, el 1096 de 2016, y el 888 de 2017, en los cuales, aunando esfuerzos técnicos, económicos y financieros entre el AMVA, la Universidad de Antioquia y la empresa privada, con un elevado y decisivo protagonismo de la empresa Colombiana de Petróleos, entre otras importantes del país, logramos entregarle a nuestra región los Factores de Emisión de las fuentes móviles más representativas: vehículos livianos a ciclo Otto y Diésel, y motocicletas, en una primera fase (FEVA-I, Convenio 1096 de 2016). En una segunda fase (FEVA-II, Convenio 888 de 2017) y se hizo lo propio para vehículos de transporte de pasajeros y de carga (buses, busetas, camiones y volquetas) a ciclo diésel.

Por comodidad para el lector, y buscando ser pedagógicos, hemos dividido este libro en cinco capítulos. En el primero hacemos una contextualización del problema ambiental ocasionado por la contaminación de fuentes móviles en el mundo, en el país, y finalmente en nuestra región. Aquí también damos elementos de juicio respecto a posibles sustitutos de los combustibles fósiles, como los biocombustibles, el gas natural para uso vehicular y la electromovilidad. En el segundo capítulo presentamos los antecedentes y justificación que dieron lugar a la ejecución de FEVA. El tercer capítulo se lo dedicamos a la presentación detallada y exhaustiva de la metodología que adoptamos para los dos proyectos. Los capítulos 4 y 5 contienen los resultados y las conclusiones y retos que siguen en esta línea de trabajo, respectivamente. El libro cierra con dos anexos, en el primero aparece un glosario de términos técnicos, mientras que, en el segundo, para mayor comodidad del lector, aparecen tabulados los factores de emisión de todas las fuentes móviles que formaron parte de FEVA-I y FEVA-II.

John Ramiro Agudelo Santamaría  
Andrés Felipe Agudelo Santamaría  
Ricardo Moreno Sánchez  
Fernando Cardeño López

Profesores de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia

## AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su sincero agradecimiento al Director del Área Metropolitana, Dr. Eugenio Prieto Soto, por su apoyo decidido, confianza en la Universidad, y por las luces acertadas que nos proporcionó durante los eventos de socialización de ambos proyectos. Supuso un reto enorme y enriquecedor responder a sus demandas acertadas. A la subdirectora ambiental María del Pilar Restrepo, por su rigor, cuestionamiento continuo, bondad y ánimo para que el trabajo fuera sinérgico y de impacto para la región.

Gracias al equipo técnico de calidad del aire del AMVA, muy especialmente a su líder Diana Fernanda Castro, siempre presta a aportar y a exigirnos cada vez más, a nuestras supervisoras Ana Zuleima Orrego, Diana Hoyos y Gloria Estella Ramírez, y su equipo de asesores, Zoraida Piedrahita y Cristian Fernando Palacio. Sus observaciones, recomendaciones y revisión rigurosa de nuestros informes fueron altamente constructivos para nosotros. Aprovechamos para agradecer a María Victoria Toro y su equipo de trabajo de la Universidad Pontificia Bolivariana, por sus recomendaciones y llamados de atención críticos y constructivos en ciertos momentos claves de FEVA-II, que con altura nos encaminaron en la dirección que requería la región. Gracias también por acoger nuestros resultados y recomendaciones para enriquecer el Inventario de Emisiones del AMVA.

Muchas gracias a las empresas que se unieron decididamente a los dos proyectos FEVA. Sofasa Renault, por donar un vehículo para las pruebas; Incolmotos-Yamaha y Auteco, por facilitar motocicletas para las mediciones; Andemos, por facilitarnos acceso a la base de datos actualizada del RUNT; Coordinadora Mercantil, por facilitarnos camiones para las pruebas; TCC, por darnos acceso a sus bases de datos de conducción cada segundo durante más de seis meses de varios de sus vehículos de distribución de paquetería en el Valle de Aburrá; a la Secretaría de Infraestructura física de la Alcaldía de Medellín, por facilitarnos las volquetas para las mediciones, y a UMO, por su colaboración con la adaptación de los tubos de escape para las pruebas a bordo de los camiones de carga y vehículos de pasajeros. Un agradecimiento muy especial a la Empresa Colombiana de Petróleos (**ECOPETROL**), a su presidente Dr. Felipe Bayón Pardo, al Director del Instituto Colombiano del Petróleo Dr. Andrés Eduardo Mantilla Zárate, y muy especialmente a los Ingenieros Sandro Faruc González y José Luis Sarmiento Vesga, por su participación comprometida y decidida desde el comienzo y hasta el final de los dos proyectos FEVA-I y FEVA-II, gracias ECOPETROL por facilitarnos los equipos de medición de última tecnología para medición a bordo de las emisiones contaminantes gaseosas y de distribución de tamaño y masa de PM2.5.

Gracias al equipo técnico que nos apoyó en la campaña de mediciones, por parte de ECOPETROL estuvieron Freddy Giovanni Melo y Carlos Jaramillo; por parte del grupo GIMEL de la Universidad de Antioquia, Andrés Felipe López, Frank Ruiz, Leonardo Serna, Luis Felipe Sánchez, Oscar David Hincapié, Manuel Echeverri, Christian Moreno, y por supuesto, a Jackeline Saldarriaga, nuestra Ingeniera Administradora. Un agradecimiento sincero para nuestros dos asesores expertos nacionales en asuntos de política pública energética y ambiental, nuestros amigos José Eddy Torres y Jaime Augusto Torres Novoa.

Nuestro agradecimiento al grupo de profesoras del Departamento de Ingeniería Industrial de la Universidad de Antioquia, Diana Marcela Pérez, Carmen Elena Patiño, y Olga Cecilia Úsuga, por su soporte crucial en el análisis estadístico de los datos.

Nuestro reconocimiento al profesor Dr. Juan Esteban Tibaquirá, decano de Ingeniería Mecánica de la Universidad Tecnológica de Pereira, por permitirnos el acceso a su banco de rodillos, clave para las pruebas de FEVA-I. Al profesor Dr. Alberto Ayala, *Air Pollution Control Officer and Executive Director, Sacramento Metropolitan Air Quality Management District, profesor adjunto del departamento de Ingeniería Mecánica y Aeroespacial de West Virginia University, Primer director ejecutivo de la CARB (California Air Resources Board)*, por sus amistosos y rigurosos consejos que fueron claves para determinar los factores de emisión de vehículos livianos y motocicletas de FEVA-I. Finalmente, muchas gracias a nuestro estimado amigo y asesor profesor Dr. Mauricio Osses Alvarado, de la Universidad Técnica Federico Santa María de Chile. Sus luces fueron esclarecedoras para afrontar las mediciones en carretera bajo condiciones de conducción reales de FEVA-II.

Gracias a todos los que participaron directa e indirectamente en estos dos proyectos, y que, sin quererlo, por una falla de nuestra memoria, hemos omitido mencionar.

## TABLA DE CONTENIDO

### Capítulo 1. Contextualización de los problemas de calidad del aire en grandes centros urbanos

1.1.	La calidad del aire en las grandes ciudades de latinoamérica.....	3
1.2.	Gestión de la calidad del aire .....	4
1.3.	La salud como eje central en la gestión de la calidad del aire .....	6
1.4.	La calidad del aire en los objetivos de desarrollo sostenible .....	7
1.5.	Emisiones contaminantes del sector transporte: generación e implicaciones .....	8
1.6.	Los retos para mejorar la calidad del aire en grandes centros urbanos .....	12
	Referencias .....	12

### Capítulo 2. Motivación para medir los Factores de Emisión localmente en el Valle de Aburrá

2.1.	Importancia de los factores de emisión .....	16
2.2.	Los factores de emisión dentro del plan de gestión de calidad de aire del amva .....	17
2.3.	Relevancia de los ciclos de conducción para el amva .....	18
	Referencias .....	22

### Capítulo 3. Metodología para determinar los factores de emisión

3.1	FACTORES DE EMISIÓN PARA VEHÍCULOS LIVIANOS Y PARA MOTOCICLETAS .....	27
3.1.1	Ciclo de conducción para vehículos livianos.....	28
3.1.2	Síntesis del ciclo de conducción para vehículos livianos .....	31
3.1.3	Ciclo de conducción para motocicletas .....	33
3.1.4	Síntesis del ciclo de conducción para motocicletas.....	33
3.1.5	Selección de los vehículos de prueba .....	34
3.1.6	Determinación de los factores de emisión para vehículos livianos y para motocicletas .....	35
3.2	FACTORES DE EMISIÓN PARA VEHÍCULOS PESADOS.....	36
3.2.1	Patrones de conducción para vehículos pesados.....	36
3.2.2	Selección de vehículos pesados para las pruebas .....	37
3.3	Determinación de los factores de emisión para vehículos pesados .....	38
3.4	PREDICCIÓN DE EMISIONES CONTAMINANTES EN VEHÍCULOS PESADOS.....	39
3.4.1	Modelo de análisis modal de emisiones vehiculares .....	40
3.4.2	Validación del modelo.....	43
	Referencias.....	44

## Capítulo 4. Resultados y discusión

4.1.	FACTORES DE EMISIÓN DE VEHÍCULOS LIVIANOS Y MOTOCICLETAS EN EL VALLE DE ABURRÁ.....	47
4.1.1.	Ciclos de conducción de vehículos livianos y motocicletas.....	47
4.1.2.	Factores de emisión de vehículos livianos y motocicletas.....	52
4.2.	FACTORES DE EMISIÓN DE VEHÍCULOS PESADOS DE PASAJEROS Y DE CARGA.....	55
4.2.1	Ciclos de conducción para buses, busetas, camiones y volquetas.....	55
4.2.2	Factores de emisión para buses, busetas, camiones y volquetas.....	57
4.2.3	Estimación de emisiones en las ZUAP del Valle de Aburrá a través del AME.....	59
4.3.	OBSERVACIONES A LA RESOLUCIÓN 910 DE 2008.....	62
4.4.	ELEMENTOS PARA UNA PROPUESTA DE MODIFICACIÓN DE LA PRUEBA DE INSPECCIÓN TÉCNICA PERIÓDICA DE VEHÍCULOS DIÉSEL.....	68
4.5.	CONCLUSIONES.....	71
	Referencias.....	71
	Recomendaciones.....	73
	Glosario de términos técnicos.....	75

## RESUMEN

En la primera fase de este proyecto, titulada: “Articulación Universidad-Empresa-Estado para establecer los factores de emisión (FE) reales de vehículos livianos y motocicletas en el Valle de Aburrá (FEVA-I)”, correspondiente al Convenio 1096 de 2016 entre el AMVA y la Universidad de Antioquia, se determinaron los FE de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), hidrocarburos totales (HC), óxidos de nitrógeno (NOx) y material particulado PM2.5, medidos localmente a cuatro vehículos livianos (menores a 3.5 toneladas) provistos con motor de ciclo Otto y cuatro con motor de ciclo diésel, así como a ocho motocicletas entre 100 cc y 200 c.c. (centímetros cúbicos), representativas de la región. La fase experimental contó con los equipos de medición de emisiones a bordo Horiba OBS ONE-GS para gases y ELPI de Dekati para PM2.5. En este proyecto se definieron las rutas más representativas del Valle de Aburrá teniendo en consideración los 10 municipios de la región, las franjas horarias de pico y placa, la topografía, los días de la semana, y las condiciones climáticas (lluvia y no-lluvia). Se eligieron cinco rutas sobre las que se realizaron mediciones durante más de cuatro meses con un vehículo liviano y una motocicleta debidamente instrumentados. Se lograron obtener los dos ciclos de conducción más representativos del Valle de Aburrá para cada familia de fuentes móviles. Estos ciclos fueron reproducidos luego en un banco de rodillos con capacidad de simular pendientes (Universidad Tecnológica de Pereira), y las emisiones contaminantes registradas instantáneamente fueron usadas para determinar los FE para cada uno de los vehículos livianos y motocicletas.

Se encontró que el nivel de tecnología de los vehículos y motocicletas es determinante en las emisiones. Los vehículos con tecnología avanzada arrojaron los FE más bajos. Un vehículo a gasolina antiguo, de sólo 1000 c.c. de cilindrada, puede llegar a emitir hasta 20 veces más PM2.5 que uno nuevo con el doble de cilindrada. Por su parte, una motocicleta carburada (Euro 2) de 125 cc puede llegar a emitir hasta 100 veces más PM2.5 que una de inyección electrónica (Euro 3) de la misma cilindrada. Otro hallazgo relevante de FEVA-I fue que los vehículos antiguos y con mal estado de funcionamiento del catalizador pueden llegar a emitir hasta 40 veces más óxidos de nitrógeno (NOx) que uno de nueva tecnología, y que las motocicletas con cilindradas de tan sólo 100 cc a 180 c.c. generan la misma carga de NOx por kilómetro recorrido a la atmósfera que la de un vehículo con cilindrada de 1600 a 2000 c.c.

En la segunda fase titulada: “Articulación Universidad-Empresa-Estado para establecer los factores de emisión reales de vehículos pesados en el Valle de Aburrá (FEVA-II)” correspondiente al convenio interadministrativo No. 888 de 2017 entre el AMVA y la Universidad de Antioquia, se determinaron los FE de cuatro buses, cuatro camiones (dos C2 pequeños y dos camiones C2 grandes) y dos volquetas, representativos del Valle de Aburrá. Se adoptó la metodología de medición en carretera usando los mismos equipos portátiles de emisiones gaseosas (CO, CO<sub>2</sub>, HC y NOx) y de material particulado PM2.5 de FEVA-I. Los resultados de las mediciones de emisiones a bordo en carretera se usaron, por una parte, para determinar los factores de emisión y por otra parte mediante el análisis modal de emisiones, para estimar factores de emisión en las dos zonas urbanas de aire protegido (ZUAP) del Valle de Aburrá.

Los resultados de FEVA-II mostraron que el FE de PM<sub>2.5</sub> de los buses del Valle de Aburrá es entre 3 y 21 veces mayor que los recomendados por el modelo europeo COPERT, y para camiones es entre 2.5 y 16 veces mayor. Los FE de PM<sub>2.5</sub> de los buses, volquetas y camiones pesados del Valle de Aburrá fueron entre 1.2 y 37 veces mayores que los propuestos por el modelo IVE. Estos resultados reclaman acciones inmediatas para darle una solución adecuada a los denominados “Grandes Contaminadores”, cuyos FE de PM<sub>2.5</sub> son 72 veces superiores a los usados en Europa y Estados Unidos (7.5 gPM<sub>2.5</sub>/km). Nuestros resultados tienden a ser más parecidos a los reportados para vehículos pesados antiguos de Estados Unidos, o a los pesados Euro IV de ciudades chinas. El Análisis Modal de Emisiones permitió estimar que todos los factores de emisión se triplican (incrementan entre 250% y 420%) en la Zona Urbana de Aire Protegido (ZUAP) del centro de Medellín, respecto a los medidos en carretera según ciclo de conducción específico de cada familia de vehículos pesados. Esto se debe a que en dicha ZUAP, el vehículo está sometido a constantes arranques y paradas, lo que supone un mayor porcentaje de aceleraciones y largas esperas en ralentí.

La ejecución de estos dos proyectos permitió evidenciar varias falencias de fondo en la Resolución 910 de 2008 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, mediante la cual se fijan los límites máximos de emisiones contaminantes de fuentes móviles. Las principales falencias detectadas fueron:

1. Al realizarse la prueba en condiciones estáticas, las emisiones gaseosas se subestiman respecto a las reales, en algunos casos por varios órdenes de magnitud, como lo evidenciaron las mediciones de monóxido de carbono e hidrocarburos totales (HC).
2. Los vehículos nuevos con tecnologías avanzadas como la inyección directa de gasolina (y sus mezclas con otros combustibles), están lejos de verse afectados por esta resolución, puesto que sus emisiones son significativamente bajas, lo que sugiere establecer límites más realistas que permitan detectar el buen estado de inspección y mantenimiento de estas nuevas tecnologías vehiculares.
3. Dicha resolución no exige límite para las emisiones de NO<sub>x</sub>, contaminante clave para determinar el correcto estado de operación de los catalizadores de tres vías. Las emisiones de NO<sub>x</sub> en prueba estática son bajas, pero cobran sentido en prueba dinámica. Nuestros resultados permitieron estimar que la carga de NO<sub>x</sub> a la atmósfera generada por vehículos livianos y motocicletas en nuestra región, puede ser de alrededor de 9.600 toneladas/año respecto de las 23.300 toneladas/año que emiten en conjunto todas las fuentes móviles.
4. La técnica de medición de los hidrocarburos totales (HC) por infrarrojo no dispersivo (NDIR) subestima sustancialmente la emisión real de estos contaminantes a la atmósfera, ya que se pueden producir condensaciones de los gases en la sonda y en los filtros, previo a su ingreso al sistema de detección. Adicionalmente, la técnica actualmente más apropiada, e internacionalmente aceptada para medir HC es por detección de ionización de llama (FID).
5. Se identificó en la regulación nacional sobre emisiones de vehículos diésel, que los límites y el criterio porcentaje de opacidad estándar ( $N_s$ ), indicada en la norma colombiana NTC 4231-12 para este tipo de vehículos, no son apropiados, ya que en su conjunto conforman un criterio de regulación laxo, el cual no da cuenta del mal estado de mantenimiento de un vehículo, ni es empleado a escala mundial para regular las emisiones de gases de vehículos diésel. Al respecto se identificó la necesidad de avanzar en la regulación local y nacional sobre la implementación de otras pruebas (diferentes a las pruebas de opacidad en porcentaje o en densidad de humos), tales como los parámetros de concentración de partículas en #/cm<sup>3</sup> y/o en concentración másica (mgPM<sub>2.5</sub>/m<sup>3</sup>) para condiciones específicas de operación del motor, que cuantifiquen de manera más efectiva las emisiones de gases de todos los modelos de vehículos diésel, que estén en línea con los referentes internacionales y que den cuenta del estado de mantenimiento del motor.

Este último numeral llevó a implementar dos acciones: de una parte, redactar y sugerir una nueva Resolución Metropolitana para restringir los límites de emisión de las fuentes móviles, y por otra implementar una técnica alternativa de medición del nivel de contaminación de los vehículos con motor a ciclo diésel. Utilizando los datos medidos en carretera de los FE de masa de PM<sub>2.5</sub>/km-ton y #/km-ton, fueron relacionados con la concentración de PM<sub>2.5</sub> en masa y número en un ralentí (motor encendido y en vacío, denominado marcha mínima) caliente durante 60 segundos. A partir de lo anterior, se identificaron como vehículos con alto grado de contaminación, aquellos que en sus emisiones de gases superaban dos umbrales: 5 mgPM<sub>2.5</sub>/m<sup>3</sup> y 2.000.000 #/cm<sup>3</sup>, teniendo presente que en la actualidad no es obligatorio que estos vehículos tengan dispositivos de filtros de partículas. Con estos valores limitantes se realizó entre agosto y septiembre de 2019 un piloto voluntario de aplicación de distintivos ambientales, inicialmente para aquellas empresas que atendieron los llamados del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, mediante la Resolución Metropolitana 911 de 2017, actualizada con la Resolución 901 de 2019, así como las empresas que han participado en el Comité Técnico Intersectorial del Plan Integral de Gestión de la Calidad del Aire –PIGECA (Acuerdo Metropolitano 16 de 2017) y los gremios que han participado activamente de la Alianza Logística Regional Antioquia, que quisieran que sus vehículos con motor a ciclo diésel estuvieran exentos de restricción de movilidad durante el período de episodio crítico de calidad del aire previsto para los meses de octubre y noviembre de 2019. Como resultado de la prueba, se encontró que, de los 1547 vehículos medidos, el 50% aprobó. Se detectó un alto grado de no aprobación en los vehículos de modelos inferiores al año 2000, aunque el 14% de los vehículos más nuevos (modelo 2019 y 2020) no pasaron tampoco la prueba, bajo los umbrales definidos.

# CAPÍTULO 1

## CONTEXTUALIZACIÓN DE LOS PROBLEMAS DE CALIDAD DEL AIRE EN GRANDES CENTROS URBANOS

La contaminación del aire por emisiones gaseosas o material particulado tiene impacto tanto a escala local, poniendo en riesgo la vida de quienes habitamos los grandes núcleos urbanos (seres humanos, fauna y flora), como también a escala planetaria mediante el incremento de la temperatura media del planeta a través del denominado efecto invernadero. El dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) es un gas contaminante que se ha convertido en el principal responsable del calentamiento global. Se genera no sólo por la quema de combustibles, sino además de manera natural en cantidades gigantescas mediante procesos de descomposición de materia orgánica, actividad volcánica, entre otros.

El  $\text{CO}_2$  es un gas necesario para la vida en el planeta, localizado en la delgada capa atmosférica, se encarga de regular nuestra temperatura controlando la radiación solar, además de ser fuente indispensable para la fotosíntesis de las plantas, generando en este proceso el oxígeno necesario para la vida. Se estima que por debajo de 150 ppm de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera no podríamos vivir por las bajas temperaturas que se alcanzarían. No obstante, su exceso provocaría temperaturas tan elevadas que pondrían en riesgo la vida. No está claro aún si la responsabilidad en la generación excesiva de  $\text{CO}_2$  que padecemos actualmente es sólo del ser humano, de la misma actividad del planeta o de ambas. Esto ha dado lugar a dos movimientos antagonistas, los que creen en la última teoría, denominados escépticos, y los que se han decantado por la primera teoría, agrupados en el panel intergubernamental de cambio climático (IPCC). Estos últimos han reforzado sus teorías argumentando que existe una relación directa entre el incremento medio de la temperatura del planeta y la emisión de  $\text{CO}_2$  posterior a la denominada “era industrial”, surgida en Inglaterra en la primera mitad del siglo XIX, en la que se masificó el uso intensivo del carbón como principal fuente energética.

El protocolo de Kioto de las naciones unidas, identificó seis gases contaminantes responsables del efecto invernadero:  $\text{CO}_2$ , metano ( $\text{CH}_4$ ), óxido nitroso o “gas de la risa” ( $\text{N}_2\text{O}$ ), hexafluoruro de azufre, gases hidrofluorocarbonos y perfluorocarbonos. En este protocolo se acordó la reducción de al menos 5 % de las emisiones de estos gases en el periodo de tiempo comprendido entre 2008 y 2012 en comparación con las emisiones registradas en 1990 (Protocolo de Kioto de la convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático, 1998). Esta meta aún no se ha alcanzado, y continúa en constante revisión. Desafortunadamente el

modelo de desarrollo que hemos elegido los humanos, intensivo en el consumo de energía térmica y eléctrica, nos mantiene altamente dependientes de los combustibles fósiles, cuyo proceso de combustión libera enormes cantidades de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. Estados Unidos de Norteamérica, China e India, los países que más CO<sub>2</sub> producen en el planeta, no se han decidido a firmar ninguno de los protocolos que obligan a reducir los gases de efecto invernadero (GEI).

La segunda de las problemáticas en términos de calidad del aire ocasionada por la contaminación ambiental está localizada a nivel de los principales centros urbanos, en los cuales se les ha identificado como causantes del detrimento en la salud humana cuando se exceden ciertos límites. La exposición prolongada o breve, pero en elevadas concentraciones, a emisiones contaminantes y en especial a partículas respirables suspendidas en el aire, representa una amenaza para la salud pública. Respirar aire viciado con material particulado de tamaño igual o menor a 2.5 micrómetros (PM<sub>2.5</sub>), puede causar un número de enfermedades cardiovasculares y del sistema respiratorio, causando en algunos casos la muerte prematura. La Organización Mundial de la Salud (OMS), apoyada en las evidencias reportadas por la Agencia Internacional de Investigación en Cáncer (IARC) declaró en 2012 que las emisiones de vehículos diésel (tanto gaseosas como de material particulado) eran carcinogénicas para el ser humano (L. Benbrahim-Tallaa et al., 2012). En la Figura 1.1 se resume gráficamente el impacto global y local de la contaminación del aire ambiente.

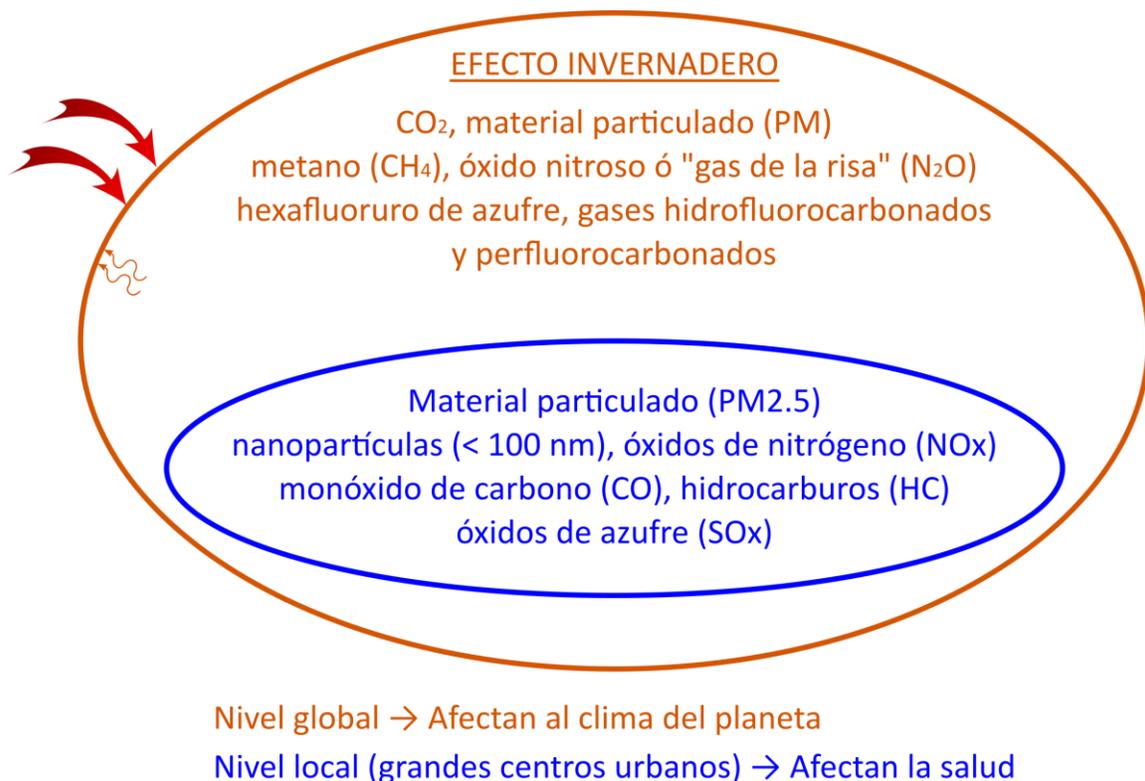


Figura 1.1. Efectos de la contaminación del aire ambiente

## 1.1. LA CALIDAD DEL AIRE EN LAS GRANDES CIUDADES DE LATINOAMÉRICA

La Organización Panamericana de la Salud (OPS) ha señalado como causas comunes de contaminación del aire excesiva en los grandes centros urbanos latinoamericanos las siguientes (Castillo, 2019):

- El transporte público, que a pesar de ser el medio de transporte dominante, está dotado con una flota antigua. En Colombia, por ejemplo, la resolución 1111 de 2013 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS, 2013), obliga a que todo vehículo diésel que ingrese al país después del 1ro de enero de 2015 cumpla con la normativa de emisiones contaminantes denominada Euro 4 para vehículos menores a 3,8 toneladas de peso vehicular bruto, o Euro IV para mayores. Esta norma entró en vigencia en Europa a comienzos de 2006, y fue reemplazada por la norma Euro 5/V a partir de 2011, lo que significa que los vehículos diésel nuevos en Colombia tendrían en promedio un rezago tecnológico de 14 años respecto a los europeos, quienes actualmente exigen Euro 6d para vehículos livianos y Euro VI para vehículos pesados.
- El servicio de transporte público suele ser deficiente y está en manos del sector privado, por lo que obedece a las leyes de la oferta y la demanda.
- En algunos países Latinoamericanos se sigue usando leña y carbón para cocinar, inclusive en áreas urbanas, en los denominados cordones de miseria.
- El crecimiento desorganizado de las grandes conurbaciones latinoamericanas, y una planificación urbana en la región que combina zonas residenciales e industriales.
- La problemática de erosión e incendios.
- La elevada tasa de motorización en Latinoamérica, que tiene el mayor crecimiento en el mundo, y el alto contenido de azufre que suelen tener los combustibles.

Sumado a lo anterior, se pueden listar varias causas adicionales que finalmente contribuyen a la mala calidad del aire ambiente de los grandes centros urbanos:

- Deficiencias en la gestión de la calidad del aire. Esta causa recoge varios elementos a su vez, como la falta de comunicación entre las mismas entidades administrativas del estado, así como del diálogo intersectorial que vincula también a los ciudadanos, las empresas, la academia y el estado.
- Cambios de política estatal frecuente asociadas principalmente a las elecciones de nuevos representantes del gobierno nacional y de los administradores regionales y municipales.
- Desarticulación de la salud como eje transversal en las políticas ambientales.
- Falta de regulación de emisiones contaminantes tóxicas tanto por fuentes fijas como por fuentes móviles
- Deficiencia en la educación y cultura de los ciudadanos, principalmente en materia medio ambiental.
- Desigualdad social y mala distribución de los ingresos.
- Crecimiento poblacional desmesurado e insostenible, y con gran centralización en las grandes conurbaciones

En la Figura 1.2 se muestra una fotografía de la zona norte de la región metropolitana del valle de Aburrá. Esta fue tomada desde un lugar ubicado en cercanías de la central minorista de abastos de la ciudad de Medellín, y permite observar el contraste en términos de calidad de aire atmosférico entre un día sin episodio crítico (superior) y uno con estado de prevención o de alerta declarada por elevada concentración de PM2.5.



Figura 1.2. Impacto visual de un evento de episodio crítico de calidad de aire por elevada concentración de PM2.5 sobre la zona norte del valle de Aburrá

## 1.2. GESTIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE

En Latinoamérica, a pesar de que 21 países tienen estándares de la calidad del aire, solo 13 de ellos tienen leyes, políticas, o reglamentos que obligan a gestionar la calidad del aire. Según la OPS, en la región sólo 20 países cuentan con información sobre calidad del aire ambiental a nivel superficial en al menos una de sus ciudades, y solo nueve tienen programas de aseguramiento y control de calidad de datos. Así mismo solo siete países tienen planes con acciones específicas para mejorar la calidad del aire a nivel nacional o en al menos una de sus ciudades (Castillo, 2019).

Colombia en particular cuenta con un documento de política pública recientemente expedido en el que se traza una línea de tiempo para el mejoramiento de la calidad del aire (CONPES, 2018), además de una serie de resoluciones emitidas por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, entre las que destacan la 909 de 2008 que limita las emisiones de fuentes fijas, y la resolución 910 del mismo año que fija los límites de emisiones que deben cumplir todos los vehículos, nuevos y en uso, que circulen o ingresen al territorio nacional. Esta última resolución sufrió una modificación parcial en 2013 (Resolución 1111), mediante la cual se introdujo el estándar de emisiones Euro 4/IV de los vehículos nuevos diésel. Por su parte los vehículos a ciclo Otto (llamados comúnmente a gasolina), siguen cumpliendo con el estándar Euro 2, debido a que la resolución 1180 de 2006 del MADS y del MME, mantiene el límite de 300 ppm de azufre. La calidad del combustible diésel está regulada por las resoluciones 9 0963 de 2014 y 4 0619 de 2017 de los ministerios de Minas y Energía (MME) y MADS, en las cuales el contenido de azufre del combustible diésel está limitado a un máximo de 50 partes por millón en masa (ppm), que correspondía con la calidad de combustible exigida en Europa para la norma Euro 4/IV. La empresa colombiana de petróleos (Ecopetrol) ha hecho público recientemente, que el combustible diésel que se proporciona actualmente a la región metropolitana del Valle de Aburrá contiene alrededor de 10 ppm de azufre, combustible recomendado para vehículos provistos con tecnologías Euro 6/VI, lo que supone una posibilidad de actualización tecnológica importante para nuestra región metropolitana. Con este esfuerzo, Ecopetrol ha logrado adelantarse a los requerimientos que por ley le obliga el gobierno, tal como quedó establecido en el documento de política para el mejoramiento de la calidad del aire CONPES 3943 de 2018.

El MADS de Colombia emitió la resolución 2254 de 2017 por la cual se actualiza una norma que establece los niveles máximos permisibles de contaminantes criterio y de contaminantes tóxicos en aire ambiente. Esta resolución establece también los umbrales máximos que se deberán cumplir para el año 2030 en términos de material particulado (PM10 y PM2.5), así como de contaminantes gaseosos criterio SO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub>. Más recientemente el congreso de la república emitió la ley 1972 de 2019, por la cual se establecieron medidas tendientes a reducir emisiones contaminantes provenientes de fuentes móviles, con especial énfasis en el material particulado, con el fin de resguardar la vida, la salud y goce de un ambiente sano. En su artículo 4, esta ley actualiza la regulación 1111 de 2013, exigiendo el ingreso al país de tecnologías Euro VI o su equivalente para vehículos nuevos a ciclo diésel a partir de 2023. La verificación del cumplimiento se deberá hacer mediante el procedimiento de ciclo de conducción armonizado denominado WHTC (*World Wide Harmonized Test Cycle*).

En la Figura 1.3 se presenta gráficamente un resumen del esquema legal del país, enfocado a mejorar la calidad del aire. Se destaca de la ley 1972 de 2019 su artículo 10, mediante el cual se promueve la creación de una Comisión intersectorial de calidad de aire en todos los municipios y distritos del país. Esta iniciativa ya venía realizándose tiempo atrás en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, mostrando la importancia de los diálogos compartidos con entidades de gobierno, industria, academia y representantes de la comunidad, en la gestión de la calidad del aire.

El Área Metropolitana del Valle de Aburrá cuenta con su Plan Integral de Gestión de la Calidad del Aire (PIGECA) adoptado mediante Acuerdo Metropolitano 16 de 2017 y clasifica la cuenca del valle de Aburrá como área fuente de contaminación por PM2.5. El PIGECA cuenta con diez ejes temáticos y cinco ejes transversales (Figura 1.4) que buscan, mediante un diálogo coordinado y constructivo entre diferentes actores del estado, industria, academia y comunidad, que nuestra región cumpla con las guías de la Organización Mundial de Salud en términos de calidad de aire, particularmente, se busca lograr que la concentración anual promedio de PM2.5 para el año 2030 sea inferior a 23 µg/m<sup>3</sup> y que la concentración de ozono durante 8 horas no supere 72 µg/m<sup>3</sup> (Soto, 2018).

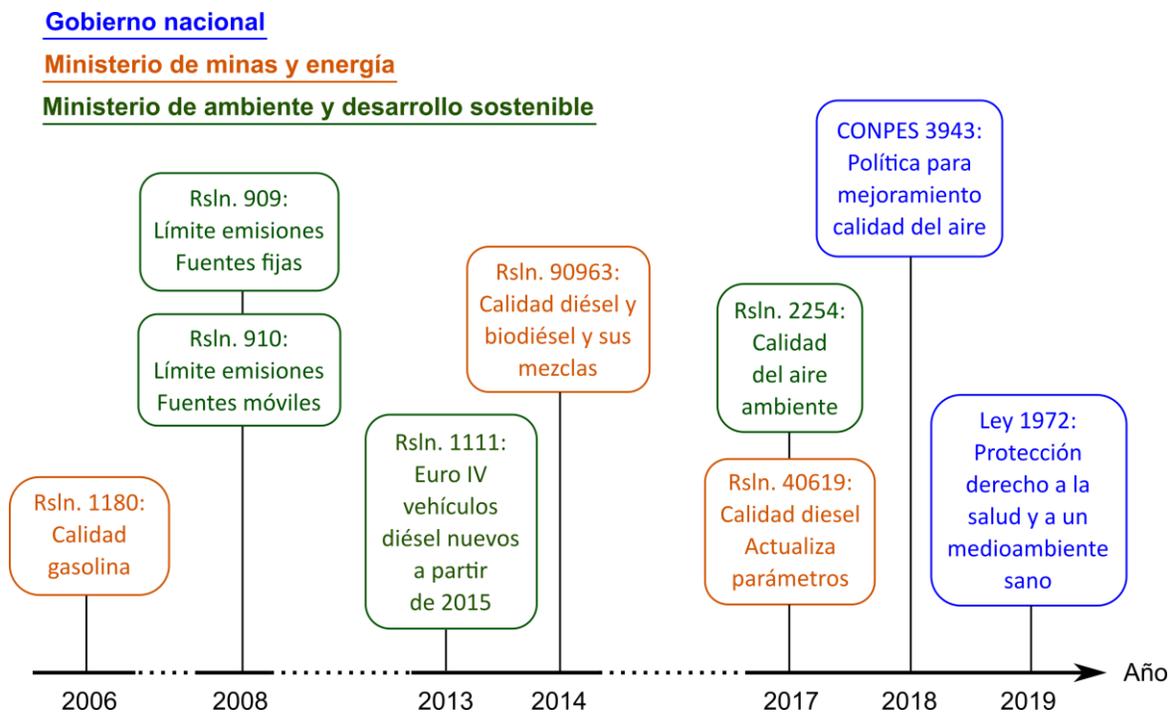


Figura 1.3. Hitos en términos de política pública en calidad del aire ambiente en Colombia

## Ejes temáticos:



Figura 1.4. Plan Integral de Gestión de la Calidad del Aire (PIGECA) del Valle de Aburrá (Soto, 2018)

### 1.3. LA SALUD COMO EJE CENTRAL EN LA GESTIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE

De acuerdo con los reportes de la Organización Panamericana de la Salud (OPS), durante 2016 más de 150 millones de personas en América Latina viven en ciudades que exceden las Guías de Calidad del Aire de la OMS, cerca de 320,000 muertes eran atribuibles a la contaminación del aire en la región, convirtiéndola en el principal riesgo ambiental para la salud en Latinoamérica. Los modelos utilizados por la OPS arrojan que los costos de externalidades por atenciones médicas asociadas a la mala calidad del aire alcanzaron en 2016 entre el 2 % y 4% del producto interior bruto (PIB) en países en desarrollo (Castillo, 2019).

Por su parte, el Departamento Nacional de Planeación (DNP) de la República de Colombia, reportó que en 2015 aproximadamente 8.000 muertes podrían estar relacionadas con la mala calidad del aire en Colombia. Esto equivale al 9% de las muertes no violentas en el país, y a una tercera parte de las ocasionadas por tabaquismo. El DNP estima que más de 7.000 muertes estarían relacionadas con enfermedades cardiovasculares, cerca de 700 por cáncer de pulmón en personas mayores de 44 años y alrededor de 20 en niños menores de 5 años. En términos de morbilidad, el estudio del DNP reporta que la mala calidad del aire supondría para el país más de 124.000 atenciones hospitalarias por enfermedades en vías respiratorias y cerca de 4.000 casos por bronquitis crónica. Entre 1.9 y 12.3 billones de pesos le cuesta a la nación la morbilidad y mortalidad por mala calidad del aire, lo que equivale entre 0.2% y 1.5% del producto interior bruto (PIB) de 2015 de Colombia (DNP, 2018).

El Área Metropolitana del Valle de Aburrá poniendo a la salud como eje central en su gestión, mediante contratos con la Facultad Nacional de Salud Pública de la Universidad de Antioquia, realizó desde el año 2016 varios estudios que permitieron conocer la relación entre los efectos en la salud y la calidad del aire en el Valle de Aburrá. Las investigaciones reportaron hallazgos significativos sobre los efectos de los contaminantes PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub> y O<sub>3</sub> en la morbilidad y mortalidad por los eventos de salud seleccionados (enfermedades del sistema respiratorio y circulatorio) en los diez municipios que componen el Valle de Aburrá. Los estudios revelan que un incremento de 10 µg/m<sup>3</sup> en las concentraciones de los contaminantes PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> y O<sub>3</sub>, tuvieron efecto en el aumento del riesgo de casos por enfermedades respiratorias o circulatorias en la población de diferentes municipios del Valle

de Aburrá durante el período 2008-2017. Es sólida la evidencia de los efectos de los tres contaminantes sobre enfermedades respiratorias en menores de 5 años en la región (Piñeros Jiménez et al., 2018).

#### 1.4. LA CALIDAD DEL AIRE EN LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

Dentro de los 17 objetivos de desarrollo sostenible (ODS), conocidos también como objetivos mundiales adoptados en 2015 por los estados miembros del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), que buscan un llamado universal para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y garantizar que todas las personas gocen de paz y prosperidad para el año 2030, hay tres de ellos que buscan reducir los efectos adversos a la salud por la contaminación del aire:

##### ODS3: SALUD Y BIENESTAR

Según el diagnóstico del PNUD, cada dos segundos, una persona de entre 30 y 70 años de edad muere prematuramente a causa de enfermedad cardiovascular o respiratoria crónica, diabetes o cáncer y además siete millones de personas mueren cada año a causa de la exposición a partículas finas en el aire contaminado.

Es una meta entonces del PNUD dentro de este ODS, *“reducir sustancialmente el número de muertes y enfermedades producidas por productos químicos peligrosos y la contaminación del aire, el agua y el suelo”* (Objetivos de Desarrollo Sostenible, PNUD, 2016).

##### ODS7: ENERGÍA ASEQUIBLE Y NO CONTAMINANTE

En cifras, el PNUD reporta que la energía obtenida a partir de combustibles es uno de los grandes contribuyentes al cambio climático, y representa alrededor del 60% de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero. Más del 40% de la población mundial, tres mil millones de personas, dependen de combustibles contaminantes e insalubres para cocinar.

Las metas del ODS7 que podrían relacionarse con la contaminación ambiental consisten en *“garantizar el acceso universal a servicios energéticos asequibles, fiables y modernos”, y “aumentar la cooperación internacional para facilitar el acceso a la investigación y la tecnología relativas a la energía limpia, incluidas las fuentes renovables, la eficiencia energética y las tecnologías avanzadas y menos contaminantes de combustibles fósiles, y promover la inversión en infraestructura energética y tecnologías limpias”* (Objetivos de Desarrollo Sostenible, PNUD, 2016).

##### ODS11: CIUDADES Y COMUNIDADES SOSTENIBLES

En este ODS, el PNUD encontró que más de la mitad de la población mundial vive hoy en zonas urbanas. En 2050, esa cifra habrá aumentado a 6.500 millones de personas, dos tercios de la humanidad. Las ciudades ocupan solo el 3% de la tierra, pero representan entre el 60% - 80% del consumo de energía y al menos el 70% de las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera. Según el PNUD, no es posible lograr el desarrollo sostenible sin transformar radicalmente la forma en que construimos y administramos los espacios urbanos.

Dentro de las diez metas que se ha trazado el PNUD para lograr el ODS11, la que se relaciona directamente con el tópico de interés de este capítulo consiste en: *“reducir el impacto ambiental negativo per cápita de las ciudades, incluso prestando especial atención a la calidad del aire y la gestión de los desechos municipales y de otro tipo”* (Objetivos de Desarrollo Sostenible, PNUD, 2016).

El Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), en su diagnóstico del objetivo de desarrollo sostenible 13 (ODS13: Acción por el clima) afirma que, *“al 2017, los humanos han causado aproximadamente un calentamiento global de 1°C por encima de los niveles preindustriales. El nivel del mar promedio aumentó 20 cm desde 1880, y se proyecta que aumentará otros 30-122 cm para 2100. Para limitar el calentamiento a 1,5°C, las emisiones mundiales de CO<sub>2</sub> deben disminuir en un 45% entre 2010 y 2030, y alcanzar el cero alrededor de 2050”* (Objetivos de Desarrollo Sostenible, PNUD, 2016).

## 1.5. EMISIONES CONTAMINANTES DEL SECTOR TRANSPORTE: GENERACIÓN E IMPLICACIONES

Entre las emisiones gaseosas más relevantes se encuentra el monóxido de carbono CO. Este gas es venenoso, y aún en concentraciones bajas, una exposición prolongada en ambientes cerrados puede causar la muerte. Se emite principalmente debido a la combustión incompleta, y normalmente los vehículos con motores de encendido provocado (motocicletas y vehículos a gasolina o gas natural) son la fuente principal.

Como consecuencia de la combustión incompleta, así como por evaporación de la gasolina durante el repostaje de combustible, se emiten hidrocarburos sin quemar o parcialmente quemados denominados hidrocarburos totales (HC). Estos contaminantes comprenden los compuestos orgánicos volátiles (COV), los cuales son altamente tóxicos, causando enfermedades del sistema respiratorio, y algunos de ellos son cancerígenos, además de que promueven la formación del denominado *smog* fotoquímico, esa nube marrón-rojiza espesa que se forma como domos en las grandes ciudades con aire contaminado, y que son el fruto de reacciones secundarias de COV en la atmósfera, promovidas por la luz del sol.

Uno de los contaminantes más importantes, sobre todo en la región metropolitana del Valle de Aburrá, es el denominado material particulado (MP). El MP se forma en la combustión de cualquier combustible (gas natural, biocombustibles, gasolina, diésel, diésel renovable, etc.) y por supuesto del carbón. El MP se genera a través de reacciones químicas entre el hidrocarburo (que puede ser combustible o aceite lubricante) y el oxígeno del aire. Consiste normalmente de un núcleo carbonoso, denominado “carbono negro”, el cual contiene atrapados en su microestructura compuestos altamente complejos que afectan a la salud de los seres vivos. Adicionalmente, se adhieren y se forman otras sustancias provenientes de esas reacciones químicas complejas, dando lugar a la partícula. Las emisiones en masa (por peso) de MP en vehículos con motores de encendido por compresión (llamados comúnmente motores diésel) suelen ser significativamente mayores que las de aquellos de encendido provocado (llamados de gasolina). La razón principal para que esto ocurra es que, en los motores diésel, gran parte del proceso de combustión ocurre por difusión, donde predomina el tiempo de mezclado de los reactivos, en zonas con mezclas aire/combustible altamente estratificadas (desde muy ricas, hasta demasiado pobres en combustible), mientras que, en los motores de encendido por chispa, normalmente la combustión ocurre en una premezcla del aire y el combustible en proporciones estequiométricas.

Las partículas contienen hidrocarburos condensados en su superficie que son tóxicos para los seres vivos, y que han sido declaradas como cancerígenas para el ser humano. Las emisiones de MP se suelen clasificar por su tamaño, siendo las más pequeñas más peligrosas, por su facilidad de traspasar los filtros y barreras del sistema respiratorio y llegar directamente al torrente sanguíneo y al cerebro. Aquellas con un diámetro igual o menor a 10 micrómetros ( $\mu\text{m}$ ) se conocen como PM10. Del mismo modo se llama PM2.5 a las partículas con tamaño igual o menor a 2.5  $\mu\text{m}$ , y PM1 a las partículas finas, con tamaño por debajo de 1  $\mu\text{m}$ . Actualmente se está prestando atención a las denominadas “nanopartículas”, las cuales han sido definidas como *“un material natural, secundario o fabricado que contenga partículas, sueltas o formando un agregado o aglomerado y en el que el 50 % o más de las partículas en la granulometría numérica presente una o más dimensiones externas en el intervalo de tamaños comprendido entre 1 nm y 100 nm. En casos específicos y cuando se justifique por preocupaciones de medio ambiente, salud, seguridad o competitividad, el umbral de la granulometría numérica del 50 % puede sustituirse por un umbral comprendido entre el 1% y el 50%”* (European Commission, 2011). Según un estudio realizado en el Valle de Aburrá (AMVA, 2018), más del 80% del PM2.5 proviene de fuentes móviles. Por esta razón, es tan relevante implementar estrategias que busquen reducir emisiones en el sector transporte en nuestra región.

Otros gases contaminantes regulados en fuentes móviles, además del CO, HC y CO<sub>2</sub>, son los denominados óxidos de nitrógeno (NOx), a los que se les ha identificado como principales responsables de la generación de ozono en la atmósfera y de formación de MP secundario por reacciones fotoquímicas. Gran parte de los NOx se forman por reacciones químicas entre el aire y el combustible a elevadas temperaturas. Mientras que las emisiones de CO y

CO<sub>2</sub> se encuentran en elevadas concentraciones en los gases de escape (unidades de porcentaje en volumen), las emisiones de HC y NOx, aparecen en partes por millón (ppm).

A nivel internacional, la referencia para la regulación de emisiones de fuentes móviles son las normas europeas, llamadas EURO. Suelen ir acompañadas de números arábigos, que se emplean para identificar los límites de emisiones máximas de vehículos livianos (motor de encendido por compresión -MEC) en Tabla 1.1, y motor de encendido por chispa –ciclo Otto- en Tabla 1.2) o por números romanos para vehículos pesados (mayores a 3.8 toneladas de peso bruto vehicular, Tabla 1.3). Desde inicios de la década de los noventa, cuando entró en vigencia la norma EURO I, las normas de emisiones EURO han evolucionado rápidamente, introduciendo reducciones drásticas en los principales contaminantes tanto de vehículos livianos como pesados, operando con combustibles para encendido por chispa o para encendido por compresión. Los límites de emisión establecidos por las normas EURO se imponen a vehículos nuevos que vayan a entrar al mercado europeo. Sin embargo, se han adoptado en otras regiones del mundo, ya que han mostrado ser efectivas y en cierta forma han moldeado el desarrollo tecnológico de la industria automotriz en las décadas recientes.

Por otra parte el control de emisiones de vehículos en uso no se lleva a cabo mediante ninguna norma EURO, sino mediante la regulación nacional (resolución 910 de 2008). A estos vehículos que ya están circulando se les controla el estado de mantenimiento mediante los centros de diagnóstico automotriz, encargados de ejecutar la inspección técnica periódica. A lo largo de los años se han introducido sistemas y dispositivos que permiten reducir las emisiones contaminantes en los motores diésel, buscando cumplir las normas de emisión vigentes. En la Tabla 1.4 se presenta un resumen de los más representativos y su función dentro del motor. Para el caso de la recirculación de gases de escape a la admisión (EGR), con la entrada en vigencia de la norma EURO 4/IV, algunos fabricantes añadieron una etapa de enfriamiento de los gases recirculados antes de llevarlos a la admisión, con lo cual se logra mayor disminución de las emisiones de NOx.

Tabla 1.1. Límites normativos de emisiones contaminantes en Europa para vehículos con motor de encendido por compresión livianos, es decir menores a 3,8 toneladas de peso bruto vehicular (g/km)

Datos	Euro 1	Euro 2	Euro 3	Euro 4	Euro 5a	Euro 5b	Euro 6	% reducción hasta Euro 6
Publicación	1991	1994	1998	1998	2007	2007	2008	
Aplicación	1992	1996	2000	2005	2009	2011	2014	
Ciclo	Nuevo ciclo de conducción europeo (NEDC)							
	Límite							
CO (mg/km)	2720	1000	640	500	500	500	500	82
THC + NOx (mg/km)	970	700	560	300	230	230	170	82
NOx (mg/km)	-	-	500	250	180	180	80	84
PM (mg/km)	140	80	50	25	5	4.5	4.5	97
PN (#/km)	-	-	-	-	-	6 x 10 <sup>11</sup>	6 x 10 <sup>11</sup>	-

Tabla 1.2. Límites normativos de emisiones contaminantes para vehículos a ciclo Otto livianos, es decir menores a 3,8 toneladas de peso bruto vehicular (g/km)

Norma	Fecha de implementación	CO (mg/km)	HC (mg/km)	HC+NOx (mg/km)	NOx (mg/km)	PM (mg/km)	PN (#/km)
Euro 1	31 Dic. 1992	2720	-	970	-	-	
Euro 2	1 enero 1997	2200	-	500	-	-	
Euro 3	1 Enero 2001	2300	200	-	150	-	
Euro 4	1 Enero 2006	1000	100	-	80	-	
Euro 5	1 enero 2011	1000	100	-	60	5	
Euro 6	1 Sept. 2015	1000	100	-	60	4.5*	6 X 10 <sup>11</sup> *

\* Aplica para vehículos con motor a gasolina de inyección directa (GDI)

Tabla 1.3. Límites normativos de emisiones de PM para vehículos con motor de encendido por compresión pesados (mayores a 3,8 toneladas de peso bruto vehicular)

Datos	Euro III		Euro IV		Euro V		Euro VI	
Año de implementación	2000		2005		2008		2014	
Ciclo	ESC <sup>a</sup>	ETC <sup>b</sup>	ESC	ETC	ESC	ETC	ESC	ETC
Límite PM (mg/kWh)	100	160	20	30	20	30	10	
Ciclo							WHSC*	WHTC**
Límite PN (#/kWh)	-		-		-		8 x 10 <sup>11</sup>	6 x 10 <sup>11</sup>

<sup>a</sup> *European Steady Cycle* (ciclo estacionario europeo)

<sup>b</sup> *European Transient Cycle* (ciclo transitorio europeo)

\* *World harmonised steady cycle* (ciclo estacionario armonizado mundialmente)

\*\* *World harmonised transient cycle* (ciclo transitorio armonizado mundialmente)

Los filtros de partículas diésel (DPF) se clasifican entre los de flujo parcial y los de flujo total, según el flujo de gases de escape sea obligado a cruzarlo parcial o totalmente. Aunque los hay de tipo metálico, los más comunes contienen un monolito de cerámica con micro-canales, en el cual los conductos están obstruidos alternadamente para obligar a que todo el gas de escape pase a través de sus paredes porosas y atrapar de esa manera las partículas. En este paso a través de los canales, las partículas se quedan atrapadas en las paredes, y los gases salen prácticamente sin partículas. A medida que los canales se van obstruyendo con material particulado comienza a aumentar la energía necesaria para hacer circular la corriente de gases a través de éste. Por este motivo, los DPF requieren cada cierto tiempo de un proceso de limpieza denominado también como regeneración. Normalmente cuando se trata de DPF instalados por el propio fabricante del motor (OEM) este proceso se realiza de forma automática en función de la caída de presión a través del dispositivo. Cuando esta alcanza un valor máximo, se calienta el DPF para quemar las partículas atrapadas en él. El calentamiento necesario se puede conseguir mediante una resistencia eléctrica, o mediante el control de la inyección del vehículo, con lo cual se envía una ráfaga de gases calientes hasta el filtro cuando sea necesario. En caso de que el DPF no se regenere adecuadamente conlleva su colmatación y consecuente daño del motor ocasionado por elevada contrapresión en el sistema de escape. En la Figura 1.5 se muestra un ejemplo de un DPF comercial seccionado, típico de algunos camiones pequeños del Valle de Aburrá.

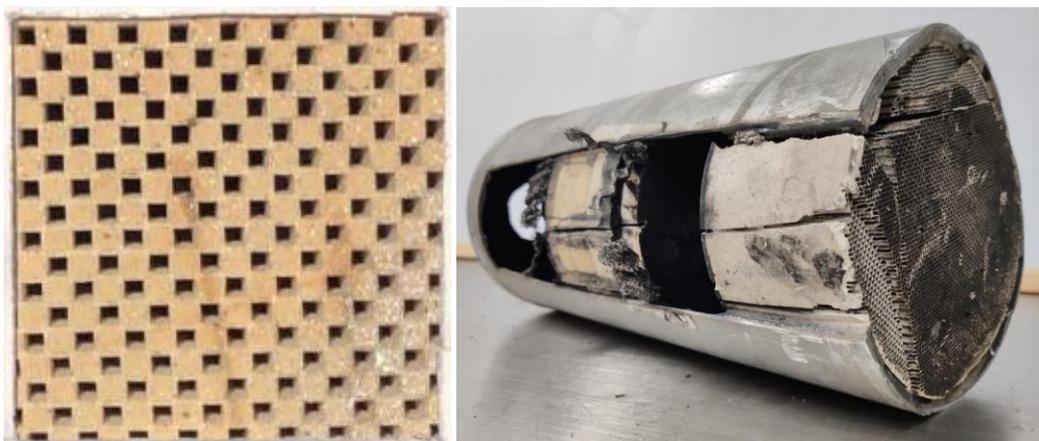


Figura 1.5. Filtro de partículas diésel. Izq.: número de celdas por pulgada cuadrada en el monolito cerámico. Der.: DPF comercial en corte

Tabla 1.4. Dispositivos más comunes para control de emisiones en fuentes móviles

Tipo de motor	Denominación	Función	Requerimientos
Encendido por chispa (ciclo Otto)	Catalizador de tres vías + sonda lambda	Oxida CO y HC en CO <sub>2</sub> y vapor de agua Reduce NOx en N <sub>2</sub>	Control preciso de la relación aire/combustible
	EGR	Recircula una fracción de gases de escape a la admisión para diluir la carga y bajar NOx	
	Válvula PCV	Recuperar gases y vapores del cárter hacia la admisión	
	Cánister	Recupera gases del combustible atrapados en una trampa de carbón activo, hacia la admisión	
Autoencendido (ciclo Diésel)	EGR (desde preEuro)	Recircula una fracción de gases de escape a la admisión para diluir la carga y bajar NOx	Menos de 50 ppm de azufre en el combustible
	DOC (a partir de Euro 3/III)	Oxida CO y HC en CO <sub>2</sub> y vapor de agua. Se genera NO <sub>2</sub> , el cual forma parte de los NOx.	
	DPF (a partir de Euro 5/V)	Disminuye el material particulado. En versiones previas a Euro 5/IV se suelen implementar mediante la técnica de "retrofitting"	Menos de 15 ppm de azufre en el combustible
	SCR (a partir de Euro 5/V)	Disminuye las emisiones de NOx. Requiere inyección de un fluido adicional que suele ser urea	

Finalmente, a partir de la norma EURO V, algunos fabricantes decidieron introducir la tecnología de reducción catalítica selectiva (SCR) para controlar la emisión de NOx en motores diésel. Al final del escape, antes del silenciador, se inyecta un fluido rico en nitrógeno (generalmente urea), antes de hacer pasar la corriente de gases a través de un sistema de catálisis que sólo afecta a compuestos nitrogenados (selectivo). Con este sistema de control de emisiones se consigue convertir los NOx a nitrógeno molecular (N<sub>2</sub>), el cual existe de forma natural en el aire que respiramos. En algunos casos se emiten cantidades pequeñas de amoníaco, lo cual puede llegar a ser un inconveniente de este tipo de sistemas, por ser un gas altamente peligroso para la salud humana.

En el Valle de Aburrá existe una variedad de tecnologías de vehículos con control de emisiones altamente disímiles, incluso entre modelos del mismo fabricante. A raíz de las políticas de la autoridad ambiental, el sector empresarial ha realizado un esfuerzo significativo por modernizar su flota. Aunque la mayor parte de los vehículos diésel nuevos que ingresan están provistos con sistemas de control de emisiones Euro IV en cumplimiento de la resolución 1111 de 2013, se observan algunos que están dotados de fábrica con sistemas como DPF y otros con sistemas SCR, ubicándolos en nivel de emisiones Euro V. Esto último se ha logrado gracias a que Ecopetrol ha estado suministrando combustible diésel con la calidad apropiada para estas tecnologías en la región (menor a 20 ppm de azufre en el combustible diésel).

La implementación de DPF en vehículos que no lo incorporan de fábrica se denomina comúnmente “Retrofitting”. En este caso se pueden lograr reducciones de material particulado que superan el 90%, pero se deben extremar los cuidados y el mantenimiento del motor y del propio DPF para evitar no sólo el daño del DPF, por deficiencias en el proceso de regeneración, sino del mismo motor como se mencionó arriba.

## 1.6. LOS RETOS PARA MEJORAR LA CALIDAD DEL AIRE EN GRANDES CENTROS URBANOS

En primer lugar cumplir con todas las metas propuestas por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo de modo que se logren los 17 objetivos para el desarrollo sostenible del planeta. En segundo lugar, enfrentar de manera coordinada, articulada y organizada un diálogo permanente y coordinado entre el gobierno, las empresas, la academia y representantes de la comunidad que se proponga formular compromisos, acciones y soluciones en el corto, mediano y largo plazo tendientes a solucionar los elementos señaladas en la sección 2 de este capítulo (Causas de la crisis de la mala calidad de aire en las grandes ciudades de Latinoamérica).

A nivel de administraciones locales la Organización Panamericana de la Salud (Castillo, 2019) sugiere:

- *Integrar al sector salud en procesos relacionados con la gestión de la calidad del aire.*
- *Ampliar la visión del rol con el que es percibido el sector salud, más allá de las evaluaciones costo-beneficio y de la evaluación de la carga de enfermedad.*
- *Fortalecer las capacidades del sector salud en los aspectos relacionados con la gestión de la calidad del aire.*

## REFERENCIAS

- AMVA. (2018). *Inventario de emisiones atmosféricas del Valle de Aburrá, actualización 2017. Convenio de Asociación N°CA 583 de 2017.* Retrieved from [http://www.metropol.gov.co/CalidadAire/isdocConvenio243/Informe\\_Inventario\\_emisiones\\_2015.pdf](http://www.metropol.gov.co/CalidadAire/isdocConvenio243/Informe_Inventario_emisiones_2015.pdf)
- Castillo, J. J. (2019). Contaminación del aire y salud el rol del sector salud en la mejora del aire urbano. In *Primera conferencia internacional en emisión de nanopartículas en motores de combustión interna*. Ciudad de México.
- European Commission. Recomendación de la Comisión de 18 de Octubre de 2011 relativa a la definición de nanomaterial, 696/EU Diario Oficial de la Unión Europea § (2011).
- L. Benbrahim-Tallaa, Baan, R. A., Grosse, Y., Lauby-Secretan, B., Ghissassi, F. El, & Bouvard, V. (2012). Carcinogenicity of diesel-engine and gasoline-engine exhausts and some nitroarenes. *The Lancet Oncology*, 13, 663–664.
- Piñeros Jiménez, J. G., Grisales Romero, H. de J., Nieto López, E. S., Montealegre Hernández, N. A., Villa Garzón, F. A., Agudelo Cadavid, R. M., & Cubaque López, H. A. (2018). *Contaminación atmosférica y sus efectos sobre la*

*salud de los habitantes del Valle de Aburrá: 2018-2015.*

*Protocolo de Kioto de la convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático.* (1998). Naciones Unidas.

Soto, E. P. (2018). Programa Integral de Gestión de la Calidad del Aire para el Valle de Aburrá (PIGECA). In *Fortalecimiento de las capacidades institucionales y sectoriales para la implementación del Plan Integral de Gestión de Calidad del Aire (PIGECA)*. Medellín: Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD consultado el 16 de diciembre de 2019.): <https://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals.html>

Dirección Nacional de Planeación –DNP- (2018). República de Colombia. *Valoración económica de la degradación ambiental en Colombia*. Consultado el 16 de diciembre de 2019 en [https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Prensa/Publicaciones/Valoraci%C3%B3n%20Econ%C3%B3mica%20De%20gradacion%20ambiental\\_SD.pdf](https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Prensa/Publicaciones/Valoraci%C3%B3n%20Econ%C3%B3mica%20De%20gradacion%20ambiental_SD.pdf)

Resolución 1111 de 2013 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, por la cual se modifica parcialmente la resolución 910 de 2008

Resolución 9 0963 de 2014 del Ministerio de Minas y Energía y del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de la República de Colombia. Por la cual se establecen los criterios de calidad para los combustibles de uso en motores diésel

Resolución 4 0619 de 2017 del Ministerio de Minas y Energía y del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de la República de Colombia. Por la cual se modifican algunos criterios de calidad para los combustibles de uso en motores diésel

CONPES 3943 (2018) *Política para el mejoramiento de la calidad del aire*. Consejo nacional de política económica y social (CONPES). República de Colombia. Departamento Nacional de Planeación (DNP). Documento

Resolución 909 (2008) Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Republica de Colombia. Por la cual se establecen las normas y estándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas.

Resolución 910 (2008) Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Republica de Colombia. Por la cual se reglamentan los niveles permisibles de emisión de contaminantes que deberán cumplir las fuentes móviles terrestres.

Resolución 1180 (2006). Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial y Ministerio de Minas y Energía de la República de Colombia. Por la cual se establecen los criterios de calidad para los combustibles de uso en motores de encendido por chispa.

Resolución 2254 (2017) Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de la República de Colombia. Por la cual se adopta la Norma de Calidad del Aire Ambiente.

Ley 1972 (2019). Congreso de la República de Colombia. Por medio de la cual se establece la protección de los derechos a la salud y al medio ambiente sano estableciendo medidas tendientes a la reducción de emisiones contaminantes de fuentes móviles y se dictan otras disposiciones



## CAPÍTULO 2

# MOTIVACIÓN PARA MEDIR LOS FACTORES DE EMISIÓN LOCALMENTE EN EL VALLE DE ABURRÁ

En área metropolitana de la región del Valle de Aburrá se han registrado recientemente episodios críticos de contaminación atmosférica por elevada concentración de material particulado PM2.5 proveniente principalmente de fuentes móviles. Este escenario se debe en gran parte al elevado y creciente número de vehículos en circulación y a la tecnología actual del parque automotor, así como a la debilidad de los mecanismos de regulación de emisiones de vehículos, situación que se ve agravada por la topografía, dinámica atmosférica y clima propios de la región. El Área Metropolitana del Valle de Aburrá, como autoridad ambiental local, necesita herramientas objetivas que le asistan en la implementación de medidas conducentes a la disminución de la contaminación del aire. Dentro estas medidas, el inventario de emisiones se convierte en un potente instrumento de política pública para tomar medidas con conocimiento puntual y preciso de las principales fuentes emisoras, así como de las cargas de contaminantes emitidas a la atmósfera de la región en un periodo de tiempo determinado.

Los inventarios de emisión requieren a su vez el conocimiento de los denominados factores de emisión (FE), que se definen como índices que relacionan a la fuente generadora con la cantidad de emisión contaminante en función de su actividad. Así por ejemplo, los FE de vehículos se suelen expresar en masa de un contaminante específico/km, o masa/kWh, mientras que los FE de fuentes fijas (industrias), se suelen expresar en masa de contaminante/contenido energético del combustible usado en sus actividades productivas (toneladas/MJ).

En la medida de lo posible es recomendable que los FE se determinen experimentalmente a las condiciones locales donde se generan las emisiones contaminantes, de este modo se tendrá capacidad de seleccionar tecnologías de transporte adecuadas (vehículos, combustibles, dispositivos, etc.), limitar la actividad productiva de empresas o el flujo vehicular, así como de establecer límites de emisiones que sean coherentes con la realidad local, impuesta por la tecnología de su parque automotor, la cultura de conducción, la topografía, los combustibles disponibles en el mercado, las particularidades del tráfico y de la malla vial en la zona urbana, entre otros.

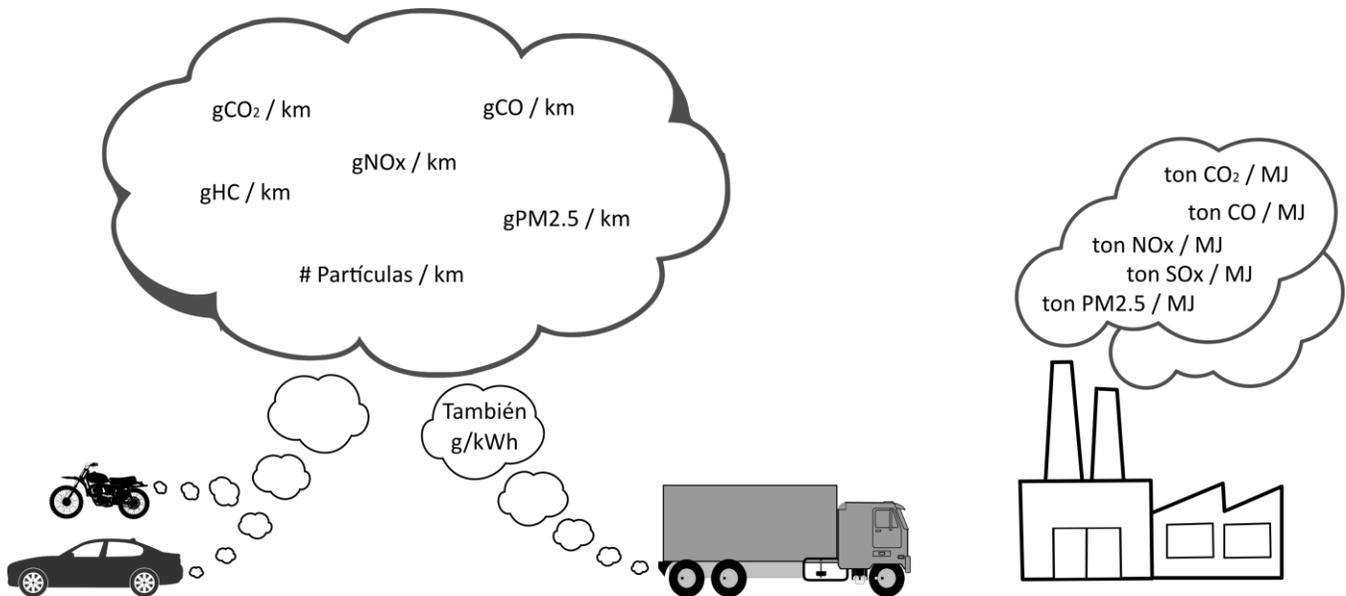


Figura 2.1. Definición gráfica de los Factores de Emisión (FE)

## 2.1. IMPORTANCIA DE LOS FACTORES DE EMISIÓN

Los inventarios de emisión son herramientas que le permiten a los tomadores de decisiones tener un panorama claro de los consumos energéticos y de la carga de emisiones contaminantes que van a la atmósfera en una determinada región geográfica. Se convierten en potentes instrumentos para realizar planificación energética y ambiental, trazar sus planes de gestión, y mantener informada a la comunidad y a los entes de control sobre la situación de la región. Tradicionalmente el Área Metropolitana del Valle de Aburrá ha realizado sus inventarios de emisiones mediante convenios con la Universidad Pontificia Bolivariana, quienes emplean desde el año 2011 el modelo LEAP (*Long-range Energy Alternatives Planning System*) para el análisis de fuentes móviles. Este modelo es ampliamente reconocido y usado en el mundo para el desarrollo de estudios de planeamiento energético y de mitigación de impactos ambientales por carga de contaminantes a la atmósfera.

En la metodología para la elaboración del inventario de emisiones para fuentes móviles del modelo LEAP se requiere del conocimiento de un número importante de variables de los vehículos, las cuales en muchos casos son difíciles de determinar. Por esta razón, el LEAP sugiere el uso de ecuaciones y correlaciones que intentan de la manera más adecuada posible, recoger la realidad de las condiciones de cada región de estudio específica. En la última actualización del inventario de emisiones del año 2016 se utilizaron los siguientes datos de entrada al modelo (AMVA, 2018):

- Categorización de los vehículos por su actividad, tamaño, y tecnología de conversión de energía
- Número de vehículos en la región (existencias y ventas)
- Kilometraje recorrido por el vehículo anualmente
- Rendimiento de combustible
- Factores de emisión

Así, el consumo energético de la región estará determinado por el producto entre el número de vehículos, el kilometraje que recorren al año y su rendimiento de combustible, mientras que la carga de contaminantes emitida en un periodo de tiempo determinado se calculan como el producto del número de vehículos, el kilometraje que

recorren en ese período de tiempo y el factor de emisión. En ambos cálculos (consumo energético y emisiones), se realizan correcciones a través de varios parámetros que intentan recoger la realidad del parque automotor, y que normalmente se recogen de la experiencia de quienes realizan el inventario.

Los valores globales de consumo energético que arroja el modelo LEAP se contrastan con los reportados por entidades del estado para la región del Valle de Aburrá, como la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), o la Dirección de Hidrocarburos adscrita al Ministerio de Minas y Energía. Si los valores no coinciden, se procede a re-ajustar o re-calibrar parámetros dentro del modelo hasta que el consumo modelado se ajuste a los reportados.

Los factores de emisión que requiere el modelo LEAP se obtienen a su vez a partir de otro modelo denominado *International Vehicle Emissions (IVE)*, el cual proporciona FE para cerca de 450 tecnologías vehiculares diferentes (Davis, Lents, Osses, Nikkila, & Barth, 2005). El modelo IVE, a diferencia de otros como el MOVES (United States Environmental Protection Agency, 2015) adoptado por la Agencia de protección del medio ambiente de los Estados Unidos (EPA) y el COPERT de la Agencia europea del medio ambiente (López, Flores, Lumbreras, & Villimar, 2011), fue desarrollado a partir de datos de emisiones medidas a bordo en varias ciudades de los cinco continentes, incluyendo algunas con perfiles de desarrollo similares a la región del Valle de Aburrá.

Las principales limitaciones que tiene el modelo IVE para la determinación de los FE en el Valle de Aburrá se pueden resumir en el siguiente listado:

1. A pesar de incluir cerca de 450 tecnologías vehiculares, muchas de las existentes en el Valle de Aburrá no están en su base de datos
2. Por haber sido realizado en la primera década del 2000, no incorpora vehículos con nuevas tecnologías como la inyección directa de gasolina, ni los vehículos que incorporan sistemas sofisticados de tratamiento de gases de escape tales como SCR (con inyección de urea) o DPF.
3. La precisión del FE de PM<sub>2.5</sub> es cuestionable por la manera como se determina en el modelo, además para la época en la que se desarrolló el IVE no existían en el mercado sistemas de medición de PM<sub>2.5</sub> a bordo con la confiabilidad que tienen los actuales equipos.
4. En el modelo hay incertidumbres asociadas a la calidad y tipo de combustibles y sus mezclas con biocombustibles
5. No alcanza a recoger las condiciones propias de la región del Valle de Aburrá como su topografía, estado de la malla vial y patrón cultural para conducir de sus habitantes

Los autores del modelo IVE recomiendan en su reporte técnico, que lo ideal es que cada ciudad o región determine localmente sus FE. Por esto, y contando que las cinco dificultades mencionadas arriba se podían superar con la medición en condiciones locales, es que ha tenido lugar la ejecución de estos dos convenios entre el Área Metropolitana del Valle de Aburrá y la Universidad de Antioquia, denominados FEVA: Factores de Emisión medidos localmente en el Valle de Aburrá.

## 2.2. LOS FACTORES DE EMISIÓN DENTRO DEL PLAN DE GESTIÓN DE CALIDAD DE AIRE DEL AMVA

El primer eje temático del PIGECA (Generación, aprovechamiento y fortalecimiento del conocimiento científico y la tecnología), tiene implícita varias líneas de acción, dentro de las cuales la número cuatro establece la necesidad de actualizar continuamente el inventario de emisiones, para lo cual es necesario a su vez contar con los FE actualizados. Este trabajo se enfocó en la determinación de los FE medidos localmente para motocicletas, vehículos livianos y vehículos pesados en el Valle de Aburrá, operando con combustibles comerciales.

Como se desarrolla en el Capítulo 3, la medición de los FE conlleva varios pasos metodológicos, dentro de los cuales el primero de ellos consiste en obtener el ciclo de conducción propio de cada región para cada tipo de

vehículo y actividad (transporte particular, de pasajeros o carga). Los ciclos de conducción son una manera de representar los patrones culturales de la manera como conducen los habitantes de una región específica para las diferentes clases de vehículos presentes en su entorno local. Según (Galgamuwa, Perera, & Bandara, 2015), un ciclo de conducción consiste en una serie temporal de velocidad (diagrama que representa la velocidad en función del tiempo) desarrollada con el fin de representar un patrón típico de conducción. Diferentes instituciones a nivel mundial los han desarrollado buscando caracterizar los patrones de conducción y obtener información valiosa de consumo de combustible y carga contaminante arrojada a la atmósfera, usada principalmente por las autoridades ambientales, el sector automotriz, y los responsables de la planeación urbana.

### 2.3. RELEVANCIA DE LOS CICLOS DE CONDUCCIÓN PARA EL AMVA

Los ciclos de conducción reflejan la manera como se conduce y por lo general son obtenidos a partir de bases de datos históricas recopiladas sobre vehículos debidamente instrumentados operando en condiciones reales de tráfico en el contexto territorial de interés. Los ciclos de conducción tienen dos usos principales, de una parte son útiles para determinar el consumo de combustible y los FE de gases contaminantes criterio que se pueden generar en una región en un periodo de tiempo, y de otra, se utilizan para determinar los límites máximos de emisiones que debe emitir un vehículo en condiciones de homologación para ser comercializado en una cierta región. Allí yace su importancia para las autoridades ambientales y para la industria automotriz.

La reproducción de los ciclos de conducción tanto para determinar FE como para homologación de vehículos se realiza por lo general en un chasis dinamométrico provisto de un sistema de rodillos sujetos a un freno, en el cual se realizan mediciones de todas las emisiones contaminantes de interés (Figura 2.2). Mientras que la reproducción de ciclos de conducción para FE se pueden realizar en laboratorios especializados sobre vehículos usados representativos de la zona geográfica en particular y bajo las condiciones impuestas por quien lo ejecuta, los ciclos de homologación se realizan sobre vehículos nuevos que van a salir al mercado y son mucho más estrictos en todos los parámetros, como por ejemplo en la calidad del combustible empleado y en las condiciones ambientales durante la operación. Los valores de emisiones reportados por ambos tipos de ciclos de conducción son muy diferentes como se aprecia en la Figura 2.3.



Figura 2.2. Determinación experimental de los FE en banco de chasis dinamométrico. Izq.: vehículo liviano. Der.: motocicleta

La serie temporal de velocidad suele representarse mediante gráficos o tablas (Figura 2.3). La secuencia de tiempo generalmente tiene un periodo de 1 segundo y en este intervalo por convención se asume que la aceleración es constante. Los ciclos de conducción en general tienen varias formas de clasificarse, una de ellas es la denominada modal o trapezoidal (Agudelo, García-Contreras, Agudelo, & Armas, 2016) y la otra son los ciclos transitorios, más parecidos a la conducción real en vías (Kruse & Huls, 1973). En los ciclos modales predomina la velocidad constante y su desarrollo se basa en lapsos de aceleración y deceleración que emulan ciertos parámetros estadísticos pre-

establecidos. Por su parte en los ciclos transitorios las velocidades variables son comunes y su desarrollo se realiza a través de la recopilación de datos reales de los patrones de conducción.

Los orígenes de los ciclos de conducción para vehículos livianos se remontan a 1956 en Alemania, donde la asociación de ingenieros (*Verein Deutscher Ingenieure*) realizó varios estudios preliminares sobre la contaminación generada por vehículos. Tres años después, en California (USA), se crearon las primeras regulaciones para controlar la contaminación ambiental generada por los vehículos. Estas limitaron las emisiones de monóxido de carbono e hidrocarburos sin quemar en vehículos con motor de encendido provocado. Por su parte Francia desarrolló su propia legislación ambiental para vehículos entre los años 1964 y 1969 (Kuhler & Karstens, 1978).

En otras regiones del mundo como en Asia, se realizaron estudios sobre los ciclos de conducción para utilizarlas en la creación de regulaciones ambientales. Uno de los casos más estudiados a lo largo de la historia ha sido el de *Hong Kong*. En 1999 se realizó el primer estudio sobre un ciclo de conducción para la Península de *Kowloon* y para la isla de *Hong Kong*. Posteriormente, en 2007 se complementaron otros estudios y mediciones sobre el patrón cambiante de la ciudad, obteniendo tres ciclos nuevos para condiciones urbanas, sub-urbanas y en carretera (Hung, Tong, Lee, Ha, & Pao, 2007).

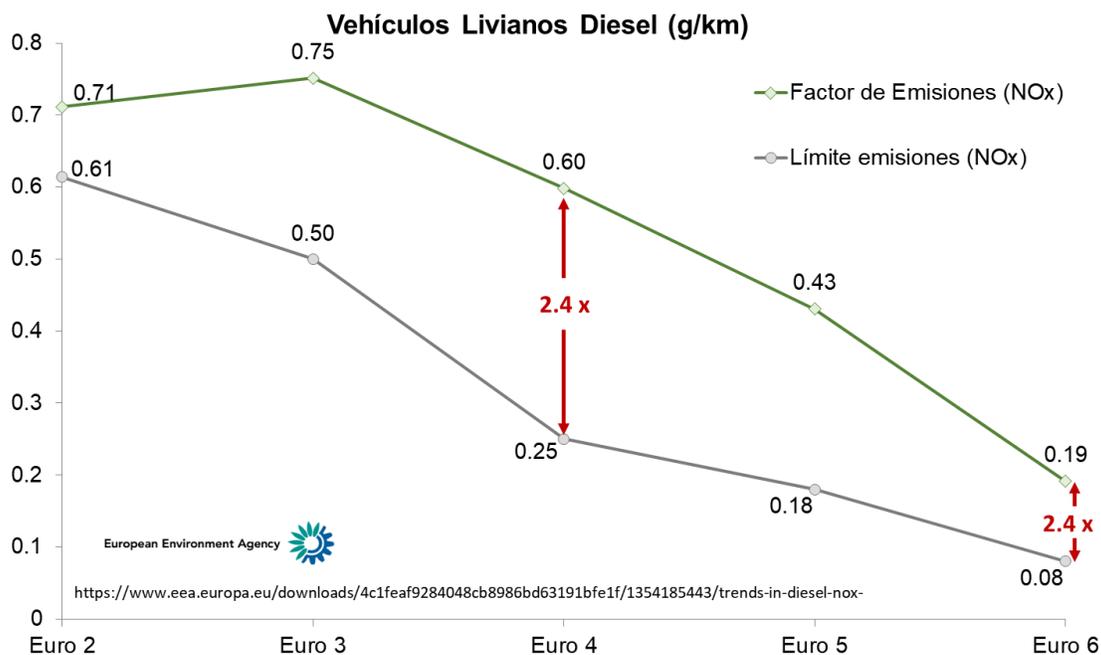


Figura 2.3. Diferencias entre los límites de emisión de NOx en homologación y el FE para condiciones reales de conducción para vehículos diésel livianos. Fuente:

<https://www.eea.europa.eu/downloads/4c1feaf9284048cb8986bd63191bfe1f/1354185443/trends-in-diesel-nox-emission.pdf>

A partir de 1993 la Unión Europea (UE) empezó a desarrollar su propia legislación ambiental para fuentes móviles para lo cual desarrollaron un primer ciclo de conducción urbano para homologación de vehículos livianos nuevos denominado ECE-15. Este ciclo incluía patrones de conducción urbana y extra-urbana (Barlow, Latham, Mccrae, & Boulter, 2009). En el año 2000 la UE reglamentó el nuevo ciclo de conducción NEDC (*New European Driving Cycle*), que a diferencia del anterior, consideraba los consumos de combustible adicionales ocasionados por el arranque en frío (Barlow et al., 2009). Para ello se sincronizó el inicio de la toma de datos con la primera ignición del motor. Este ciclo está desarrollado con base a una serie de cuatro repeticiones del ciclo urbano y una repetición del ciclo

extra-urbano contemplados en el ECE-15. En paralelo al desarrollo del ciclo de homologación de emisiones NEDC, en Europa se desarrollaron otra serie de ciclos más específicos para determinar FE en diferentes regiones. Edimburgo, en 2001, representa uno de los mejores ejemplos, y así varias ciudades capitales europeas importantes se vieron abocadas a desarrollar sus ciclos de conducción propios para ejercer mayor control sobre su contaminación ambiental, como fueron los casos de París y Londres (Barlow et al., 2009; Transport of London, 2016).

Desde 2014 destacadas instituciones encargadas del control de la contaminación atmosférica por parte de la Unión Europea, han trabajado conjuntamente con la organización de Naciones Unidas (ONU) en el desarrollo de un ciclo de conducción para homologación de emisiones de vehículos nuevos de alcance mundial (Tutuianu et al., 2015). El ciclo *World-wide harmonized Light duty Test Cycle* (WLTC), es el fruto de un esfuerzo internacional por unificar los métodos de homologación de emisiones contaminantes de vehículos, y que a diferencia del NEDC que es modal, el WLTC es transitorio y obliga a que el vehículo reproduzca velocidades más elevadas. El WLTC entró en vigencia en Europa a partir del 1 de septiembre de 2017 (Suarez-bertoa et al., 2015). Para su desarrollo se usaron datos de circulación reales de diferentes regiones del mundo, tales como Europa, India, Japón, Corea, y Estados Unidos. En total, se tomaron datos para aproximadamente 765.000 km de recorrido, cubriendo un amplio rango de categorías de vehículos (tamaños, potencias, fabricantes, etc.), así como diferentes tipos de rutas (urbanas, rurales y autopistas) y condiciones de conducción (horas pico, valle, y fines de semana). El WLTC para vehículos livianos tiene un recorrido total de 23.27 km, una velocidad máxima de 131.3 km/h, una velocidad promedio con paradas de 46.5 km/h, y sin paradas de 53.7 km/h. En total el tiempo al ralentí (motor encendido en vacío) representan el 12.6% del tiempo del ciclo. Las duraciones de las fases del ciclo son: Baja (*Low*) 589 s, Media (*Medium*) 433 s, Alta (*High*) 455 s, y extra alta (*Ex-high*) 323 s. Una característica importante del WLTC es que es significativamente más dinámico que algunos ciclos estándar, tales como el *New European Driving Cycle* (NEDC), tiene mayor velocidad máxima y promedio, menor tiempo de paradas, y mayores aceleraciones y deceleraciones. De este modo se cubre un rango mayor de condiciones de operación del motor, y por lo tanto, se representan mejor las condiciones reales de conducción.

Recientemente se han reportado varias iniciativas para la obtención de ciclos de conducción para enriquecer los inventarios de emisión a escala regional en el mundo. En Europa se destaca el estudio realizado en la ciudad de Cejle, Eslovenia (Knez, Muneer, Jereb, & Cullinane, 2014), donde se compara el ciclo de conducción local con respecto a otros ciclos de homologación europeos evidenciando enormes diferencias en cuanto a velocidad promedio y tiempos de recorrido. En Singapur en 2014 se desarrolló un estudio sobre los patrones de conducción el cual estimó la producción de gases contaminantes provenientes de vehículos (Ho, Wong, & Chang, 2014). En Toronto, se desarrolló un ciclo de conducción, basado en resultados de simulaciones de tráfico vehicular (Amirjamshidi & Roorda, 2015). En Asia se han desarrollado estudios sobre las grandes ciudades y sus comportamientos atípicos, como el de la ciudad de *Dalian*, en la cual se desarrolló un ciclo de conducción propio y se comparó con otras ciudades chinas, encontrando similitudes en los patrones de conducción (Zhang, Gao, Xiong, Wang, & Yang, 2014).

En Colombia se han realizado pocos estudios sobre los ciclos de conducción. En 2007 se desarrolló una metodología para determinar ciclos de conducción vehicular para la ciudad de Pereira (Sánchez, Giraldo, & Restrepo, 2007). En Bogotá se han realizado estudios preliminares sobre los patrones de conducción, en donde se han recogido valores promedios de la velocidad en la malla vial y se cuenta con inventarios de emisión propios (Chacón, Guerrero, Guzmán, Pedraza, & Saldarriaga, n.d.).

Como se muestra en la Figura 2.3, se han reportado diferencias significativas entre las emisiones contaminantes de un vehículo en banco de rodillos siguiendo ciclos de conducción de homologación y las que hay en conducción real, siendo más altas estas últimas. Bajo condiciones de conducción reales se superan los límites de emisiones de las normas ambientales por factores que varían entre 2 y 25 veces, dependiendo del contaminante criterio, y del

caso particular de análisis (Thornton, 2016). Este resultado depende en gran medida de las pautas de conducción, determinadas por las características de la malla vial y del tráfico de una ciudad, así como por la forma de conducir de cada persona, entre otros.

En los vehículos pesados de carga y de transporte de pasajeros hay factores adicionales que influyen en las emisiones, como la variabilidad de la carga, del número de pasajeros y el tipo de servicio que se preste. Como consecuencia, a nivel mundial cobran cada vez más importancia los sistemas de medición de emisiones portátiles que se pueden montar a bordo del vehículo (PEMS: *Portable Emission Measurement Systems*).

Para el AMVA, contar con su ciclo de conducción propio le permite recopilar información repetitiva, confiable y precisa del consumo de combustible así como de la cantidad de gases contaminantes emitidos con diversas finalidades como por ejemplo:

1. Mantener actualizado su inventario de emisiones
2. Tener información por segmento de las diferentes fuentes móviles o por actividad específica de los vehículos (particular, servicios especiales, transporte público masivo de pasajeros, transporte de carga en última milla, transporte de carga corriente, etc.)
3. Proveerse de datos de consumo de combustible y emisiones diferenciados por zonas urbanas y corredores viales específicos de la ciudad, para impactar positivamente sobre la movilidad.
4. Evaluar el posible impacto ambiental de diferentes tipos de combustible de interés para la región
5. Comparar el impacto de la tecnología para control de emisiones de los vehículos
6. Determinar la huella de carbono y la reducción de emisiones de vehículos eléctricos e híbridos frente a los de combustión interna
7. Los ciclos de conducción propios le permiten a la administración local exigir la mejor tecnología en sus sistemas de transporte masivo de pasajeros. Disponer del ciclo de conducción del sistema de metroplús, por ejemplo, permitiría que los fabricantes de los buses eléctricos pudieran diseñar el tren de potencia y dimensionar el sistema de baterías para nuestras condiciones locales específicas.
8. Actualizar los límites de emisiones exigidos a los vehículos en uso de manera más representativa a la realidad
9. Proveer elementos para mejorar y actualizar la inspección técnica periódica de vehículos
10. Evaluar el impacto de introducir nuevos contaminantes criterio en la regulación de fuentes móviles.
11. Contar con elementos técnicos representativos de la realidad de la región para elaborar guías de autorregulación de emisiones por parte de las empresas.

En resumen, esta herramienta dota al AMVA con los elementos de juicio técnicos para diseñar o actualizar sus propias normativas ambientales acordes a la situación local actual y tomar medidas que permitan controlar la calidad del aire en la región.

Otra de las grandes áreas de aplicación de los ciclos de conducción corresponde a la planeación urbana. Desde el diseño de rutas urbanas para sistemas de transporte público hasta la evaluación del impacto generado por nuevas opciones tecnológicas de transporte como lo pueden ser los vehículos eléctricos o híbridos, los ciclos de conducción brindan información fundamental para estos estudios. Según Zhu y Zhou (Zhu, Shi, & Zhou, 2011), la estimación de emisiones generadas por los sistemas de transporte público en *Hefei*, China, requirió información específica sobre los patrones de conducción para esta región y en especial para los vehículos de transporte público. Zhu y Zhou desarrollaron un ciclo de conducción propio para los buses de *Hefei* encontrando diferencias significativas al compararlo con los ciclos de conducción europeos.

Para la industria automotriz en general los ciclos de conducción desarrollados en este proyecto son de gran importancia de cara a la comercialización de nuevas tecnologías, así como la calibración específica de sus unidades de control electrónicas.

## REFERENCIAS

- Agudelo, A. F., García-Contreras, R., Agudelo, J. R., & Armas, O. (2016). Potential for exhaust gas energy recovery in a diesel passenger car under European driving cycle. *Applied Energy*, 174. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.04.092>
- Amirjamshidi, G., & Roorda, M. J. (2015). Development of simulated driving cycles for light, medium, and heavy duty trucks: Case of the Toronto Waterfront Area. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 34, 255–266.
- AMVA. (2018). *Inventario de emisiones atmosféricas del Valle de Aburrá, actualización 2017. Convenio de Asociación N°CA 583 de 2017*. Retrieved from [http://www.metropol.gov.co/CalidadAire/isdocConvenio243/Informe\\_Inventario\\_emisiones\\_2015.pdf](http://www.metropol.gov.co/CalidadAire/isdocConvenio243/Informe_Inventario_emisiones_2015.pdf)
- Barlow, T., Latham, S., McCrae, I., & Boulter, P. (2009). *A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions*.
- Chacón, L., Guerrero, O., Guzmán, L., Pedraza, J., & Saldarriaga, G. (n.d.). *Determinación experimental de ciclos de conducción en Bogotá y Medellín. Emisiones de fuentes móviles. Maestría en Ingeniería – Ingeniería Ambiental, Universidad Nacional de Colombia*.
- Davis, N., Lents, J., Osses, M., Nikkila, N., & Barth, M. (2005). Development and Application of an International Vehicle Emissions Model. *Transportation Research Board 81st Annual Meeting*, (January), 1–20. Washington.
- Galgamuwa, U., Perera, L., & Bandara, S. (2015). Developing a General Methodology for Driving Cycle Construction: Comparison of Various Established Driving Cycles in the World to Propose a General Approach. *Journal of Transportation Technologies*, 5(5), 191–203. <https://doi.org/10.4236/jtts.2015.54018>
- Ho, S., Wong, Y., & Chang, V. W. (2014). Developing Singapore Driving Cycle for passenger cars to estimate fuel consumption and vehicular emissions. *Atmospheric Environment*, 97, 353–362.
- Hung, W. T., Tong, H. Y., Lee, C. P., Ha, K., & Pao, L. Y. (2007). Development of a practical driving cycle construction methodology: A case study in Hong Kong. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 12(2), 115–128. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2007.01.002>
- Knez, M., Muneer, T., Jereb, B., & Cullinane, K. (2014). The estimation of a driving cycle for Celje and a comparison to other European cities. *Sustainable Cities and Society*, 11, 56–60.
- Kruse, R. E., & Huls, T. A. (1973). Development of the Federal Urban Driving Schedule Development of the Federal Urban Driving Schedule. *SAE Technical Paper*, (730553).
- Kuhler, M., & Karstens, D. (1978). Improved Driving Cycle for Testing Automotive Exhaust Emissions. *SAE Technical Paper*, (780650).
- López, J. M., Flores, N., Lumbreras, J., & Villimar, R. (2011). Comparison of the emission factors measured in real world driving with those of COPERT 4. *WIT Transactions of the Built Environment*, 116, 655–664. <https://doi.org/10.2495/UT110551>
- Sánchez, Y., Giraldo, A., & Restrepo, A. (2007). Diseño y aplicación de una metodología para determinar ciclos de

- conducción vehicular en la ciudad de Pereira. *Scientia et Technica*, 5(37), 229–234.
- Suarez-bertoa, R., Zardini, A. A., Lilova, V., Meyer, D., Nakatani, S., Hibel, F., ... Hill, L. (2015). Intercomparison of real-time tailpipe ammonia measurements from vehicles tested over the new world-harmonized light-duty vehicle test cycle ( WLTC ). *Environ Sci Pollut Res*, 22, 7450–7460. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4267-3>
- Thornton, M. (2016). *The Increasing Importance of Vehicle Real-World Data*. National Renewable Energy Laboratory.
- Transport of London. (2016). *London Exhaust Emissions Study. A summary of the drive cycle development, test programme and comparison of test data compared with Type Approval data*.
- Tutuianu, M., Bonnel, P., Ciuffo, B., Haniu, T., Ichikawa, N., Marotta, A., ... Steven, H. (2015). Development of a World-wide Worldwide harmonized Light duty driving Test Cycle ( WLTC ) and a possible pathway for its introduction in the European legislation. *Transportation Research Part D*, 40(January), 61–75.
- United states Environmental Protection Agency. (2015). *Exhaust Emission Rates for Light - Duty On - road Vehicles in MOVES2014 Final Report Exhaust Emission Rates for Light - Duty On - road Vehicles*. <https://doi.org/EPA-420-R-15-005>
- Zhang, B., Gao, X., Xiong, X., Wang, X., & Yang, H. (2014). Development of the Driving Cycle for Dalian City. *2014 8th International Conference on Future Generation Communication and Networking*, pp. 60–63.
- Zhu, J., Shi, Q., & Zhou, J. (2011). The city bus driving cycle construction. *Mechanic Automation and Control Engineering (MACE), 2011 Second International Conference On*, pp. 2687–2690.



## CAPÍTULO 3

# METODOLOGÍA PARA DETERMINAR LOS FACTORES DE EMISIÓN

Las emisiones contaminantes de los vehículos se deben cuantificar para poder tener estimaciones realistas de la contaminación del aire en la región. Con esta información las autoridades ambientales podrán ejercer mejor control sobre la calidad del aire, especialmente durante episodios críticos. La forma más común de cuantificar las emisiones de un vehículo, consiste en medir éstas directamente durante la conducción. Las emisiones medidas se expresan como masa de cada contaminante dividida por la distancia recorrida (g/km). Esta medida es un índice conocido como factor de emisión (FE). Los FE son importantes porque además de cuantificar la contaminación, permiten comparar vehículos y tecnologías diferentes.

Se debe buscar que las mediciones de los FE se realicen en vehículos representativos de la región, usando combustibles propios de la ciudad de interés y, sobre todo, con un estilo de conducción que refleje la realidad del sitio para el cual se desea caracterizar la contaminación. Esta última condición tiene diversas implicaciones, ya que la forma de conducir en una región en particular, depende de factores como el tipo y el estado de la malla vial, de los perfiles topográficos, y de los hábitos y cultura de los conductores.

En este capítulo se presenta la metodología empleada para determinar los FE de fuentes móviles en la región metropolitana del Valle de Aburrá. Se hablará del desarrollo de los ciclos de conducción de vehículos livianos y de motocicletas, así como de los patrones de conducción para vehículos pesados. También se cubre la forma como se seleccionaron los vehículos de prueba en cada categoría, y la implementación de las pruebas para la medición de emisiones contaminantes.

Según se muestra en la Figura 3.1, el proceso comienza por caracterizar la movilidad vehicular en la región. Para esto se requiere información sobre vías y aforos vehiculares, de modo que se puedan establecer rutas de prueba representativas. Estas rutas se recorren en diferentes horarios con vehículos instrumentados, para recoger de primera mano la información necesaria para determinar los ciclos de conducción.

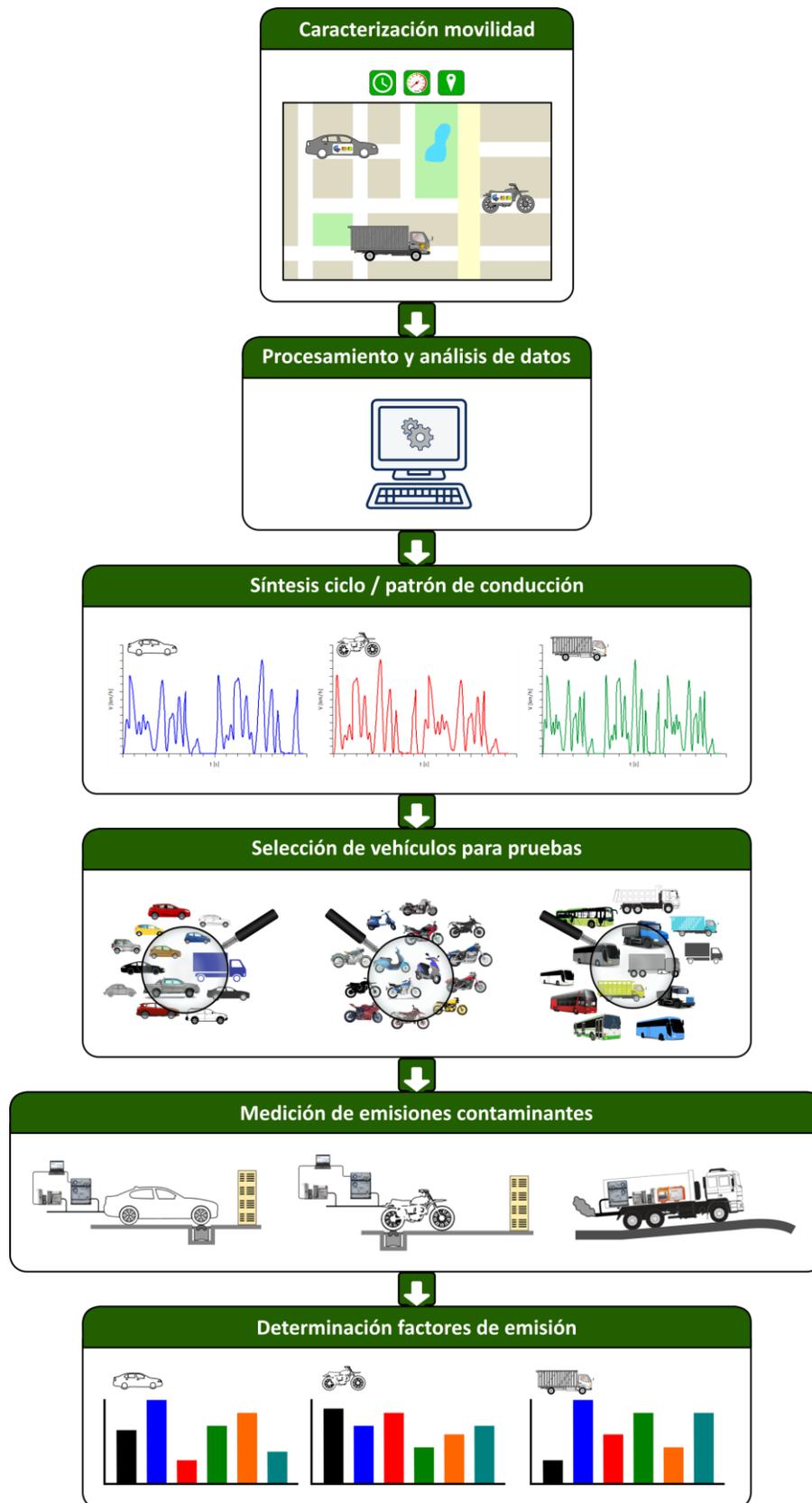


Figura 3.1. Metodología para determinar los factores de emisión

Los datos recogidos en el estudio de movilidad se depuran y se procesan para realizar un análisis estadístico que permita tener información representativa para proceder con la síntesis de los ciclos y patrones de conducción. El proceso de síntesis de un ciclo de conducción pasa por seleccionar un conjunto de viajes medidos, de modo que éste tenga parámetros de tráfico similares a los de la región de interés.

Una vez se tienen los ciclos y patrones de conducción, se debe proceder con las pruebas. Para esto hace falta seleccionar los vehículos adecuados en cada categoría, de modo que sean representativos del parque automotor de la región. Cuando se miden las emisiones contaminantes de estos vehículos, bajo ciclos / patrones de conducción también característicos de la región, se puede garantizar que los FE obtenidos serán representativos de las condiciones locales.

Una vez escogidos los vehículos para las pruebas definitivas, se procede a la instrumentación y medición de emisiones. En este punto es crucial que se reproduzcan de forma confiable las condiciones de conducción dictadas por el respectivo ciclo o patrón de conducción. En el caso de vehículos livianos y de motocicletas, esto se puede lograr con mayor facilidad usando un banco dinamométrico de rodillos. En el caso de vehículos pesados, esto no es posible, así que se debe medir en ruta, pero buscando poder reproducir de forma satisfactoria el respectivo patrón de conducción.

La etapa final del proceso consiste en procesar los datos obtenidos en las mediciones, para determinar los respectivos FE de contaminantes gaseosos y de material particulado (PM), así como el rendimiento de combustible que caracterizan a los vehículos en nuestra región.

### 3.1 FACTORES DE EMISIÓN PARA VEHÍCULOS LIVIANOS Y PARA MOTOCICLETAS

Este tipo de vehículos son los que más abundan en los grandes centros urbanos, y son responsables de una parte importante de la contaminación atmosférica local. La práctica más usada para determinar los FE de vehículos livianos y de motocicletas, es realizar las mediciones mientras se conduce de una forma determinada, conocida comúnmente como ciclo de conducción. Estos ciclos son una historia de velocidad del vehículo (en km/h) en función del tiempo tienen una duración que suele oscilar entre 10 min y 50 min (600 a 3000 segundos). En cada instante se especifica la velocidad del vehículo (y el cambio de marcha de la transmisión correspondiente). De esta forma se puede reproducir ese tipo de conducción cuantas veces sea necesario, permitiendo así comparar vehículos distintos, y verificar la consistencia de las mediciones. En la Figura 3.2 se ilustra gráficamente la relación velocidad-tiempo establecida en un ciclo de conducción.

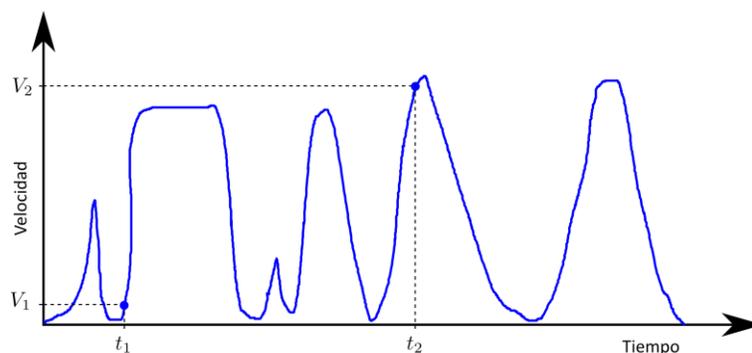


Figura 3.2. Ilustración de un ciclo de conducción

Esta figura permite ver la relación entre tiempo y velocidad: en el instante de tiempo  $t_1$ , el vehículo debe tener la velocidad  $V_1$  (baja velocidad en este caso), y en el instante  $t_2$ , el vehículo debe tener la velocidad  $V_2$  (alta velocidad en este caso). La curva azul representa el ciclo de conducción.

Si se logra desarrollar un ciclo de conducción que represente la conducción característica de una región, se podrá usar éste para medir las emisiones contaminantes, las cuales serán también representativas de los vehículos en

dicha región. Para lograr este objetivo se debe estudiar la movilidad de los diferentes vehículos a través de las poblaciones de interés.

### 3.1.1 Ciclo de conducción para vehículos livianos

El punto de partida para determinar este ciclo fue buscar rutas representativas del tráfico en la región metropolitana. Para esto se usó la información de tráfico vehicular proporcionada por el modelo MODEAM (Modelo de Emisiones Atmosféricas del Valle de Aburrá). Este modelo lo desarrolló Grupo de Investigaciones Ambientales (GIA) de la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB), en convenio con el AMVA (AMVA-UPB, 2017).

Se usó información de tráfico vehicular promedio en 1070 vías de la ciudad de Medellín, y en 100 vías del municipio de Envigado, en franjas de una hora, durante las 24 horas del día. Esta información se verificó con datos de cámaras de tráfico de la ciudad de Medellín. Con esta información se pudo implementar un modelo tráfico vehicular que permite estimar el número de vehículos por hora que circulan por cada vía, y por la región metropolitana en su conjunto (Dirks, Johns, Hay, & Sturman, 2003), hora a hora.

También se usó la información de la encuesta origen-destino, realizada por el AMVA en el año 2012 (AMVA-UNAL, 2012). Se identificaron las zonas con mayor densidad de población, y se marcaron como puntos de origen (11 en total). Los puntos de destino se determinaron como aquellas zonas con predominancia industrial, comercial o educativa (13 en total, según se muestra en la Tabla 3.1). Se construyeron 143 rutas aleatorias usando la información de la malla vial, resultantes de cruzar los 11 orígenes con los 13 destinos seleccionados.

Tabla 3.1. Puntos de origen – destino usados para definir las rutas

Origen	Destino
Mirador de los Bernal	Centro administrativo la Alpujarra
Oviedo	Universidad EAFIT
El Tesoro	Universidad de Antioquia (UdeA)
Mall Interplaza	Universidad Nacional (UN)
Iglesia Asunción	Universidad Pontificia Bolivariana (UPB)
Hospital Pablo Tobón Uribe	Universidad de Medellín (UdeM)
Parque Gaitán	Estación de metro Industriales
Parque La Milagrosa	Fábricas Unidas
San Michel	Centro comercial Mayorca
SENA Pedregal	Fábrica Noel
Belén Los Alpes	Parque Berrío (centro de Medellín)
	Centro comercial San Diego
	Fábrica Zenú

El análisis de la información de tráfico mostró que hay tres franjas horarias en el día, en las cuales se realiza la mayor cantidad de viajes en la región metropolitana: alrededor de las 6 a.m., alrededor de las 12 m., y alrededor de las 6 p.m. Las dos franjas horarias extremas coinciden con los horarios de pico y placa en el área metropolitana. Por lo tanto, se eligieron las siguientes cinco franjas horarias para analizar la información para determinar las rutas, según se muestra en la Tabla 3.2. De este modo se tiene información en mañana y tarde, antes y durante el pico y placa.

Tabla 3.2. Puntos de origen – destino usados para definir las rutas

Intervalo	Hora	Observaciones
1	6:00 a 7:00	Sin pico y placa
2	7:00 a 8:00	Con pico y placa
3	12:00 a 13:00	Sin pico y placa
4	16:00 a 17:00	Sin pico y placa
5	18:00 a 19:00	Con pico y placa

Para seleccionar las rutas más representativas del tráfico de la región, se usó una metodología empleada para determinar el ciclo de conducción de Bangkok (Tamsanya, S. Chungpaibulpatana, S. Limmeechokchai, 2009). Esta aproximación consiste en usar los resultados del modelo de tráfico vehicular (vehículos por hora y velocidad media de las vías), para construir distribuciones del porcentaje de vehículos en un rango de velocidad determinado, para cada franja horaria. En la Figura 3.3 se ilustra la distribución correspondiente a todas las vías analizadas (1170 en total) para la franja horaria de 12 h a 13 h.

Las distribuciones de flujo vehicular para la región, correspondientes a las diferentes franjas horarias establecidas (Tabla 3.2), se usaron como referencia para evaluar las distribuciones de las 143 rutas establecidas. De esta forma se pudieron seleccionar cinco rutas, una para cada franja horaria, de modo que cada una de éstas es representativa del tráfico de la ciudad en el horario respectivo. Estas rutas se escogieron buscando la máxima similitud de su distribución de tráfico con la de toda la región en la franja horaria de interés. En general, el error entre las distribuciones se mantuvo por debajo del 20%.

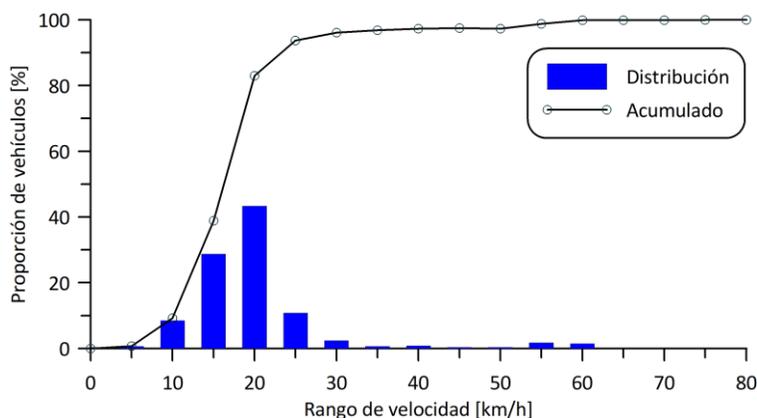


Figura 3.3. Distribución característica de vehículos en el AMVA para la franja 12:00 – 13:00 h

El resultado de la selección inicial de rutas se presenta en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Rutas iniciales

Hora	Ruta
6:00 a 7:00	SENA Pedregal – Fábricas Unidas
7:00 a 8:00	U de M – CC Mayorca
12:00 a 13:00	Urbanización Ciudadela San Michel - Industriales
16:00 a 17:00	CC El Tesoro – U de M
18:00 a 19:00	Urbanización Ciudadela San Michel – Parque Berrío

Las rutas mostradas en esta tabla se usaron para realizar mediciones de tráfico, usando vehículos instrumentados (sensor GPS, sistema de diagnóstico a bordo – OBD, y un sistema para medir la inclinación de la vía), como se muestra en la Figura 3.4. En todos los casos se usó también el sensor GPS de un teléfono móvil, mediante una aplicación desarrollada por la Universidad de Antioquia, llamada CICAMET.

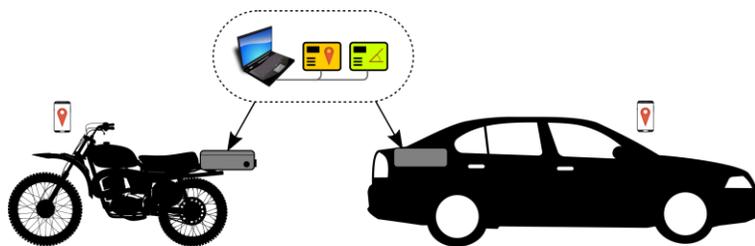


Figura 3.4. Vehículos instrumentados para caracterizar la movilidad

Todas las rutas se recorrieron en ambos sentidos. Debido a que la información inicial de la malla vial tiene información correspondiente principalmente al municipio de Medellín, se definieron rutas adicionales para los nueve municipios restantes del área metropolitana. En este caso no se contaba con información de tráfico, por lo cual se definieron las rutas consultando con las autoridades de movilidad locales sobre vías importantes y horarios claves (ver Tabla 3.4).

Se añadieron tres nuevas rutas en Medellín, con el fin de complementar la base de datos, pues esta ciudad tiene el mayor número de vías y de vehículos en el área metropolitana. En particular, la ruta que incluye la vía Las Palmas, busca aportar información sobre la conducción extra-urbana, caracterizada por menos detenciones y mayor velocidad media.

Tabla 3.4. Rutas de prueba adicionales

Municipio	Ruta
Medellín	Vía las Palmas (Hotel Intercontinental) – Estación Metro Parque Berrío
	SENA Pedregal – Universidad Nacional (Sede Agronomía)
	Universidad de Medellín – Centro Comercial San Diego
Envigado	Transversal Intermedia – EXITO de Envigado
	Parque de Envigado – Mall La Frontera
Itagüí	Fábricas Unidas – San Gabriel – San Francisco
	EXITO de Itagüí – Avenida 80
Bello	Barrio – Autopista (Obra 2000)
	Barrio – Autopista (Carretero)
Caldas	Parque de Caldas – Estación Metro Estrella (Carretera vieja)
	Parque de Caldas – Estación Metro Estrella (Variante)
Sabaneta	EXITO de Sabaneta – CES
La Estrella	Parque de La Estrella – Estación Metro Estrella (Suramérica)
Barbosa	Barrio – Parque – Autopista
Girardota	Barrio – Parque – Autopista
Copacabana	Barrio – Machado – Metro (Madera)

Se usó un vehículo instrumentado para recoger información de movilidad (velocidad vs. tiempo), de posición geográfica, y de pendiente de la vía en las rutas de prueba. Esta información constituyó parte de la base de datos para la determinación del ciclo de conducción para vehículos livianos. La medición en el vehículo instrumentado tiene un sesgo estadístico importante, ya que siempre condujo la misma persona, de modo que sus hábitos de conducción quedan de algún modo reflejados en los datos, a pesar de medir en diferentes rutas y en horarios

distintos. Esto se resolvió realizando mediciones adicionales con el mismo vehículo, empleando la técnica de persecución. Ésta consiste en posicionarse detrás de un vehículo determinado en la vía, y seguirlo a distancia constante durante su recorrido. De esta forma se incluyen los hábitos de conducción de la persona que se sigue. Se escogieron personas de diferentes edades y géneros, con el fin de introducir aleatoriedad en los datos de movilidad. Cuando se usó la técnica de persecución no siguieron las rutas planteadas anteriormente, ya que la prioridad era seguir a un vehículo, y no cumplir una ruta. La base de datos de movilidad de vehículos ligeros se conformó por aproximadamente un 50% de datos recogidos en las rutas establecidas, y otro 50% de datos recogidos durante persecución.

### 3.1.2 Síntesis del ciclo de conducción para vehículos livianos

La campaña de mediciones de movilidad para este tipo de vehículos resultó en una base de datos con más de 187000 segundos de medición (52 horas, aproximadamente). Los datos se agruparon por microviajes, teniendo cerca de 800 en total para los diez municipios del área metropolitana. El concepto de microviaje se presenta en la Figura 3.5, y se define como la historia velocidad-tiempo de un vehículo que parte del reposo, se desplaza, y vuelve a detenerse completamente (velocidad cero). Su duración abarca desde el instante en que inicia el movimiento hasta el instante antes de volver a iniciar el movimiento después de haberse detenido. En general un viaje o recorrido está compuesto por varios microviajes, especialmente en conducción urbana.

Durante un microviaje, el vehículo siempre está en movimiento, y por esta razón toma como unidad mínima de información para caracterizar la movilidad en estudios de transporte (Hung, Tong, Lee, Ha, & Pao, 2007; Xiao, Dui-Jia, & Jun-Min, 2012). Estos estudios recomiendan caracterizar los datos de movilidad por medio de doce parámetros, entre los cuales están la velocidad promedio, aceleración y deceleración promedio, proporción de tiempo con el vehículo detenido, con el vehículo en aceleración o en deceleración, con el vehículo en subida o en descenso, etc.

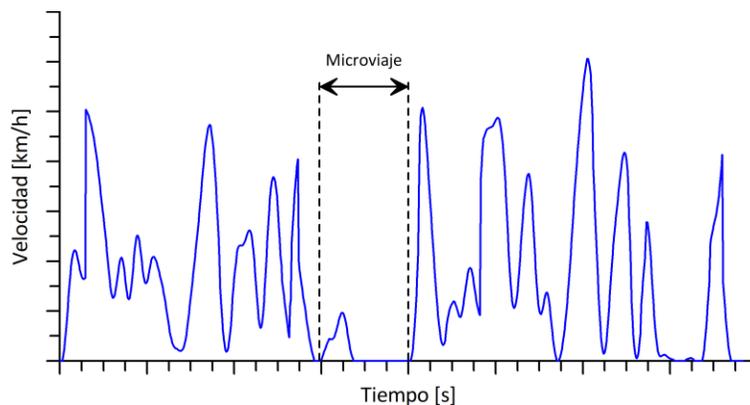


Figura 3.5. Definición de microviaje

Cuando se analizó el comportamiento de estos parámetros de movilidad para los diez municipios de interés, no se identificaron diferencias estadísticas significativas, lo cual sugiere que la movilidad urbana no es muy diferente en estos sitios. El análisis siguiente consistió en usar técnicas estadísticas de agrupamiento (*clustering*) de los microviajes, con el fin de identificar grupos de datos con características similares. Debido a que se tienen muchos parámetros y a que la relación entre algunos de ellos es directa, se realizó un análisis de componentes principales antes de realizar el análisis de agrupamiento. Se encontró que con cuatro componentes principales se lograba representar cerca del 93% de la varianza de los datos, por lo cual se prosiguió el análisis con esta cantidad de componentes. El análisis de agrupamiento se realizó utilizando el programa informático para análisis estadístico R®, y su función NbClust®. Esta herramienta utiliza 24 criterios estadísticos para determinar el número de grupos óptimos para describir los datos.

Se encontró que los datos de conducción urbana se pueden representar con números de grupos óptimos de 3 (propuesto por 8 de los criterios) o 10 (propuesto por 4 de los criterios). Esta cantidad de grupos puede no ser arbitraria, ya que los tres grupos podrían, por ejemplo, corresponder a zonas geográficas (norte, centro y sur del Valle de Aburrá), y los 10 grupos podrían corresponder a los municipios que conforman el área metropolitana. Para verificar estas hipótesis, se realizaron las agrupaciones mencionadas. En el caso de los 10 grupos, se organizaron los datos por municipio, y se encontró que en cada municipio se tenían datos de los 10 grupos, lo cual confirma que el número de 10 grupos no se refiere a los municipios. También se verificó que cada uno de los 10 municipios de interés tenía datos correspondientes a los tres grupos propuestos por el modelo, sin importar si el municipio está ubicado en el norte, centro, o sur del Valle de Aburrá. Por lo tanto, se pudo concluir que el número de 3 grupos no corresponde a la ubicación geográfica de los municipios. Se verificó también la composición de estos 3 grupos según las rutas de medición y las horas del día (mañana, medio día, y tarde), sin encontrar correlación con estas características. La consecuencia directa de estos resultados es que se puede tener un ciclo de conducción único para todos los municipios de la región metropolitana.

Para identificar las variables que describen los 3 grupos propuestos, se analizaron los doce parámetros característicos de los microviajes. Esto permitió identificar que el agrupamiento está determinado por la velocidad media y por el porcentaje de tiempo que el vehículo está detenido, es decir, que el criterio final de agrupamiento son las condiciones de tráfico. Esto se comprueba cuando se suman los datos de conducción extra-urbana, obtenidos con mediciones adicionales en la autopista Medellín – Bogotá, y en la vía al Túnel de Occidente. La información depurada del agrupamiento se presenta en la Figura 3.6. En esta figura se aprecia como existen grupos diferenciados, según el patrón de tráfico. El grupo de tráfico congestionado contiene microviajes con baja velocidad media, y alta proporción de tiempo en ralentí (vehículo detenido). El grupo de tráfico mixto también tiene datos con baja velocidad media, pero con menor tiempo del vehículo detenido. El grupo de tráfico fluido tiene velocidades medias más altas que los anteriores, y poco tiempo de vehículo detenido, mientras que el último grupo, el de tráfico superfluido, tiene velocidades media altas, y muy bajo tiempo con el vehículo detenido.

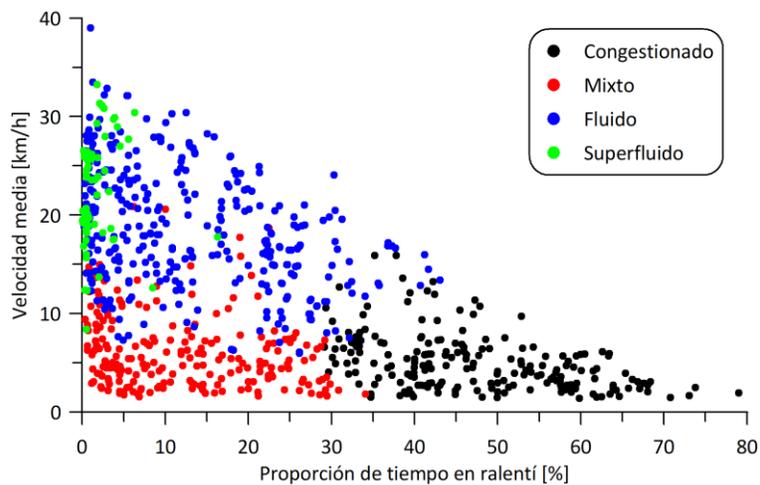


Figura 3.6. Agrupamiento de microviajes para vehículos livianos

El proceso de obtención del ciclo de conducción se conoce como síntesis. En este caso se tomó toda la información recolectada durante la etapa de caracterización de tráfico, discretizada por microviajes. A esta población de datos se le determinaron doce parámetros de movilidad característicos, tales como velocidad media, aceleración media, tiempo en ralentí, etc. Estos valores medios se usaron como referencia para comparar con los respectivos parámetros del ciclo sintetizado. Si éstos se parecen a los valores medios de todos los datos, entonces se puede decir que dicho ciclo es representativo de las condiciones de tráfico y topográficas de la región.

La síntesis del ciclo de conducción para vehículos livianos consistió en tomar aleatoriamente un microviaje de cada uno de los grupos mostrados en la Figura 3.6, más uno correspondiente a conducción extraurbana. Se buscó que

la duración del ciclo fuera como mínimo de 1500 segundos, y que la diferencia de sus parámetros con aquellos de la totalidad de los datos fuera menor que el 10%. Finalmente, se seleccionó el ciclo con el menor error estadístico respecto a los doce parámetros de referencia. En el proceso se buscó que los microviajes escogidos comprendieran variedad de pendientes de vía. El resultado de la síntesis es el ciclo de conducción para vehículos livianos, representativo de la región metropolitana del Valle de Aburrá, el cual se presenta en el capítulo 4.

Adicionalmente a la información de velocidad, cada microviaje utilizado en el ciclo tiene su respectivo perfil de pendiente de la vía, el cual forma parte del ciclo sintetizado. El valor pendiente se debe adaptar para poder reproducir el ciclo de conducción en un banco de rodillos, como se verá más adelante.

### 3.1.3 Ciclo de conducción para motocicletas

El procedimiento para determinar el ciclo de conducción para motocicletas es similar al empleado para vehículos livianos. En este caso sólo se consideraron rutas urbanas. En el caso de las motocicletas no fue posible realizar mediciones con la técnica de persecución, debido a problemas de seguridad. Por lo tanto, se decidió medir en más rutas, con el fin de tener información suficiente para caracterizar la movilidad de este tipo de vehículos en la región. Se seleccionaron las 14 rutas que presentaron características de movilidad más similares al conjunto de la malla vial durante el análisis inicial (ver Tabla 3.5).

Debido a que no se pudo usar persecución con las motocicletas, se dividió la toma de datos entre tres conductores diferentes para introducir diferentes hábitos de conducción: un hombre joven, una mujer joven, y un hombre maduro. De esta forma se recorrieron todas las rutas, reflejando hábitos sosegados y más agresivos.

Tabla 3.5. Rutas de prueba adicionales

Ruta	Hora
SENA Pedregal – Fábricas Unidas	6-7
Vía las Palmas (Hotel Intercontinental) – Estación Metro Parque Berrío	7-8
Universidad de Medellín – Mayorca	8-9
Hospital Pablo Tobón – San Diego	9-10
Vía las Palmas (Hotel Intercontinental) – Universidad Nacional	10-11
Vía las Palmas (Hotel Intercontinental) – Fábricas Unidas	11-12
SENA Pedregal – Universidad Nacional (Sede Agronomía)	12-13
Urbanización Ciudadela San Michel – Estación Industriales	13-14
Estación Industriales – El Tesoro	14-15
El Tesoro – Mayorca	15-16
El Tesoro – Mayorca	16-17
Universidad de Medellín – San Diego	17-18
Universidad de Medellín – Centro Comercial San Diego	18-19
Estación Metro Parque Berrío - Urbanización Ciudadela San Michel	19-20

### 3.1.4 Síntesis del ciclo de conducción para motocicletas

En total se realizaron aproximadamente 50 horas de medición con motocicletas. Estos datos se discretizaron en 229 microviajes, a los cuales se les determinaron 9 parámetros característicos de tráfico, similares a los empleados en vehículos livianos. Estos datos se analizaron estadísticamente mediante técnicas de agrupación (*clustering*), de igual modo que se hizo antes para los vehículos livianos. En este caso se encontró también que se puede usar un solo ciclo de conducción para representar la movilidad de motocicleta en la región metropolitana. El análisis de agrupamiento arrojó que el número óptimo de grupos para describir la movilidad de motocicletas es.

El análisis de los parámetros de tráfico mostró que en este caso las variables que permiten discernir el agrupamiento son la duración de los microviajes y su valor promedio de aceleración. Esto significa que, para las motocicletas, la movilidad está determinada más por los hábitos de conducción que los patrones de tráfico. El resultado del agrupamiento de los datos de tráfico para motocicletas se presenta en la Figura 3.7.

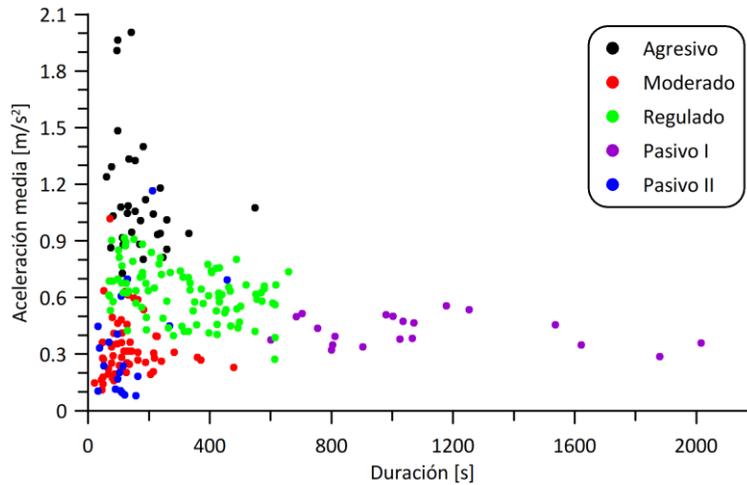


Figura 3.7. Agrupamiento de microviajes para motocicletas

En este caso se tienen un grupo denominado “Agresivo”, el cual está caracterizado por viajes de corta duración con aceleraciones medias de alto valor. Esta forma de conducir refleja aceleraciones y frenadas fuertes, con paradas constantes, y es típico de conductores impacientes que se mueven rápido, aun cuando ven que deben detenerse en un semáforo o una intersección. El grupo denominado “Moderado” también presenta viajes de corta duración, pero esta vez con menores valores de aceleración media. Se tiene otro grupo, llamado “Regulado”, en el cual aumenta la duración de los viajes y éstos tienen aceleración promedio en valores medio-bajos. Finalmente, se tienen dos grupos de conducción pasiva, en los cuales la aceleración media es baja, lo cual significa conducción a velocidad aproximadamente constante. En el primero, llamado “Pasivo I”, los viajes son de mayor duración.

La información de movilidad para motocicletas se procesó de la misma forma que para vehículos ligeros, logrando sintetizar un ciclo de conducción representativo para motocicletas en el área metropolitana del Valle de Aburrá (ver capítulo 4).

### 3.1.5 Selección de los vehículos de prueba

Como se mencionó al comienzo de este capítulo, la selección de los vehículos en los cuales se va a medir es fundamental, ya que las emisiones de éstos representarán aquellas del parque automotor de la región. Esto es aún más relevante si se considera que el número de vehículos que se puede medir es reducido, debido a cuestiones de tiempo y de costo de las pruebas. Por este motivo se realizó un análisis exhaustivo de las bases de datos de vehículos matriculados en las diferentes secretarías de movilidad de los 10 municipios miembros del Área Metropolitana del Valle de Aburrá al momento de realizar este proyecto. Con esta información, se logró identificar que, para vehículos livianos, la mayor cantidad de vehículos activos son de cilindradas de 1000, 1400, y 1600 cc (centímetros cúbicos), para años de modelo entre 2006 y 2010. También hay buena cantidad de vehículos de 1100 y 1600 cc en el rango de años de 2011 a 2015. Se acotó la base de datos con estos criterios, y se depuró en acuerdo con expertos en el tema. Finalmente, se escogieron los vehículos presentados en la Tabla 3.6 para realizar las pruebas definitivas de emisiones.

Tabla 3.6. Vehículos livianos para las pruebas

Vehículos ciclo Otto		
Cilindrada (cc)	Año de modelo (kilometraje)	Datos técnicos
2700	2008 (16304)	Inyección electrónica multipunto, sistema de válvulas variable VVTi, catalizador de 3 vías
1000	2001 (67944)	Inyección electrónica monopunto, sin catalizador
1600	2016 (36483)	Inyección electrónica multipunto secuencial, catalizador de 3 vías
2000	2017 (14959)	Inyección directa de gasolina, catalizador de 3 vías
Vehículos diesel		
3700	2017 (16110)	Turbocompresor, <i>intercooler</i> , common rail, válvula de recirculación de gases (EGR) refrigerado, catalizador de material particulado (POC), Euro 4
2500	2016 (43365)	Turbocompresor, <i>intercooler</i> , common rail, válvula de recirculación de gases (EGR), catalizador de oxidación (DOC), Turbina de geometría variable, Euro 4
3000	2008 (26839)	Turbocompresor, <i>intercooler</i> , EGR, common rail, Euro 2
2500	2004 (200972)	Turbocompresor, sin <i>intercooler</i> , pre-Euro

En el caso de las motocicletas, se encontró que las cilindradas que más abundan en los registros de vehículos son 1245 cc, 150 cc, y 200 cc, en los años entre 2011 y 2015. Se escogieron 8 motocicletas con estas características, según se muestra en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7. Motocicletas para las pruebas

Cilindrada (cc)	Modelo	kilometraje (km)	Datos técnicos
125	2015	17836	Carburador
200	2015	25492	Carburador
100	2017	14705	Carburador
110	2017	1828	Carburador
150	2013	11813	Carburador
150	2015	4186	Iny. Electrónica
125	2013	7737	Carburador
125	2017	2330	Iny. Electrónica

### 3.1.6 Determinación de los factores de emisión para vehículos livianos y para motocicletas

Los FE de los vehículos livianos y de motocicletas se determinaron usando un banco dinamométrico de rodillos para reproducir los ciclos de conducción respectivos. Estos bancos requieren una adaptación del perfil velocidad-tiempo que define el ciclo, ya que se debe programar en el sistema de control la velocidad de giro de los rodillos. Por otro lado, el banco de rodillos que se usó permite simular la pendiente de la vía con ciertas restricciones, en cuanto a magnitud de pendiente y velocidad de cambio de ésta. La pendiente original que resultó de los dos ciclos de conducción se transformó para adaptarla a las capacidades del banco dinamométrico. Las pendientes transformadas para vehículos livianos y para motocicletas se presentan en el capítulo 4.

La traducción de los ciclos de conducción al banco de rodillos implicó un análisis de dinámica longitudinal de los vehículos a ensayar se realizó por medio de un análisis de dinámica longitudinal, con lo cual permitió determinar

la fuerza y velocidad instantánea en las ruedas. Estas cantidades deben coincidir con las aquellas de los rodillos del banco dinamométrico en todo instante.

Las emisiones gaseosas ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{HC}$ , y  $\text{NO}_x$ ) se midieron con un equipo portátil para pruebas a bordo de vehículos (OBS ONE), de la marca japonesa HORIBA. Este equipo mide además el flujo instantáneo, la temperatura y la presión de los gases de escape a la salida del vehículo, así como datos de posición GPS y condiciones atmosféricas. Todas las señales de este equipo se miden a una velocidad de diez veces por segundo.

Se usó un precipitador electrostático de baja presión (ELPI) con 14 etapas, de la marca DEKATI, para medir las emisiones de material particulado, desde un diámetro de partícula de 6 nm (nanómetros), has 10  $\mu\text{m}$  (micrómetros), tanto en concentración en masa ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ), como en número ( $\#/ \text{cm}^3$ ). La frecuencia de medida de partículas fue de 1 segundo.

Las pruebas de emisiones consistieron en instalar los equipos de medida y adaptarlos a cada vehículo montado en el banco dinamométrico de rodillos (ver Figura 3.8). Una vez se calibran los equipos de medida, se da comienzo al respectivo ciclo de conducción, durante el cual se registran todas las variables en cada instante, usando sistemas de adquisición de datos dedicados a cada equipo. Las pruebas de cada vehículo se repitieron como mínimo tres veces, para garantizar repetibilidad de los resultados.

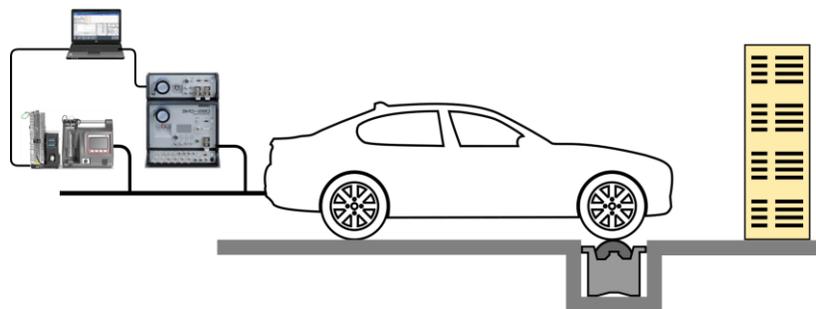


Figura 3.8. Montaje experimental para determinar los FE en vehículos livianos.

Finalmente, los FE de cada contaminante se determinan como la masa total de cada contaminante medida durante el ciclo de conducción, dividida por el recorrido total del ciclo (14 km aprox.)

### 3.2 FACTORES DE EMISIÓN PARA VEHÍCULOS PESADOS

Los vehículos pesados de transporte de carga y de pasajeros llevan motores diesel, por lo que sus emisiones de material particulado son un aporte significativo en nuestra región (AMVA-UPB, 2018). La determinación de los FE de emisión de esta categoría de vehículos comienza por determinar la forma como debe conducir durante las pruebas. Luego se deben seleccionar cuidadosamente los vehículos de prueba, para finalmente instrumentarlos y realizar las pruebas definitivas en ruta, bajo condiciones dinámicas de conducción.

#### 3.2.1 Patrones de conducción para vehículos pesados

En la categoría de vehículos pesados de transporte de carga y de pasajeros se incluyeron autobuses, volquetas, y camiones categoría C2, grandes (10 ton de capacidad) y pequeños (hasta 4 ton de capacidad). La información de movilidad de los autobuses se recolectó realizando viajes en varias rutas de servicio público en los diferentes municipios de la región metropolitana. Para esto se empleó la aplicación CICAMET para teléfonos móviles. En total se midió en 67 rutas de buses, recolectando aproximadamente 200000 segundos de datos. Para determinar la información de movilidad de las volquetas se contó con el apoyo de la Secretaría de Infraestructura del Municipio de Medellín, quien permitió instrumentar con sistemas GPS algunos vehículos de este tipo, y realizar mediciones durante algunas semanas. En total se midieron 58 rutas de volquetas por toda el área metropolitana, para un tiempo acumulado de medida de aproximadamente 700000 segundos. Finalmente, la información sobre

movilidad de camiones en la región metropolitana se obtuvo de una empresa de transporte de carga (TCC S.A), quienes tienen todos sus vehículos instrumentados con sistemas GPS. La base de datos para camiones estuvo constituida por 39 rutas, para un total de cerca de 900000 segundos de medida.

La medición de emisiones en vehículos pesado suele hacerse desmontando sus motores y midiendo en bancos de ensayo. Esto se debe a la dificultad de contar con un banco dinamométrico de rodillos del tamaño y la potencia requerido por este tipo de vehículos. Sin embargo, la forma más conveniente de medir la contaminación es bajo condiciones dinámicas de conducción del vehículo. Esta fue la forma de medida en este proyecto. Para medir las emisiones a bordo durante conducción real, hace falta tener un ciclo de conducción o patrón a seguir. Sin embargo, como se dijo antes, los vehículos pesados no se montaron en un banco de rodillos, y por lo tanto las pruebas se realizaron en vías públicas. Esto limita la distancia que se puede recorrer de forma repetible, así como la duración de las pruebas. Por esta razón se requieren recorridos cortos que se puedan reproducir con repetibilidad en un tiempo moderado, para evitar interrupciones por el tráfico y los incidentes habituales en las vías. La solución adoptada consistió en determinar un ciclo de conducción corto, denominado ciclo de conducción, para cada una de las tres categorías de vehículos pesados.

La información de movilidad de cada categoría se organizó por microviajes, y se aplicó análisis de agrupamiento. Luego, a cada uno de los grupos representativos se le determinó su centroide, para escoger microviajes representativos (los más cercanos al centroide). Se escogió un microviaje por cada grupo, y de este modo se pudo determinar un ciclo de conducción que se adaptara a la vía de prueba. Los ciclos sintetizados se presentan en el capítulo 4. En todos los casos se da una reproducción simétrica del patrón, ya que en la vía de pruebas se realizó una medición en cada dirección de viaje

### 3.2.2 Selección de vehículos pesados para las pruebas

El proceso de selección de los vehículos de prueba en cada categoría fue similar a cómo se hizo en el caso de los vehículos livianos y de las motocicletas. En la Figura 3.9 se muestra un ejemplo del “mapa de calor” que resultó de analizar las bases de datos de vehículos pesados en la región. En este caso se trata de buses con motor diesel.

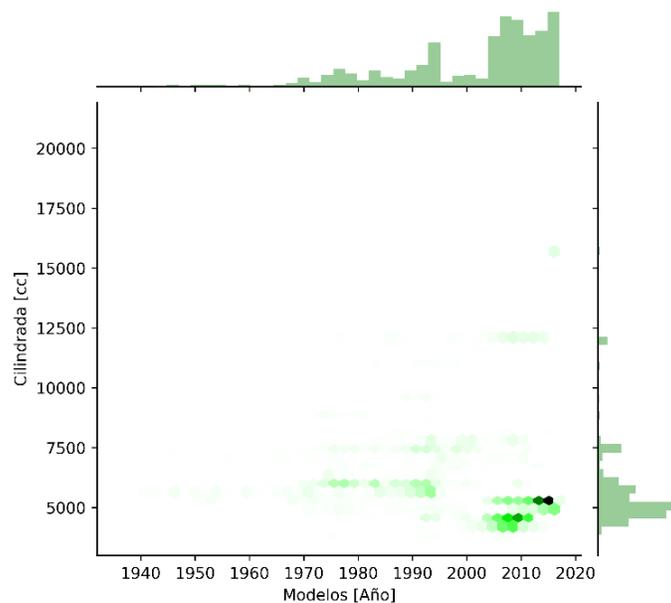


Figura 3.9. Mapa de calor para acotar la búsqueda de buses representativos

Después de analizar la información para las diferentes categorías de vehículos, se escogieron los que se presentan en la Tabla 3.8. En total se midieron 10 vehículos pesados: 4 buses, 4 camiones y 2 volquetas. En cada caso se buscó tener un vehículo antiguo y uno nuevo, con el fin de cubrir mejor el parque automotor y de evidenciar el efecto de los avances tecnológicos sobre las emisiones contaminantes de los vehículos.

Tabla 3.8. Vehículos pesados para las pruebas

Categoría	Modelo	Cilindrada [cc]	Capacidad	Peso	
				Con carga	Sin carga
Buses y busetas	2009	7560	37 pasajeros	-	-
	2016	5193	19 pasajeros	-	-
	2003	4570	28 pasajeros	-	-
	2016	5193	42 pasajeros	-	-
Camiones	1993	6000	10 ton	12210	8320
	2017	6692	10 ton	12860	8730
	2006	2771	2.65 ton	5430	4850
	2016	2999	2.446 ton	5110	-
Volquetas	1995	6000	10 ton	-	8710
	2018	7790	10 ton	-	8710

### 3.3 Determinación de los factores de emisión para vehículos pesados

Como se mencionó anteriormente, en el caso de los vehículos pesado no es posible realizar las pruebas en un banco de rodillos. Estos vehículos se deben medir en ruta. Por este motivo, todos los equipos de medida se deben instalar a bordo de cada vehículo, y se debe añadir un sistema de generación de electricidad para alimentarlos. En la Figura 3.10 se ilustra la instrumentación típica de los vehículos pesados.



Figura 3.10. Instrumentación de un vehículo pesado para las pruebas

Una vez se tienen los vehículos, se deben reproducir los patrones de conducción para categoría, con la mayor repetitividad posible. Para esto se debe seleccionar una vía de la región que permita tener condiciones de tráfico favorables, o controlables, así como un perfil de pendiente que represente la región. Después de analizar diferentes alternativas, se seleccionó un tramo de vía de la Autopista Medellín – Bogotá, a la altura del km 2.5.

Este tramo de vía se muestra en la Figura 3.11. El tramo de vía tiene una longitud de 4.5 km, y tiene un tramo con pendiente plana. Esta ruta se recorrió tanto en subida, como en bajada, con el fin de tener información representativa de la topografía de la región.

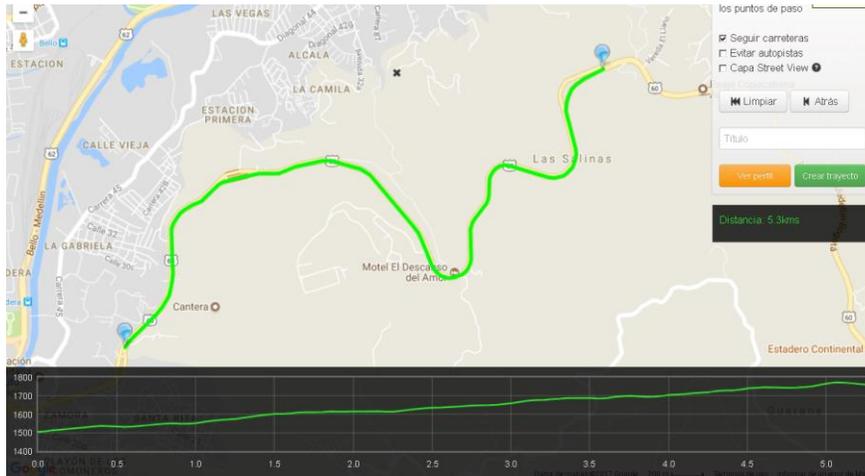


Figura 3.11. Ruta seleccionada para las pruebas de vehículos pesados

Durante la realización de las pruebas se contó con acompañamiento de la Policía de Carreteras, así como autorización del operador de la concesión vial, para ocupar un carril durante las pruebas.

Con el fin de reproducir fielmente los patrones, se realizaron los recorridos usando vehículos escoltas, tanto adelante como atrás del vehículo de pruebas. Los tres vehículos se comunicaban entre sí para anticipar los incidentes de la vía, y cerrar el carril cuando fuera necesario, de modo que el vehículo de pruebas no tuviera que interrumpir su desplazamiento de forma inesperada. Con esta forma de medir se tuvo una tasa de éxito alta, ya que el 98% de 106 pruebas se realizó de forma exitosa.

Al igual que para las pruebas de vehículos livianos y motocicletas, se registró en cada instante la información de cada contaminante, así como las demás variables necesarias para el estudio. Finalmente, la determinación de los factores de emisión se hizo de la misma forma que antes: masa acumulada de cada contaminante durante el recorrido, dividida por la distancia cubierta durante la prueba.

### 3.4 PREDICCIÓN DE EMISIONES CONTAMINANTES EN VEHÍCULOS PESADOS

La medición de factores de emisión en vehículos de transporte de carga y de pasajeros se debe realizar bajo condiciones de conducción representativas para cada categoría vehicular. Lo ideal es medir en condiciones reales de operación de los vehículos. Sin embargo, existen dos limitaciones importantes para esto. En primer lugar, la instrumentación de los vehículos con los equipos de medida de emisiones implica disponer de un espacio considerable en la zona de carga, así como la adición de aproximadamente una tonelada de peso. Estos equipos necesitan adecuaciones especiales que pueden interferir con el funcionamiento habitual de los vehículos, además de generar ruido, calor y gases de escape, debido al uso de plantas portátiles de generación eléctrica. Esto tendría gran impacto en la capacidad de carga de los vehículos, y sobre todo en los autobuses complicaría la realización de pruebas con los pasajeros a bordo. La segunda limitación es menos obvia, pero es significativa para el objetivo de reproducir las condiciones de operación reales: cuando el vehículo está instrumentado y con personal técnico a bordo realizando mediciones, es muy probable que los conductores modifiquen su forma habitual de conducir (generalmente haciéndola menos agresiva).

Los factores de emisión medidos son representativos de las diferentes categorías vehiculares en el área metropolitana del Valle de Aburrá. Sin embargo, esta información se puede emplear para estimar las emisiones de los vehículos de prueba, los cuales son representativos de los que circulan por el área metropolitana, en rutas o corredores viales específicos del Valle de Aburrá, tales como las zonas urbanas de aire protegido, ZUAP.

### 3.4.1 Modelo de análisis modal de emisiones vehiculares

La metodología más usada para estimar las emisiones en unas condiciones de conducción, a partir de mediciones realizadas en condiciones diferentes, se llama análisis modal de emisiones (AME), y fue implementada hace más de una década por la agencia de protección ambiental de Estados Unidos de América (EPA – *Environmental Protection Agency*) (EPA, 2002). En este proyecto se parte de la metodología planteada por la EPA, considerando la modificación realizada por el *International Vehicle Emissions Model* – IVE (IVE, 2008). Se revisaron estos desarrollos, y se encontró que, para obtener resultados confiables, se deben introducir modificaciones, debido principalmente a la existencia de pendientes considerables en el área metropolitana del Valle de Aburrá. Varios estudios han demostrado el efecto significativo que tiene en las emisiones, el circular por vías con pendientes moderadas a fuertes (Gallus, Kirchner, Vogt, & Benter, 2017; Sentoff, Aultman-hall, & Holmén, 2015; Wyatt, Li, & Tate, 2014). La Figura 3.12 presenta de forma resumida la metodología para la creación del modelo de predicción de emisiones para vehículos pesados.

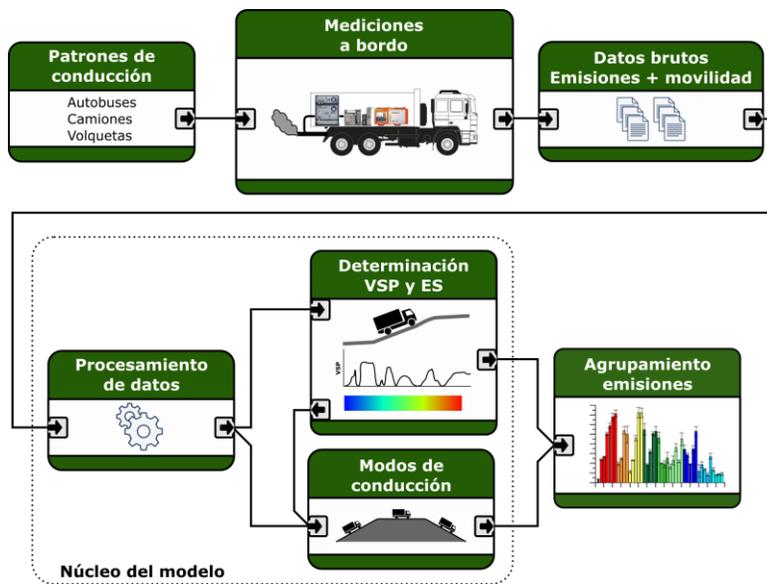


Figura 3.12. Metodología empleada para el análisis modal de emisiones

Una vez se tienen los patrones de conducción, se realizan las pruebas con los vehículos instrumentados y se almacenan los datos instantáneos de emisiones y de movilidad. Estos se procesan, para identificar errores y para preparar las señales, de modo que sean compatibles, y sobre todo que estén sincronizadas. Los datos procesados se usan para calcular variables claves en este tipo de análisis, como la potencia específica vehicular, VSP por sus siglas en inglés (*Vehicle Specific Power*) y el estrés del motor, ES por sus siglas en inglés (*Engine Stress*).

La definición de la VSP (Jiménez, 1999) se ilustra en la Figura 3.13. Esta variable es conveniente, ya que representa la potencia instantánea por unidad de masa ( $m$ ) que emplea el vehículo en su desplazamiento, la cual es función de los cambios de energía cinética ( $E_K$ ) y potencial ( $E_P$ ), así como de los cambios energéticos necesarios para vencer la resistencia a la rodadura ( $F_{rod} \times V$ ) y la resistencia aerodinámica ( $F_{aer} \times V$ ). En la Figura 3.20 se muestra

que la VSP cambia con el tiempo, a medida que lo hacen la pendiente de la vía (positiva si el vehículo viaja de subida, negativa si lo hace de bajada, y cero si el terreno es llano), la aceleración ( $a$ ) y la velocidad del vehículo ( $V$ ).

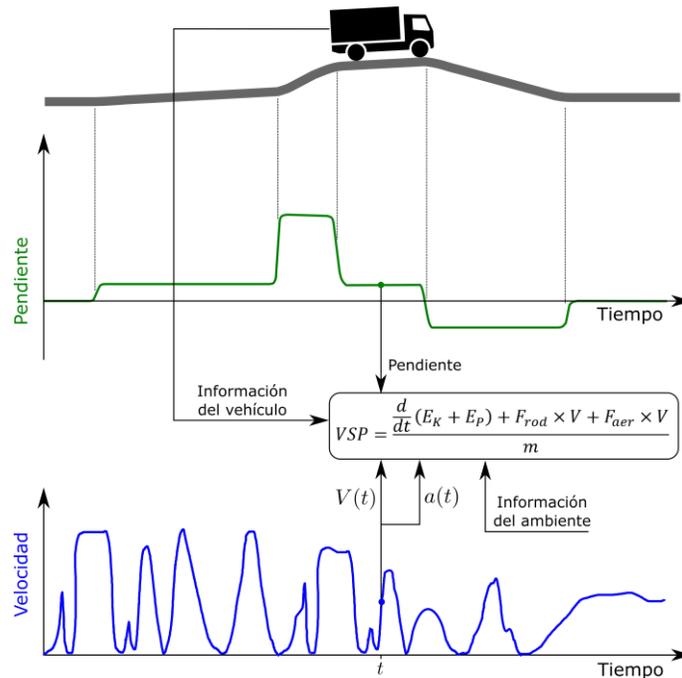


Figura 3.13. Definición de potencia específica vehicular

El estrés del motor es una forma de cuantificar el grado de exigencia exigido al motor, para suplir la demanda instantánea de potencia del vehículo. Este parámetro lo introdujo el IVE (*International Vehicle Emissions Model*) para usarlo como segundo descriptor, además de la VSP, con lo cual se mejora el poder de estimación del AME. En su definición se tiene en cuenta la VSP en el instante de interés, así como su valor promedio en una ventana temporal de 15 o 20 segundos (IVE, 2008; Liu & Barth, 2012). De este modo considera la historia inmediatamente anterior, la cual tiene influencia significativa en las emisiones instantáneas de contaminantes. Por este motivo es que el ES logra mejorar la representación de los modos de operación.

El modelo desarrollado aquí consistió en identificar modos de operación, y asignar un valor de emisión característico a cada uno de éstos. Inicialmente se definen 10 modos de operación: ralentí o marcha mínima, y 9 combinaciones de pendiente y aceleración (ver Figura 3.14).

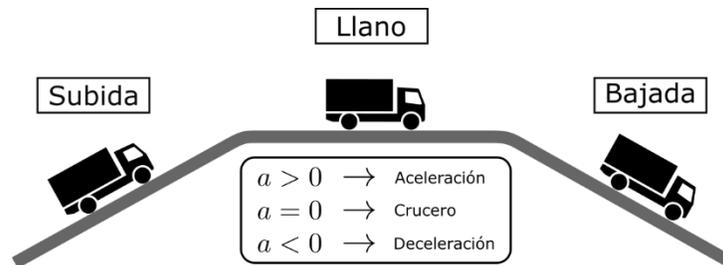


Figura 3.14. Definición de modos de conducción

Según muestra la figura anterior los nueve modos de conducción resultan de combinar los 3 tipos de pendiente, con las tres condiciones de aceleración. Cada uno de estos modos de conducción contiene parte de la información de emisiones de la prueba. Los datos dentro de cada grupo se dividen una vez más en un número de grupos

determinados por los valores de VSP y ES. Finalmente, se obtiene un número de sub-grupos de emisiones, para los cuales se determina el valor medio de la emisión de cada contaminante, en unidades de gramos por segundo (g/s). Este resultado está representado por las barras en el recuadro “Agrupamiento emisiones”, en la Figura 3.12.

A continuación, se describe la forma de usar el modelo para predecir las emisiones de un vehículo en condiciones de operación diferentes a las de la prueba.

1. Se recorre la ruta de interés para la predicción, midiendo la posición global con un sistema GPS durante el viaje.
2. La información de movilidad del paso 1 se alimenta al núcleo del modelo (ver Figura 3.12), de modo que se puedan obtener los modos de conducción y los grupos finales según los rangos de VSP y ES establecidos previamente para el vehículo en estudio.
3. Se cuantifica cuantos datos quedan en cada grupo al final del proceso, lo cual permite saber cuánto tiempo de medida se tiene en cada grupo.
4. Se multiplica el tiempo de medida en cada grupo (en segundos), por los valores de emisión media del modelo para ese mismo grupo (en gramos por segundo), con lo cual se obtiene una estimación de la masa de cada contaminante para cada grupo.
5. Se suman las masas de todos los grupos, para obtener la masa total acumulada de cada contaminante en la prueba (en gramos).
6. Se calculan los factores de emisión como la masa total acumulada de cada contaminante (en gramos), dividida por la distancia recorrida durante la prueba de predicción (en km).

Este procedimiento se ilustra en la Figura 3.15.

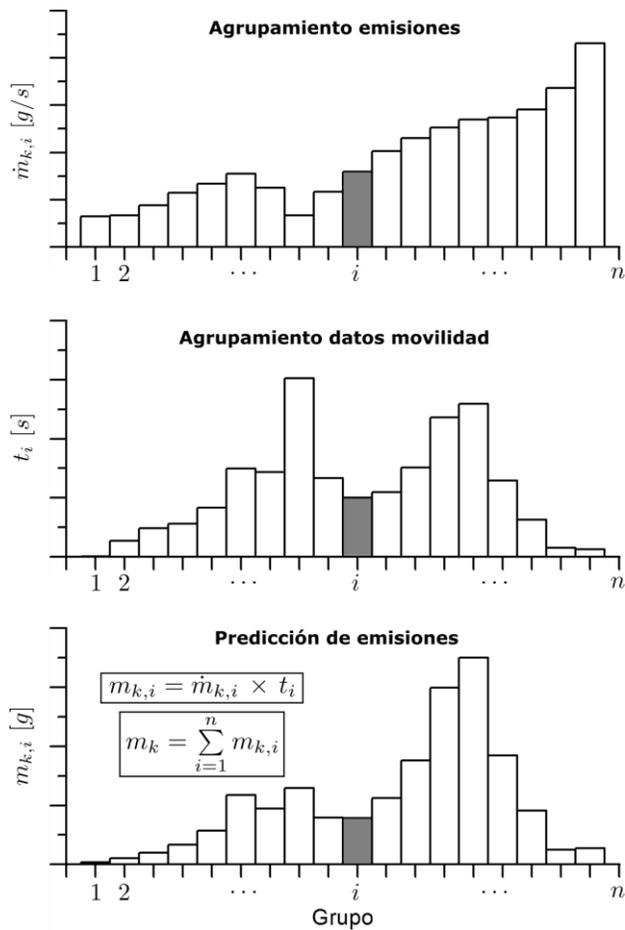


Figura 3.15. Procedimiento para la predicción de emisiones contaminantes

### 3.4.2 Validación del modelo

El modelo se debe validar, para garantizar la confiabilidad de sus predicciones. Durante las pruebas definitivas se midieron las emisiones instantáneas y la movilidad para los diferentes vehículos, siguiendo los respectivos patrones de conducción, con una carga vehicular determinada. Esta información fue la que se empleó para desarrollar el modelo. Como resultado se tiene, para cada vehículo, el conjunto de grupos con su respectiva emisión media en gramos por segundo. Los datos para la validación se midieron alterando la conducción o la cantidad de carga del vehículo. Estas dos variables influyen significativamente sobre las emisiones contaminantes. La conducción de varió, realizando pruebas en conducción libre, sin seguir los patrones establecidos, sino bajo las condiciones de la vía en el momento de las pruebas. Durante estas pruebas se midieron las emisiones instantáneas, así como la movilidad. Al medir emisiones se tienen los FE reales. Al medir movilidad, se puede usar el modelo para predecir los FE, y luego compararlos con los medidos.

En la Figura 3.16 se muestra el perfil de velocidad en el tiempo para uno de los camiones en una prueba de validación en conducción libre. Si se compara este perfil con el patrón de conducción para camiones de la Figura 4.6 (capítulo 4), se verá que la diferencia entre ellos es significativa.

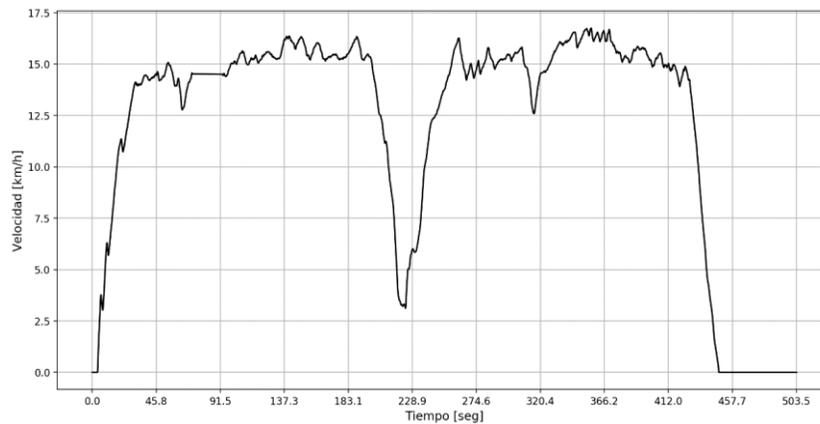


Figura 3.16. Perfil de velocidad de una prueba de validación

En la Figura 3.17 se presentan los resultados de validación para un camión modelo 2016, con cilindrada de 2990 cc. En color crema se muestran los FE medidos durante la prueba de validación (reales), y en color verde se presentan los respectivos FE estimados con el modelo. En este caso no fue posible medir las emisiones de NOx, debido a una falla en el sensor del equipo.

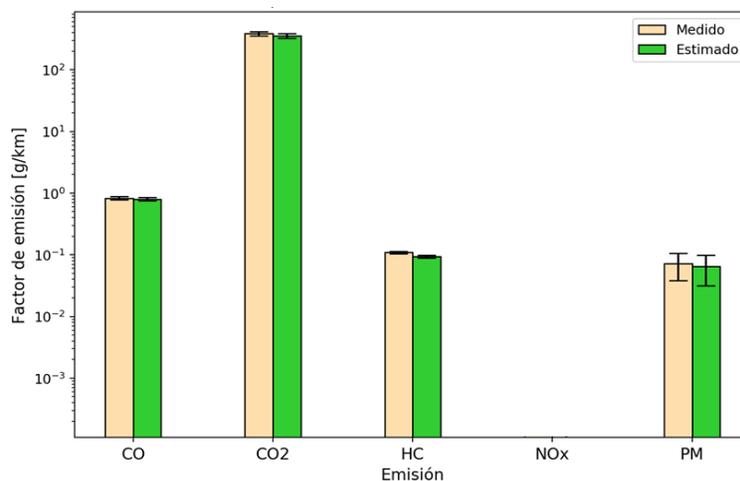


Figura 3.17. Validación del modelo para

Esta figura muestra que, en general, el modelo puede predecir confiablemente los factores de emisión. Las barras de error presentadas corresponden a los intervalos de confianza del 95%. Esto significa que, si se cruzan los rangos de estas barras entre los FE reales y los estimados, la diferencia entre éstos se considera como no significativa, con una confianza estadística del 95%. Los resultados son positivos, pues la diferencia entre las predicciones y las estimaciones no son significativas, excepto para las emisiones de HC (hidrocarburos sin quemar). Esto se debe a que el valor absoluto del FE de HC es bajo (cerca de cero), y por lo tanto una diferencia pequeña representa una proporción alta. El modelo se validó para todos los vehículos, y se encontró que, en el caso del FE de PM, siempre se cruzaron las barras de error. Esto significa que el modelo es siempre confiable para predecir las emisiones de PM, para los vehículos usados en las pruebas, y para vehículos similares.

## REFERENCIAS

- AMVA-UNAL. (2012). *Encuesta origen destino de hogares para el Valle de Aburrá*. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.
- AMVA-UPB. (2017). MODEAM - Modelo de Emisiones Atmosféricas del Valle de Aburrá. Retrieved from [http://modemed.upb.edu.co/zigma2/index.php?option=com\\_content&view=category&layout=blog&id=90&Itemid=499](http://modemed.upb.edu.co/zigma2/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=90&Itemid=499)
- AMVA-UPB. (2018). Actualización inventario de emisiones atmosféricas del valle de aburrá – año 2016.
- Dirks, K., Johns, M., Hay, J., & Sturman, A. (2003). A semi-empirical model for predicting the effect of changes on traffic flow patterns on carbon monoxide concentrations. *Atmospheric Environment*, 37, 2719–2724.
- EPA. (2002). *Methodology for developing modal emission rates for EPA's Multi-Scale Motor Vehicle and Equipment Emission System*. EPA420-R-02-027.
- Gallus, J., Kirchner, U., Vogt, R., & Benter, T. (2017). Impact of driving style and road grade on gaseous exhaust emissions of passenger vehicles measured by a Portable Emission Measurement System (PEMS). *Transportation Research Part D*, 52(2), 215–226. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.03.011>
- Hung, W. T., Tong, H. Y., Lee, C. P., Ha, K., & Pao, L. Y. (2007). Development of a practical driving cycle construction methodology: A case study in Hong Kong. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 12(2), 115–128. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2007.01.002>
- IVE. (2008). *International Vehicle Emissions Model. Attachment C. Characterizing emission variations due to driving behavior from on-road vehicles*. Los Angeles, CA.
- Jiménez, J. (1999). *Understanding and quantifying motor vehicle emissions with vehicle specific power and TILDAS remote sensing*. Massachusetts Institute of Technology.
- Liu, H., & Barth, M. (2012). Identifying the effect of vehicle operating history on vehicle running emissions. *Atmospheric Environment*, 59, 22–29.
- Sentoff, K. M., Aultman-hall, L., & Holmén, B. A. (2015). Implications of driving style and road grade for accurate vehicle activity data and emissions estimates. *Transportation Research Part D*, 35, 175–188. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.11.021>
- Tamsanya, S. Chungpaibulpatana, S. Limmeechokchai, B. (2009). Development of a driving cycle for the measurement of fuel consumption and exhaust emissions of automobiles in Bangkok during peak periods. *International Journal of Automotive Technology*, 10(2), 251–264.
- Wyatt, D. W., Li, H., & Tate, J. E. (2014). The impact of road grade on carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emission of a passenger vehicle in real-world driving. *Transportation Research Part D*, 32, 160–170. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.07.015>

Xiao, Z., Dui-Jia, Z., & Jun-Min, S. (2012). A Synthesis of Methodologies and Practices for Developing Driving Cycles. *Energy Procedia*, 16, 1868–1873.



## CAPÍTULO 4

# CICLOS DE CONDUCCIÓN Y FACTORES DE EMISIÓN PARA VEHÍCULOS Y MOTOCICLETAS

### 4.1. FACTORES DE EMISIÓN DE VEHÍCULOS LIVIANOS Y MOTOCICLETAS EN EL VALLE DE ABURRÁ

En esta sección se presentan los resultados de los factores de emisión (FE) de vehículos livianos (menores a 3,8 toneladas de peso bruto vehicular) y motocicletas. En primer lugar se presenta el ciclo de conducción sintetizado para vehículos livianos y motocicletas en el Valle de Aburrá (sección 4.1.1) y posteriormente los valores medios de los factores de emisión integrados a lo largo del ciclo con sus barras de error (incertidumbre total) en la sección 4.1.2.

#### 4.1.1. Ciclos de conducción de vehículos livianos y motocicletas

En la Figura 4.1 se muestra el ciclo de conducción para vehículos livianos, el cual tiene una duración de 2064 s. El ciclo está compuesto por cinco microviajes representado por un color diferente, que reflejan los patrones de tráfico más representativos en la región metropolitana del Valle de Aburrá. Cada microviaje tiene asociada la pendiente que le correspondió durante la recolección de datos (Figura 4.1 medio). El valor de la inclinación en la Figura 4.1 (inferior), se obtuvo a partir de la inclinación real, y fueron los datos finales programados en el banco de rodillos dinamométrico.

En la Tabla 4.1 se presentan los porcentajes de tiempo y el tiempo total para cada patrón del ciclo correspondientes a conducción urbana, mientras que en la Tabla 4.2 se muestran los parámetros característicos del ciclo de conducción.

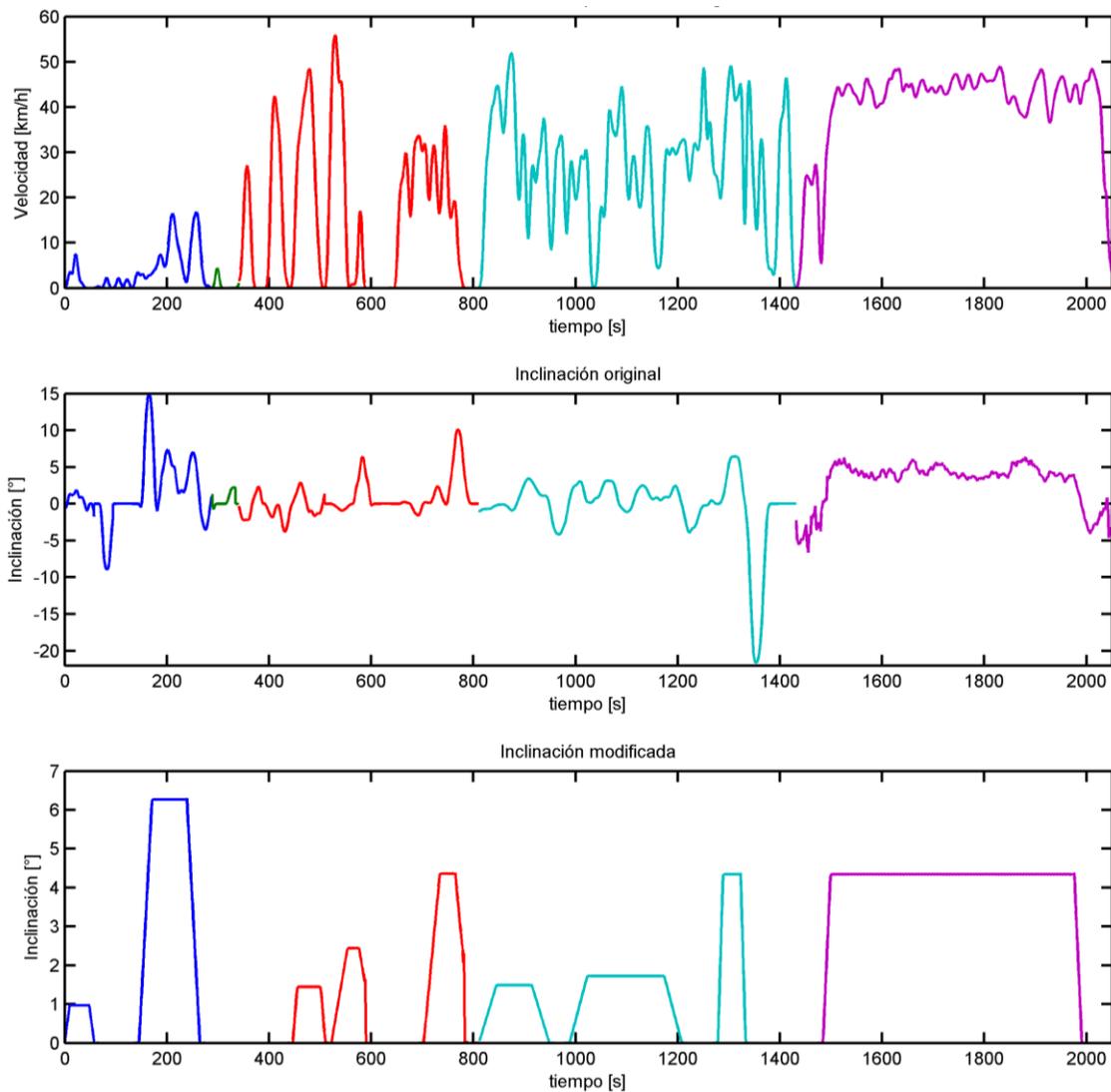


Figura 4.1. Ciclo de conducción de vehículos livianos para la región metropolitana del Valle de Aburrá. Cada color representa un microviaje representativo de un patrón de tráfico específico. Azul: mixto, verde: congestionado, rojo: fluido, cian: superfluido, púrpura: extra-urbano

Tabla 4.1. Segmentación de los datos usados para sintetizar el ciclo urbano del AMVA para vehículos livianos

Tipo de tráfico	Porcentaje de tiempo en el ciclo de conducción (%)	Tiempo de medición (s)
Congestionado	14,2	13.192
Mixto	17,1	15.920
Fluido	38,4	35.670
Superfluido	30,2	28.077
Total	100	92.840

Tabla 4.2. Parámetros característicos del ciclo de conducción de vehículos livianos del AMVA

Parámetro	Unidad	Parte urbana	Parte extraurbana
Velocidad promedio	km/h	16,6	39,4
Velocidad promedio en movimiento		19,7	39,6
Aceleración promedio	m/s <sup>2</sup>	1,1	0,51
Deceleración promedio		-1,2	-0,58
Tiempo en Ralentí	%	19,7	--
Tiempo en Aceleración		41,1	52,8
Tiempo en Deceleración		39,3	46,6
Valor RMS Aceleración	m/s <sup>2</sup>	1,3	0,86
Inclinación promedio	°	0,074	--
Tiempo en ascenso	%	50,4	--
Tiempo en descenso		45,2	--
Cambios acel./decel. (y viceversa)	#	11	46
Duración total ciclo AMVA	s	2064	
Distancia total recorrida	km	13,9	

En la Figura 4.2 se muestra el ciclo de conducción para motocicletas, el cual tiene una duración de 2045 s. En la Tabla 4.3 se muestran los parámetros característicos del ciclo de conducción para motocicletas en el Valle de Aburrá. En la Tabla 4.4 se presenta una comparación de los principales parámetros entre los ciclos de conducción de vehículos livianos y los de motocicletas. Ambos ciclos se caracterizan por tener alto porcentaje de tiempo en aceleración y deceleración, aunque las motocicletas circulan a una velocidad promedio mayor (23 km/h) que los vehículos livianos (16 km/h) y pasan menor porcentaje de tiempo en condiciones de ralentí (12%), frente al 20% de los vehículos.

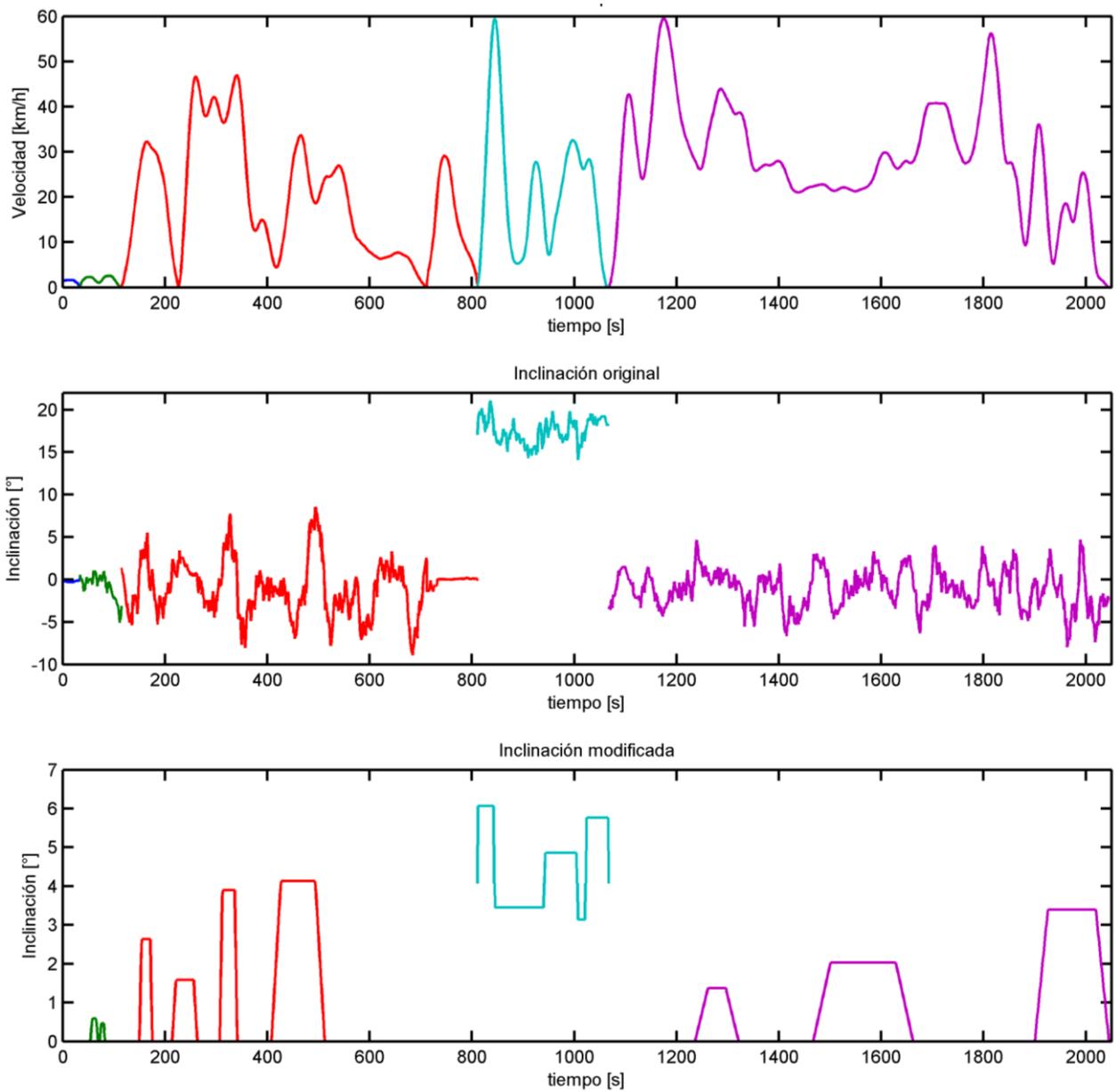


Figura 4.2. Ciclo de conducción para motocicletas en la región metropolitana del Valle de Aburrá. Cada color representa un microviaje representativo de un comportamiento específico. Azul: pasivo II, verde: pasivo I, rojo: agresivo, cian: moderado, púrpura: regulado. La curva inferior corresponde a los valores de inclinación corregidos que se introdujeron al programa informático del banco de rodillos dinamométrico

Tabla 4.3. Parámetros característicos del ciclo de conducción de motocicletas en el AMVA

Parámetro	Unidades	Parte urbana
Velocidad promedio	km/h	23.1
Velocidad promedio en movimiento		23.3
Aceleración Promedio	m/s <sup>2</sup>	0.57
Deceleración Promedio		-0.51
RMS Aceleración		0.63
Tiempo en Aceleración	%	40.9
Tiempo en Deceleración		46.8
Tiempo en Ralentí		12.3
Tiempo en ascenso		48.7
Tiempo en descenso		51.3
Cambios de aceleración/deceleración (y viceversa)	#	22
Duración	s	2045
Distancia recorrida	km	14

Tabla 4.4. Comparación de parámetros característicos entre los ciclos de conducción de vehículos livianos y de motocicletas para la región metropolitana del Valle de Aburrá

Parámetro	Unidad	Vehículos livianos	Motocicletas
Velocidad promedio	km/h	16,6	23.1
Velocidad promedio en movimiento		19,7	23.3
Aceleración promedio	m/s <sup>2</sup>	1,1	0.57
Deceleración promedio		-1,2	-0.51
Tiempo en Ralentí	%	19,7	12.3
Tiempo en Aceleración		41,1	40.9
Tiempo en Deceleración		39,3	46.8
Valor RMS Aceleración	m/s <sup>2</sup>	1,3	0.63
Tiempo en ascenso	%	50,4	48.7
Tiempo en descenso		45,2	51.3
Cambios acel./decel. (y viceversa)	#	11	22
Duración total ciclo AMVA	s	2064	2045
Distancia total recorrida	km	13,9	14

#### 4.1.2. Factores de emisión de vehículos livianos y motocicletas

En la Tabla 4.5 se presentan los factores de emisión de los vehículos livianos y motocicletas. Se ha incluido la eficiencia de utilización del combustible (km/galón).

Tabla 4.5. Factores de emisión de vehículos livianos y motocicletas medidos localmente en el Valle de Aburrá

Tipo	Tecnología	Cilindrada (c.c.)	Cons. Combust. (km/gal)	±	CO [g/km]	±	THC [g/km]	±	CO <sub>2</sub> [g/km]	±	NOx [g/km]	±	PM2.5 [mg/km]	±
Vehículo con Motor Encendido Provocado	Monopunto, Catal., 8 valv.	1000	58,3	1,2	3,70	0,29	0,992	0,065	140,2	9,3	0,79	0,03	4,14	0,66
	Multipunto, Catal., 16 valv.	1600	41,6	0,4	2,72	0,72	0,067	0,005	204,8	4,0	0,22	0,08	1,49	0,55
	Multipunto, Catal., 16 valv., VVT	2700	28,4	0,3	1,05	0,40	0,092	0,064	316,0	12,9	0,18	0,12	0,29	0,12
	Iny. Directa Gasolina, Catal., 16 valv.	2000	60,5	6,3	0,43	0,27	0,024	0,009	155,1	3,6	0,02	0,01	0,19	0,06
Vehículo con Motor Encendido Compresión	Turbocompresor (TC), pre-EURO	2500	40,3	0,9	1,64	0,01	1,602	0,110	235,6	3,4	1,87	0,04	47,34	10,78
	TC, Intercooler (IC), EGR, EURO 2	3000	35,9	0,1	1,38	0,06	0,491	0,031	254,9	3,2	2,30	0,04	5,60	0,69
	TC, IC, Riel Común (CR), EGR, Catal. Oxidación (DOC), EURO 4	2500	35,5	0,4	1,23	0,03	0,267	0,002	274,2	3,8	1,96	0,05	33,97	2,61
	TC, IC, CR, EGR frío, Catal. Oxidación Partículas (POC), EURO 4	3780	23,5	1,4	2,60	0,09	0,396	0,009	399,3	11,6	4,24	0,26	11,24	1,84
Motocicletas	Iny. Electrónica, EURO 3	125	111,0	1,5	0,99	0,05	0,029	0,001	73,4	1,0	0,071	0,00	0,07	0,02
	Iny. Electrónica, EURO 3	150	124,5	6,1	2,99	0,31	0,074	0,022	67,6	4,2	0,094	0,03	0,10	0,07
	Carburador, EURO 2	125	89,9	2,5	14,17	0,40	0,595	0,046	70,7	0,6	0,223	0,01	1,43	0,19
		150	85,1	1,6	25,10	0,41	0,617	0,035	53,9	1,3	0,024	0,00	0,38	0,03
		100	136,7	4,3	4,60	0,11	0,562	0,059	47,8	2,8	0,509	0,02	0,27	0,04
		110	139,2	4,2	7,75	0,29	0,346	0,023	42,7	3,0	0,352	0,02	0,15	0,01
		125	95,3	3,2	20,50	0,74	0,868	0,040	72,4	1,7	0,480	0,01	6,94	1,08
200	95,4	2,3	13,69	1,24	1,011	0,024	72,3	2,2	0,210	0,02	3,39	0,28		

El valor de incertidumbre ( $\pm$ ) de la Tabla 4.5 corresponde a la total, es decir, la aleatoria que está asociada a la desviación estándar, y la sistemática que está relacionada con la precisión y calibración de los equipos de medición. De estos resultados, cabe destacar lo siguiente:

1. Se observa un marcado impacto de la evolución de la tecnología de los motores sobre la disminución de las emisiones contaminantes. El CO llega a ser del orden de 9 veces más bajo en un vehículo GDI (gasolina inyección directa) que en uno antiguo de inyección monopunto, a pesar de tener el primero el doble de cilindrada. Algo similar ocurre al comparar el CO de la camioneta con el vehículo más antiguo de inyección monopunto, en este caso la camioneta emite del orden de 3,5 veces menos CO. Esto también se evidencia en

las motocicletas, ya que las de inyección electrónica de combustible con tecnología EURO 3 fueron las que menos gases contaminantes y menos masa de material particulado emitieron entre todas.

2. Las motocicletas carburadas con tecnología de control de emisiones Euro 2 son las que más emiten CO entre todas las fuentes móviles medidas. Esto se explica por su mayor ineficiencia, la cual incrementa a medida que el tamaño del motor se hace más pequeño.
3. Los FE de CO y THC de los vehículos con motor de encendido por compresión (MEC) son del mismo orden de magnitud que el de los de encendido por compresión livianos y de las motocicletas. Esto se debe a que los MEC trabajan usualmente con mezclas aire/combustible significativamente pobre.
4. Con marcada diferencia los MEC (llamados comúnmente diésel), emiten significativamente más NOx y PM2.5 por cada kilómetro recorrido que el resto de categorías vehiculares ensayadas.
5. Una motocicleta en mal estado mecánico, a pesar de tener baja cilindrada (125 cc), puede llegar a emitir aproximadamente la misma masa de PM2.5 que un camión con tecnología EURO IV con capacidad de carga de 4 toneladas y cilindrada de 3780 cc.
6. Las motocicletas son las que más kilómetros logran recorrer por cada galón de combustible, llegando hasta cerca de 140 km/gal para el ciclo de conducción del AMVA, desafortunadamente, el poco combustible que no utiliza para la tracción produce altas cantidades de CO, THC y NOx frente a los vehículos livianos de ciclo Otto.

En la Figura 4.3 se muestra el factor de emisión de número de partículas [# / km]. Este factor empieza a cobrar importancia en la medida que todo combustible, por bajo contenido carbonoso que posea, incluso si carece de azufre y aromáticos como los biocombustibles o, aunque se trate del gas natural, cuyo contenido de metano es elevado, siempre va a generar las denominadas nanopartículas en el proceso de combustión. Estas nanopartículas aunque tienen poca masa (se podría decir que despreciable), por su tamaño pueden causar serios problemas a la salud humana.

Los vehículos livianos con motor de encendido por compresión y sin filtros de partículas emiten del orden de diez billones de partículas por cada kilómetro recorrido, es decir, diez veces más que los vehículos con motor de encendido provocado y que las motocicletas. No obstante, una motocicleta de tan sólo 125 cc, pero en mal estado de mantenimiento o mal calibrada, puede llegar a emitir del orden de cinco billones ( $5 \times 10^{12}$ ) más de partículas por cada kilómetro recorrido que un vehículo antiguo de 1000 cc de cilindrada y más de 100 veces mayor número de partículas que un vehículo nuevo con 2000 cc en un kilómetro.

La importancia del factor de número de partículas se aprecia en la Figura 4.4, en la que las partículas de mayor tamaño son las que tienen más masa (barras en color azul), pero se encuentran en cantidades significativamente bajas, mientras que las más perjudiciales para la salud por su tamaño nanométrico, son las que tienen menos masa, pero se encuentran en mayor número (barras en color verde).

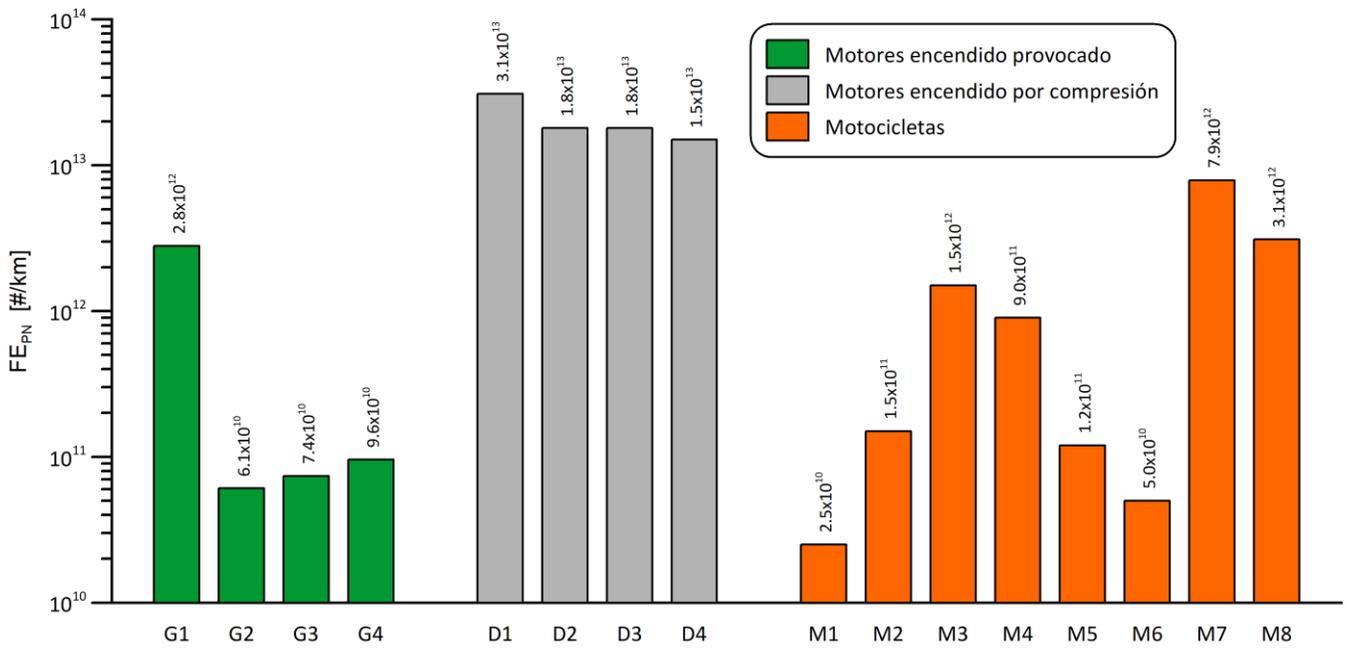


Figura 4.3. Factor de emisión integrado a lo largo del ciclo de conducción para el número de partículas por cada kilómetro recorrido

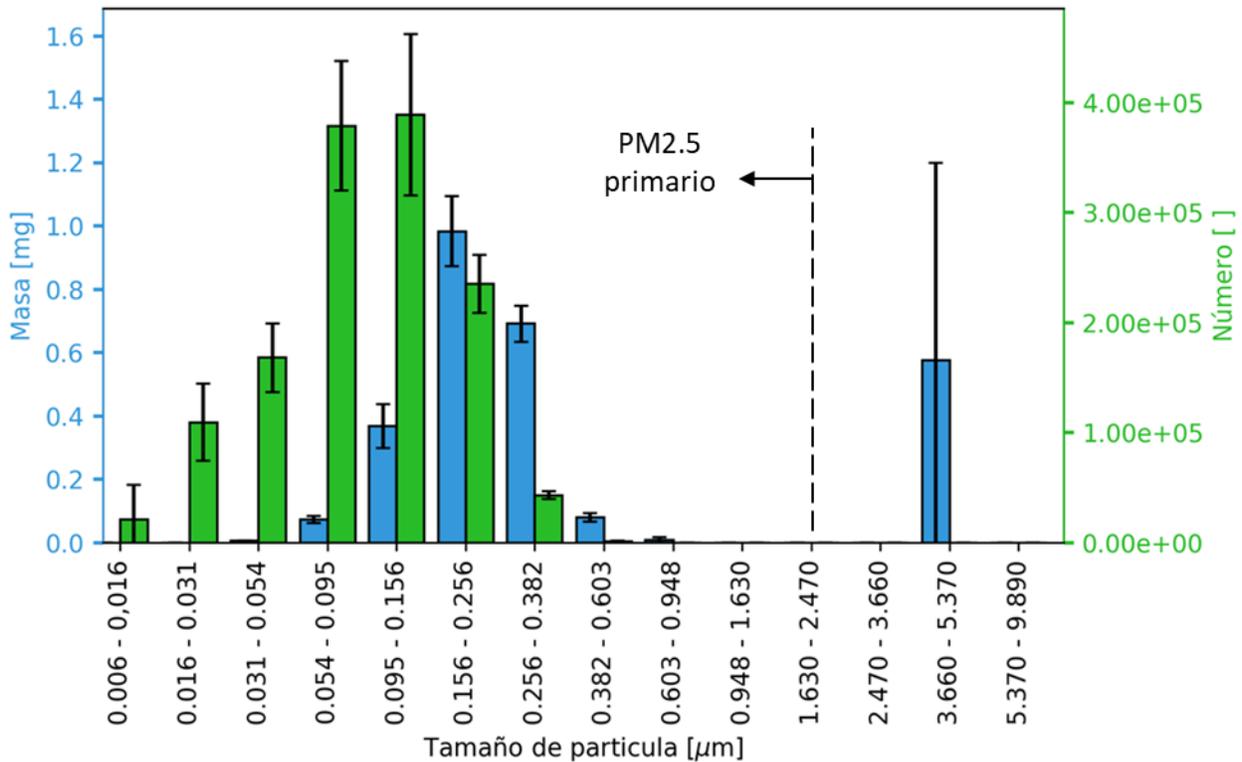


Figura 4.4. Distribución de masa y tamaño de partículas integradas a lo largo de un ciclo de conducción para un vehículo de motor de encendido provocado de 1600 c.c. de inyección multipunto y catalizador

## 4.2. FACTORES DE EMISIÓN DE VEHÍCULOS PESADOS DE PASAJEROS Y DE CARGA

En esta sección se presentan los resultados de los factores de emisión (FE) de vehículos pesados de transporte de pasajeros y de carga. En primer lugar se muestran los ciclos de conducción sintetizados para cada tipo de vehículo en función de su actividad en el Valle de Aburrá (sección 4.2.1) y posteriormente los valores de los factores de emisión integrados a lo largo de cada ciclo de conducción en la sección 4.2.2. Finalmente, en la sección 4.2.3 se han representado los valores estimados de los FE, haciendo uso del análisis modal de emisiones, para las dos zonas urbanas de aire protegido del Valle de Aburrá.

### 4.2.1 Ciclos de conducción para buses, busetas, camiones y volquetas

En la Figura 4.5 se presenta el ciclo de conducción obtenido para buses en el Valle de Aburrá. El ciclo se reprodujo sobre una distancia total de 3,7 km en la autopista Medellín-Bogotá, dando inicio a las pruebas en el km 2,5 a partir del puente sobre el río Medellín. Los primeros 825 segundos se realizaron en ascenso, con algunas partes llanas, mientras que los restantes 825 segundos se realizaron sobre la misma vía, pero en descenso.

En las Figuras 4.6 y 4.7 se muestran los ciclos de conducción sintetizados para camiones y volquetas en el Valle de Aburrá.

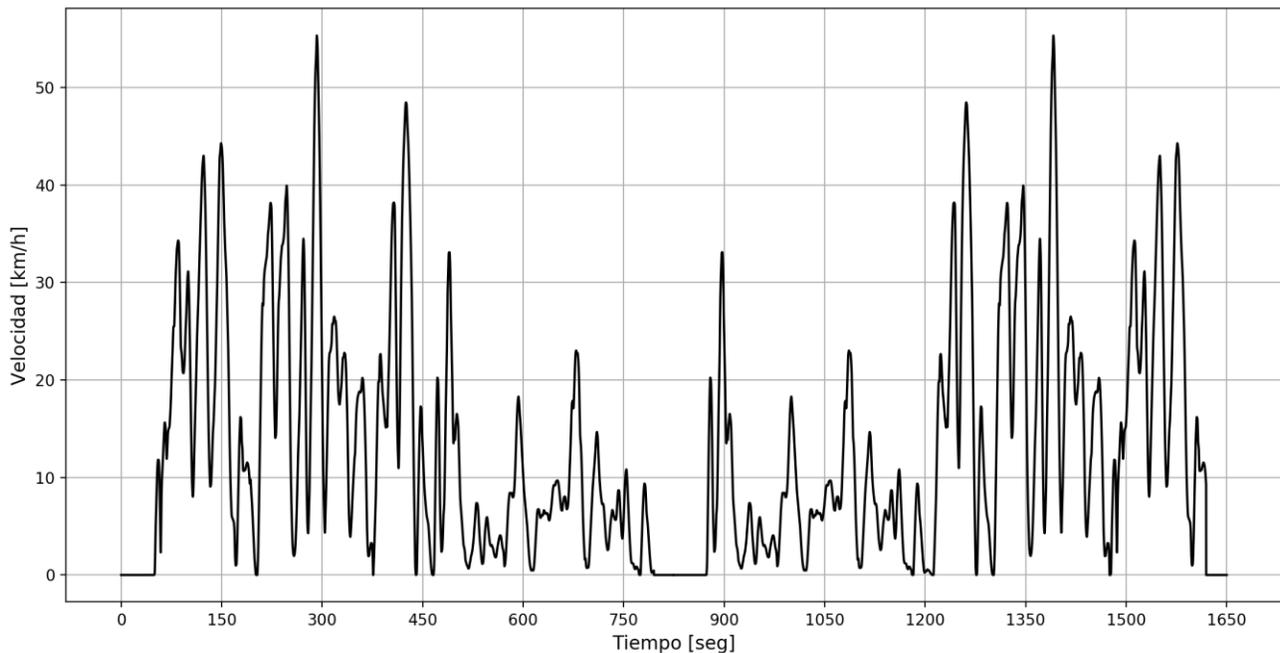


Figura 4.5. Ciclo de conducción sintetizado para buses en el Valle de Aburrá. Tiempo total = 1650 s, tiempo subida: 825 s, tiempo en descenso: 825 s, distancia total = 3,5 km, tiempo en ralentí = 260 s.

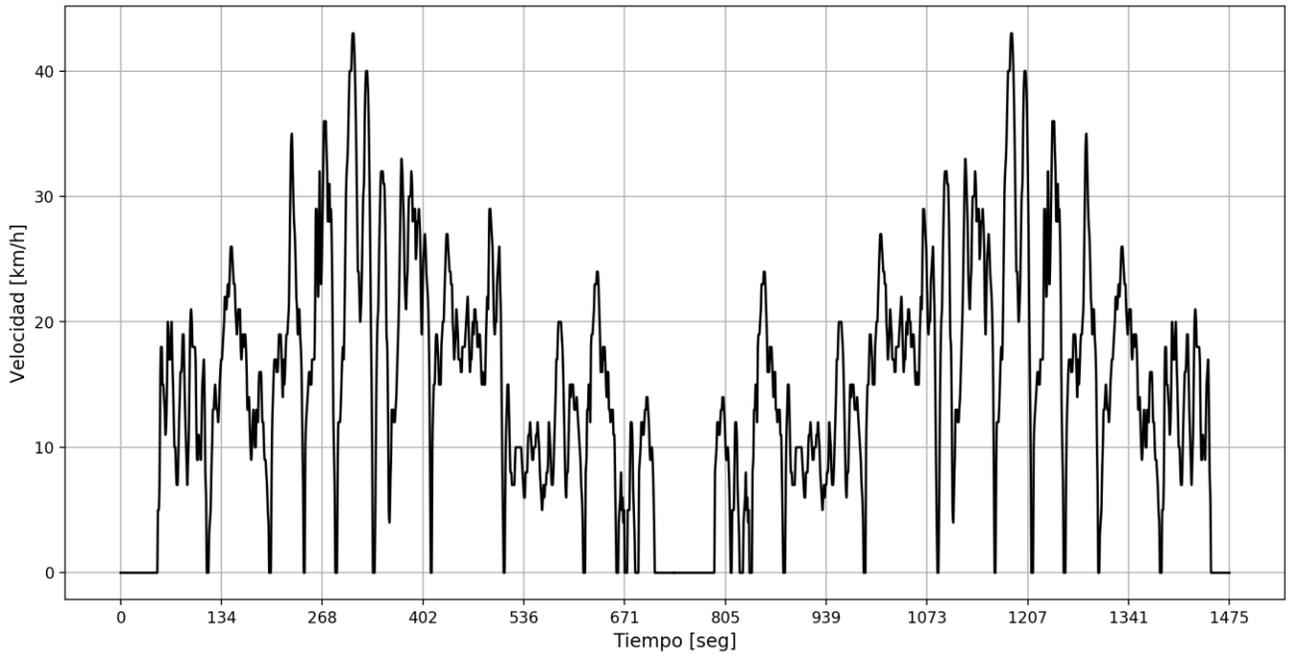


Figura 4.6. Ciclo de conducción para camiones en el Valle de Aburrá

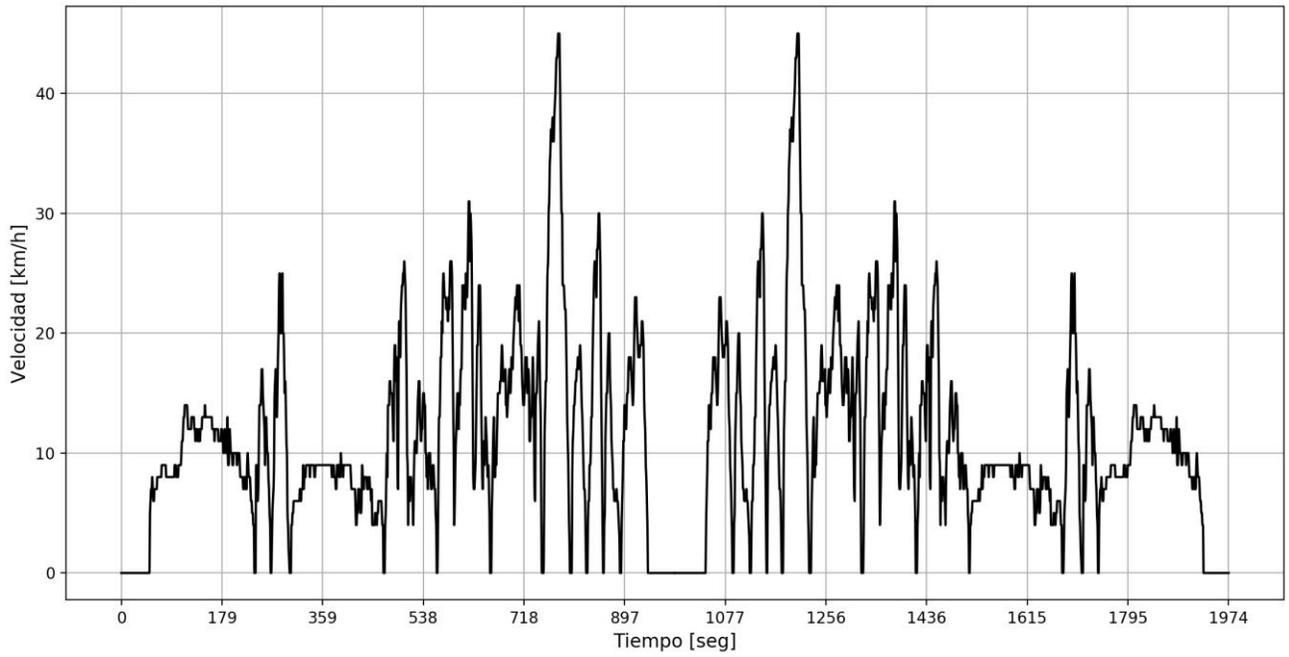


Figura 4.7. Ciclo de conducción para volquetas en el Valle de Aburrá

#### 4.2.2 Factores de emisión para buses, busetas, camiones y volquetas

En la Tabla 4.6 se presentan los factores de emisión de los vehículos pesados de pasajeros y de carga. Se ha incluido la eficiencia de utilización del combustible (km/galón).

Tabla 4.6. Factores de emisión para vehículos pesados de transporte de pasajeros y de carga en el Valle de Aburrá

Actividad	Modelo	Cilind. (cc)	Capac.	Cons. Combust. (km/gal)	CO (g/km)	CO2 (g/km)	THC (g/km)	NOx (g/km)	PM2.5 (mg/km)	PM 10 (mg/km)
Buses	2009 Euro II	7560	37 pas.	8,0	7,04	985,8	0,76	2,47	741	1010
	2016 Euro IV	5193	19 pas.	8,6	6,61	873,8	0,79	5,78	187	530
	2003 PreEuro	4570	28 pas.	8,2	6,29	894,8	0,89	5,25	1515	2870
	2016 Euro IV	5193	42 pas.	6,4	8,24	1163,9	0,67	4,41	503	2160
Camiones	2017 Euro V	6692	10 Ton	7,8	4,46	1040,9	0,09	4,89	381	1580
	2006 preEuro	2771	2,65 Ton	16,5	6,78	611,8	0,95	---	332	1150
	2016 Euro IV	2999	2,45 Ton	17,3	2,30	522,1	0,27	---	71	220
Volqueta	2018 Euro IV	7790	10 Ton	9,8	10,55	866,5	0,69	---	116	650
Camión GC	1993 PreEuro	6000	10 Ton	7,0	39,31	741,6	1,18	5,53	7527	15880
Volqueta GC	1995 PreEuro	6000	10 Ton	4,9	36,79	1643,5	2,82	---	5714	20930

La disminución del FE de PM2.5 en la medida que la tecnología del vehículo es más nueva confirma los resultados obtenidos en vehículos livianos (Figura 4.8). En la categoría de buses el más contaminante fue pre-Euro modelo 2003. Se identifican dos vehículos pesados Grandes Contaminadores: el camión de diez toneladas modelo 1993 (con un FE de PM2.5 de 7527 mg/km) el cual emite cerca de 20 veces más PM2.5 por cada kilómetro recorrido que uno de la misma categoría de tecnología Euro V, y la volqueta modelo 1995 (con un FE de PM2.5 de 5714 mg/km) la cual emite cerca de 48 veces más que la volqueta Euro IV.

Al comparar los FE de PM2.5 medidos localmente en el Valle de Aburrá con los propuestos por el modelo COPERT de la Agencia de protección de medioambiente de Europa (EEA) y el modelo IVE se aprecian diferencias significativas, principalmente para los dos vehículos grandes contaminadores (Figura 4.9). Los valores de los FE del modelo IVE fueron obtenidos del inventario de emisiones del AMVA (AMVA, 2018), mientras que los del modelo COPERT fueron obtenidos de López, et al (López, Flores, Lumbreras, & Villimar, 2011). La razón para esto puede deberse a que el IVE fue desarrollado a mediados de la década del dos mil, momento para el cual no estaban desarrollada la tecnología para medir PM2.5 en ruta, por lo tanto, el IVE provee correlaciones obtenidas a partir de mediciones de emisiones gaseosas. De otra parte, la tipología y nivel tecnológico de los vehículos medidos en este proyecto, altamente representativos del parque automotor que circula por la región, no se parecen a los utilizados para el desarrollo de esos modelos. Sumado a lo anterior, se debe tener en consideración que los hábitos de conducción, así como la topografía y condiciones climáticas de la región del Valle de Aburrá distan mucho de los utilizados en el COPERT y en el IVE.

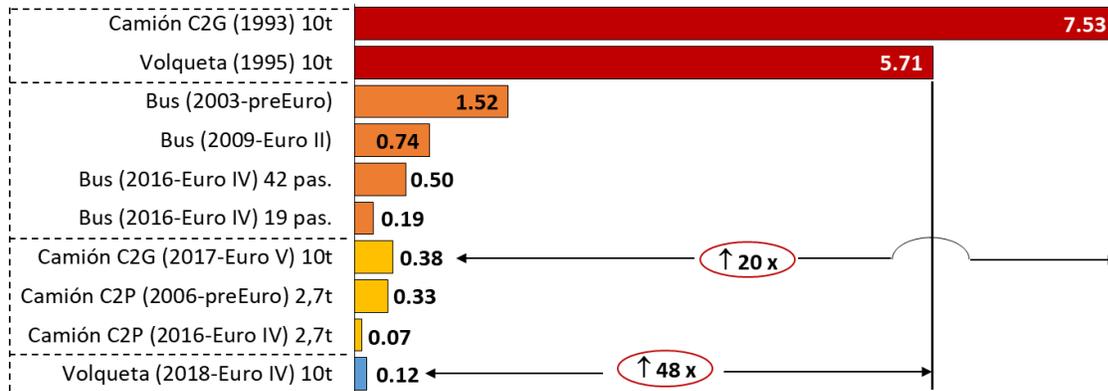


Figura 4.8. Factor de emisión de PM2.5 (g/km) para vehículos pesados en el Valle de Aburrá

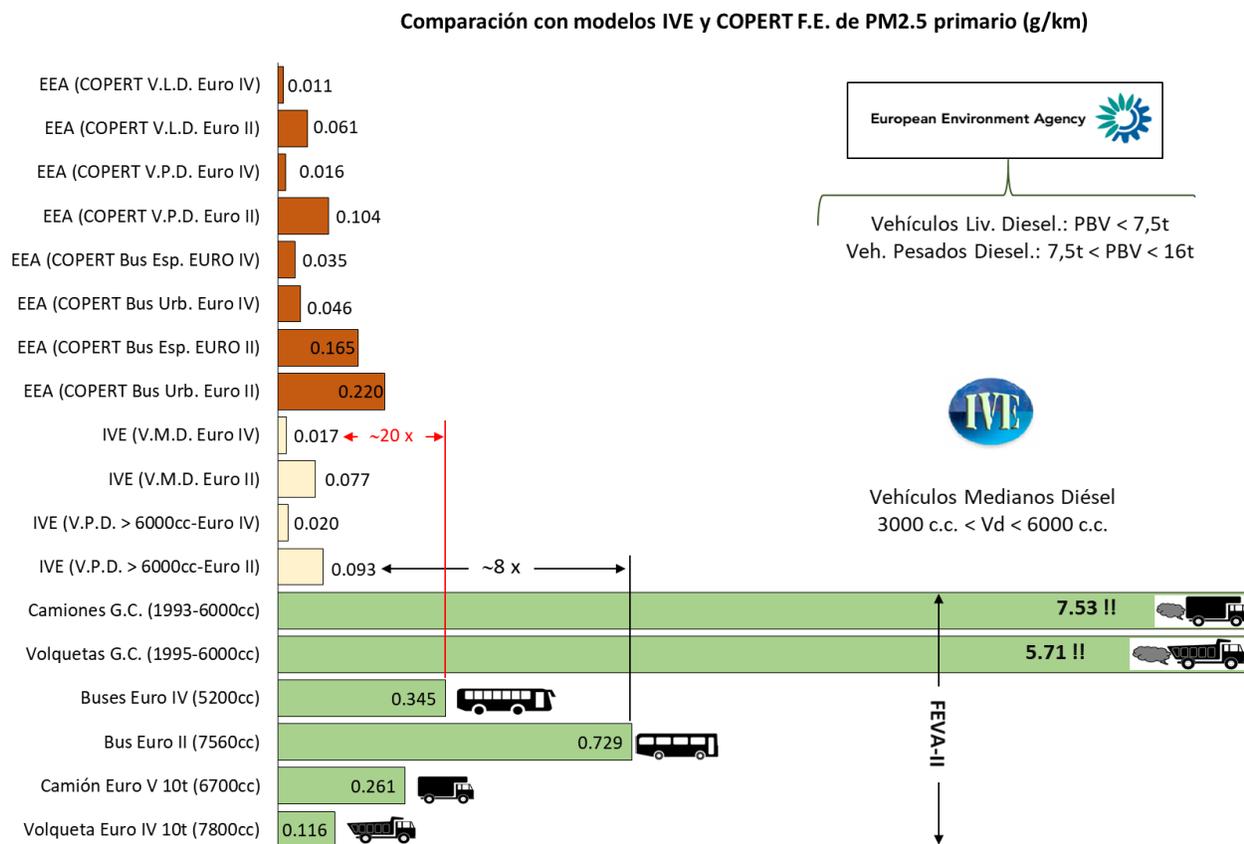


Figura 4.9. Comparación de los FE PM2.5 medidos en el Valle de Aburrá con los recomendados por los modelos internacionales IVE y COPERT. FEVA = Factores de Emisión medidos localmente en el Valle de Aburrá

Los resultados de los FE de PM2.5 reportados en este trabajo, tienden a ser más parecidos a los medidos en ciudades chinas (Figura 4.10), caracterizadas por tener elevada cantidad de vehículos con tecnologías similares a las del Valle de Aburrá (máximo EURO IV a 2018).

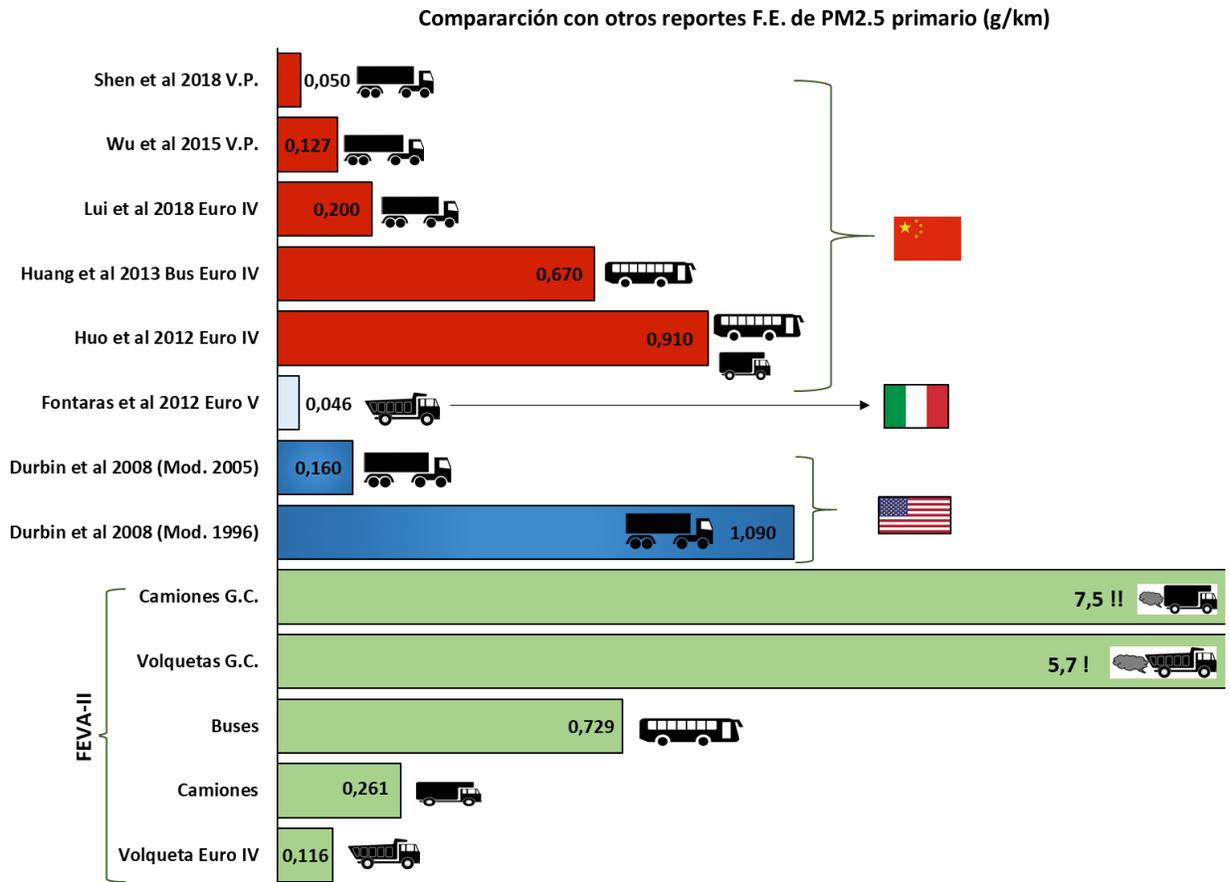


Figura 4.10. Comparación de los FE de PM2.5 con otros reportados en la literatura. Fuentes: (Durbin, Johnson, Miller, Maldonado, & Chernich, 2008; Fontaras et al., 2012; Huang et al., 2013; Huo et al., 2012; Shen et al., 2018; Wu et al., 2015; Yang, 2018)

#### 4.2.3 Estimación de emisiones en las ZUAP del Valle de Aburrá a través del AME

La potencia de esta herramienta de predicción llamada Análisis Modal de Emisiones, consiste en que sin usar equipos de medición de emisiones a bordo de un vehículo, pero disponiendo de los datos de actividad del vehículo (perfil velocidad en función del tiempo), en la vía o zona deseada, se puede hacer la estimación de los factores de emisión a partir de los que se tengan medidos para ese mismo vehículo en otro recorrido diferente.

La Figura 4.11 muestra los resultados de la predicción de los factores de emisión (CO, CO2, THC, NOx y PM2.5) mediante el modelo de Análisis Modal de Emisiones (AME) para un autobús modelo 2009, de 7560 c.c., con capacidad para 37 pasajeros. La predicción se realizó como si el bus estuviera recorriendo la zona urbana de aire protegido (ZUAP) ubicada en la zona centro de Medellín (Figura 4.12). A modo de comparación se presentan los FE medidos para este bus en la prueba en ruta (barras naranjas). Los resultados de los FE estimados para la ZUAP centro difieren de los medidos, porque el perfil de velocidad y la pauta de conducción cambian respecto a la zona donde se midieron experimentalmente los factores de emisión. Estos resultados sugieren que el patrón de movilidad de la zona centro de Medellín puede llegar a triplicar todos los factores de emisión para este vehículo.

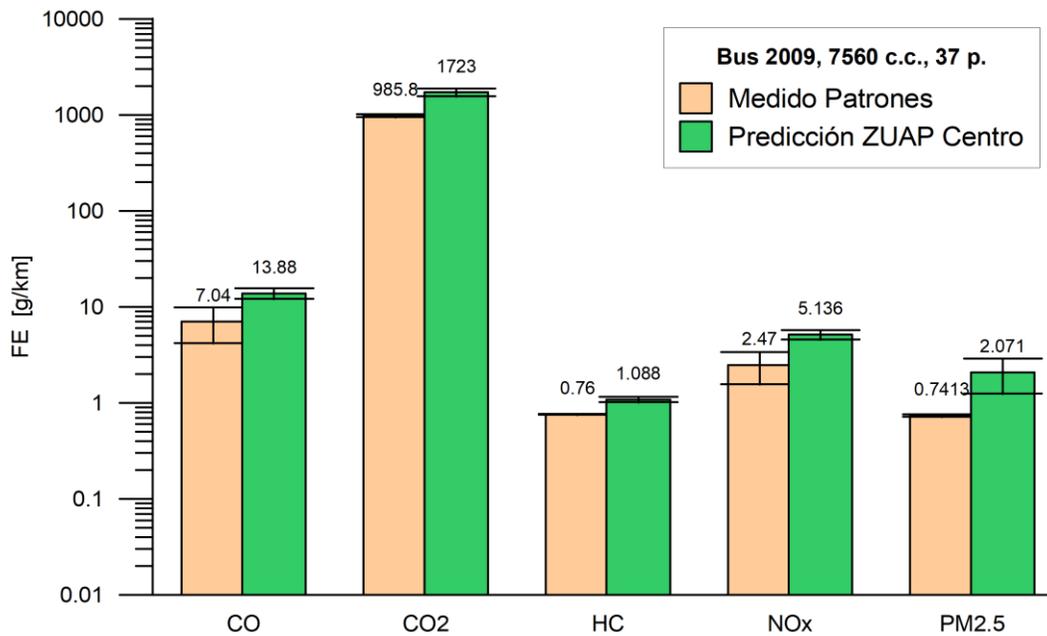


Figura 4.11. Factores de emisión estimados para un autobús operando en la ZUAP del centro

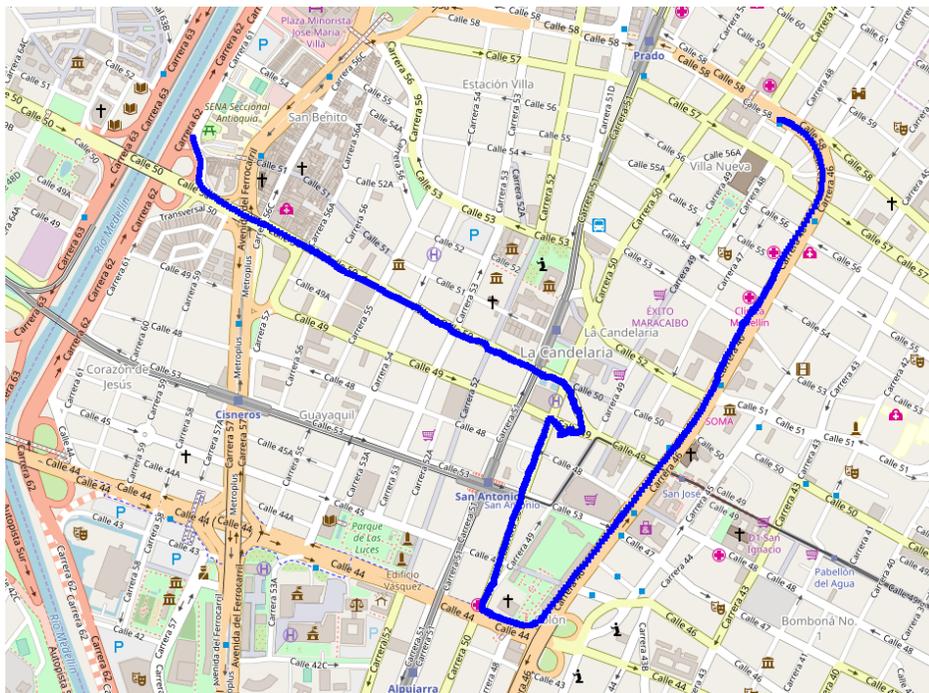


Figura 4.12. Recorrido de un autobús de la ruta Belén las Playas en la ZUAP del centro sobre la que se realizó la estimación de los factores de emisión

La Figura 4.13 (superior) corresponde al perfil de velocidad que se midió mediante la técnica de persecución a un autobús similar al que se midió con equipos a bordo en carretera (modelo 2009 de 7560 cc y capacidad para 37 pasajeros). La condición transitoria que se aprecia corresponde con un elevado número de paradas, arranques,

aceleraciones y deceleraciones, que conllevan a estimar que las emisiones se pueden triplicar frente a las medidas con el ciclo de conducción representativo de esta familia de vehículos (Figura 4.13 –inferior).

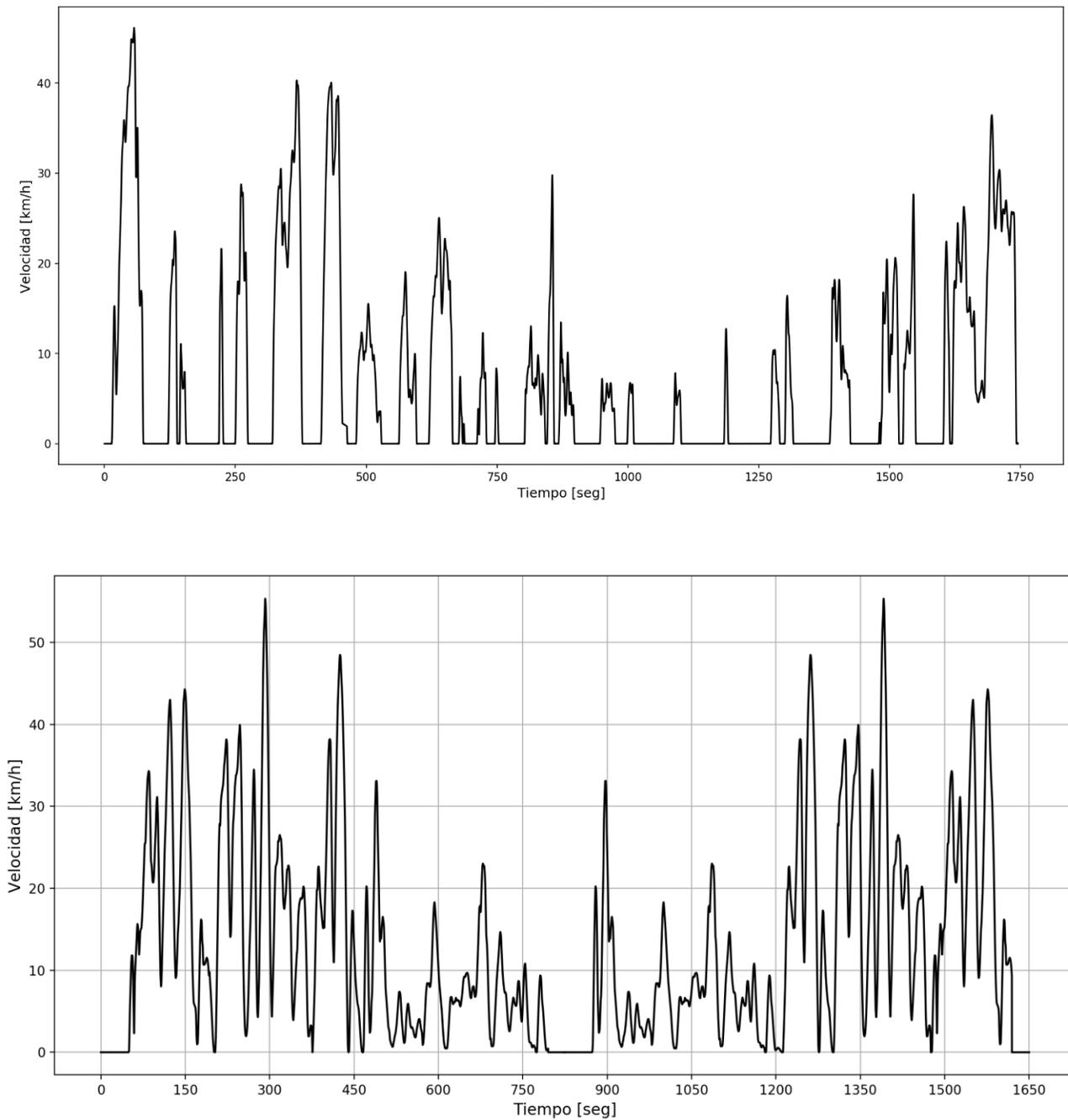


Figura 4.13. Perfiles de velocidad para un autobús operando en la ZUAP del centro

Las autoridades de movilidad podrían hacer uso de la potencia predictiva de este modelo para modificar patrones de conducción en estas zonas y valorar su impacto en la carga de emisiones contaminantes que se generarían o se ahorrarían.

### 4.3. OBSERVACIONES A LA RESOLUCIÓN 910 DE 2008

La determinación experimental de los factores de emisión para el Valle de Aburrá permitió evidenciar varias limitaciones en la Resolución 910 de 2008 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, mediante la cual se fijan los valores máximos de emisiones contaminantes de fuentes móviles. Las principales fueron:

#### 1. Respecto a las emisiones de NOx

La Resolución no exige límite para las emisiones de NOx, contaminante clave para determinar el correcto estado de operación de los catalizadores de tres vías. Las emisiones de NOx en prueba estática son bajas, pero cobran sentido en prueba dinámica. El efecto de este gas contaminante sobre la formación de ozono atmosférico y sobre material particulado PM2.5 secundario es ampliamente conocido, por lo que se recomienda incluirlo en la nueva resolución. Los F.E. de NOx son elevados para las tecnologías vehiculares que conforman el parque automotor del Valle de Aburrá, tal como lo muestra la Figura 4.14.

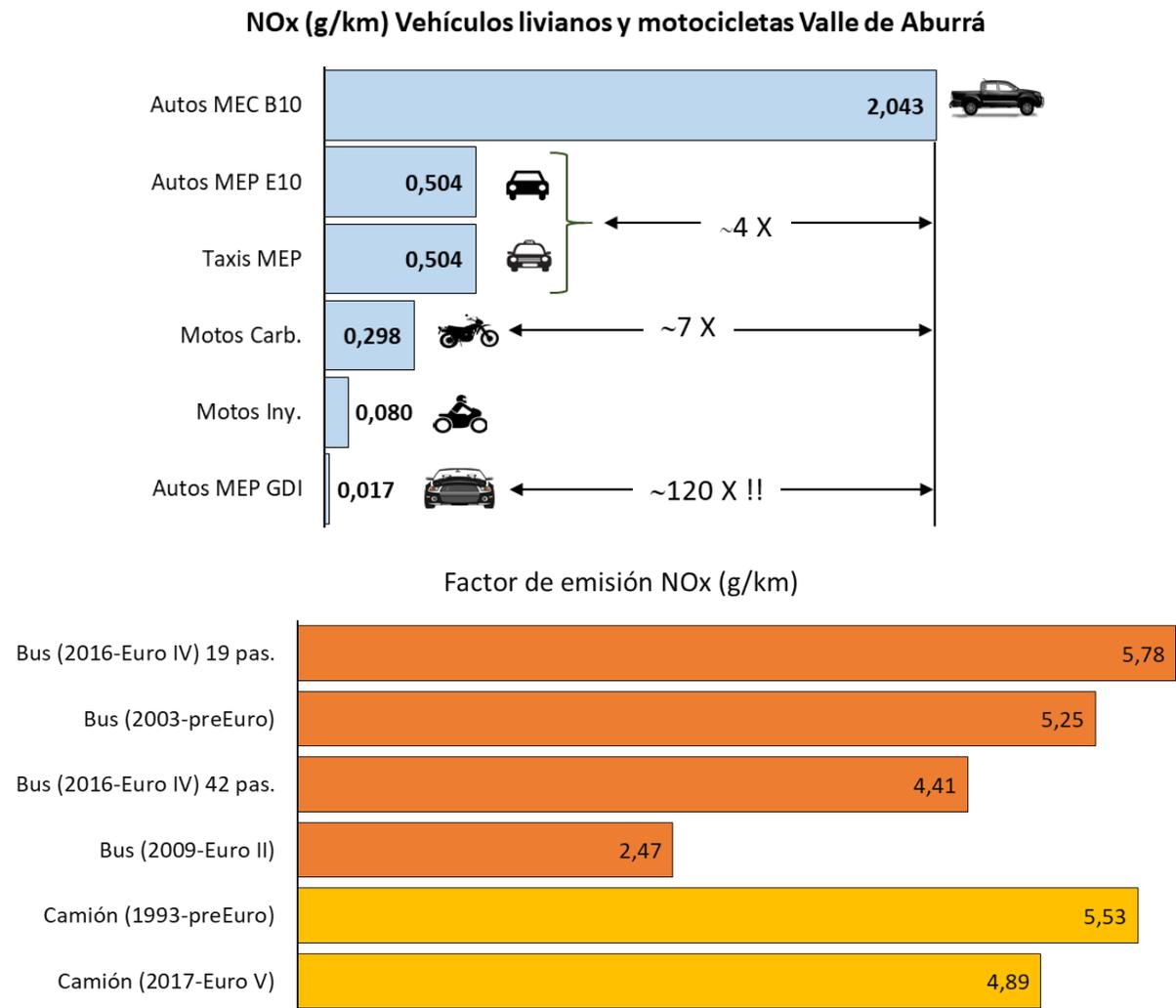


Figura 4.14. Factores de emisión de NOx para vehículos livianos y motocicletas en el Valle de Aburrá (arriba), y vehículos pesados (abajo)

#### 2. Respecto a los valores máximos de emisiones de CO y THC exigidos

Las emisiones gaseosas se subestiman respecto a las reales, puesto que las exigidas por la Resolución se llevan a cabo en condiciones de prueba estática, es decir con el motor encendido pero en vacío. En algunos casos las diferencias son de varios órdenes de magnitud, como lo evidencian las mediciones de monóxido de carbono e hidrocarburos totales (THC) presentadas en las Figuras 4.15 y 4.16.

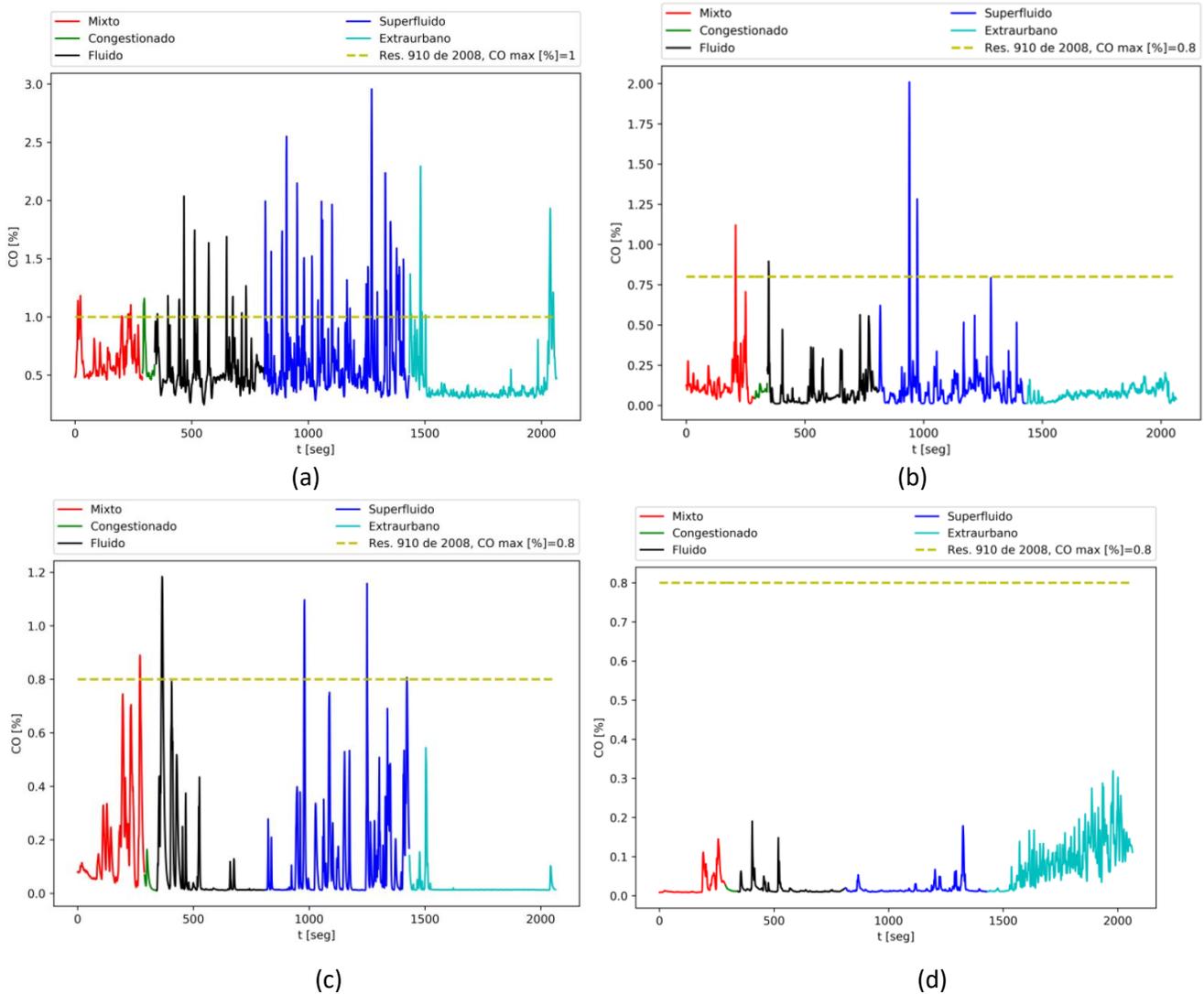


Figura 4.15. Emisiones instantáneas de CO (%) durante un ciclo de conducción del AMVA. La línea a trazos representa la exigencia de la Resolución 910 de 2008 bajo prueba estática. (a): Vehículo G1, 1000 cc, inyección monopunto, catalizador, (b): vehículo G2, 1600 cc, inyección multipunto, catalizador, (c): Vehículo G3: camioneta inyección multipunto, 2700 cc, catalizador, VVT y (d): Vehículo G4: gasolina de inyección directa, catalizador

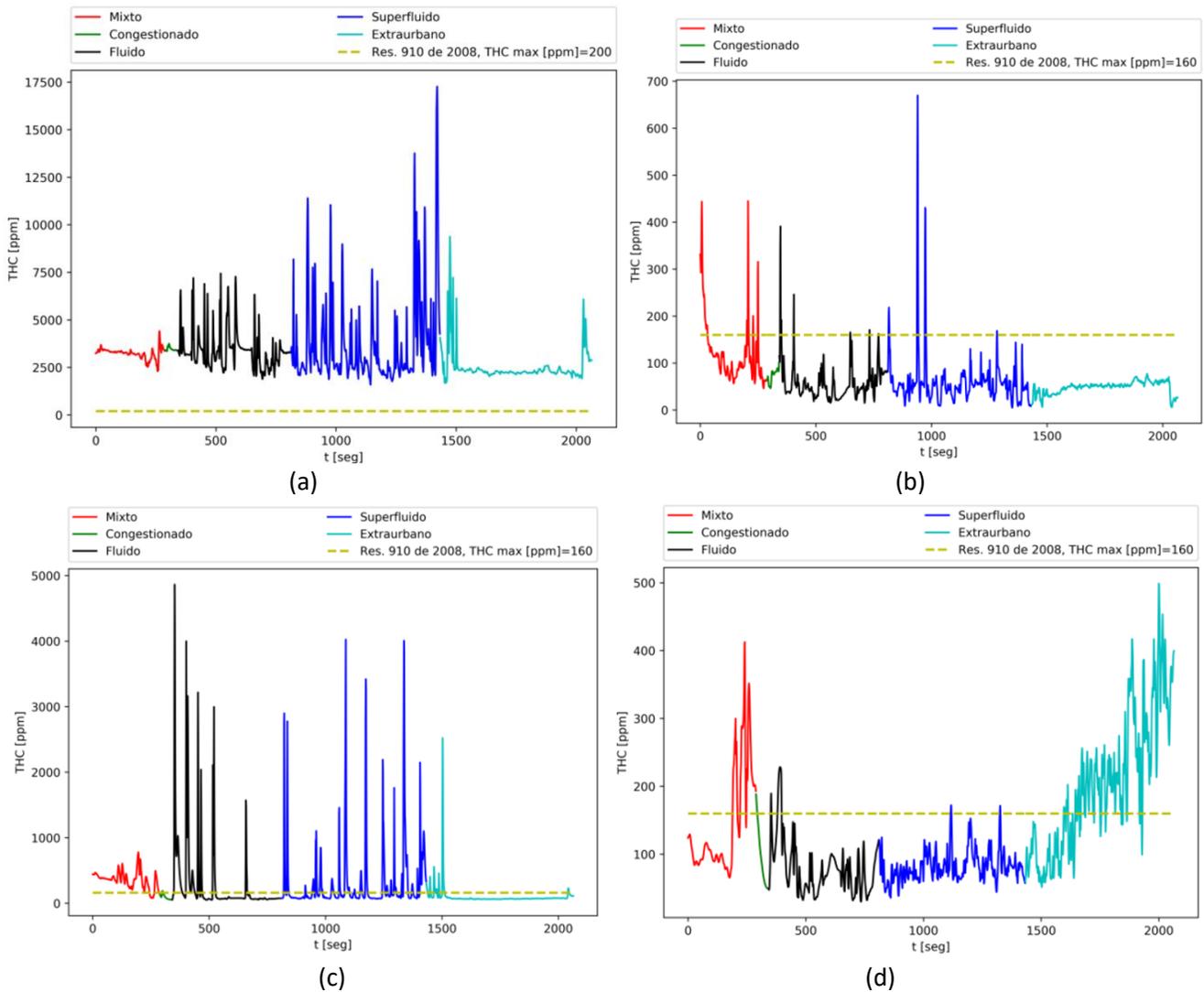


Figura 4.16. Emisiones instantáneas de THC (ppm) durante un ciclo de conducción del AMVA. La línea a trazos representa la exigencia de la Resolución 910 de 2008 bajo prueba estática. (a): Vehículo G1, 1000 cc, inyección monopunto, catalizador, (b): vehículo G2, 1600 cc, inyección multipunto, catalizador, (c): Vehículo G3: camioneta inyección multipunto, 2700 cc, catalizador, VVT y (d): Vehículo G4: gasolina de inyección directa, catalizador

Los vehículos con tecnologías avanzadas como la inyección directa de gasolina (y sus mezclas con otros combustibles), están lejos de verse afectados por esta resolución, puesto que sus emisiones gaseosas (CO, CO<sub>2</sub>, THC y NO<sub>x</sub>) son significativamente bajas, lo que sugiere establecer límites más realistas que permitan detectar el buen estado de inspección y mantenimiento de estas nuevas tecnologías vehiculares. Adicionalmente la inyección directa de gasolina empieza a ser una tecnología en la que la emisión de material particulado debe considerarse desde el punto de vista regulatorio. El factor de emisión del vehículo G4, con sistema de inyección GDI fue el que mayor número de partículas emitió ( $9,6 \times 10^{10}$ ) entre las nuevas tecnologías de vehículos ensayadas: G2 con multipunto más catalizador ( $6,1 \times 10^{10}$ ) y camioneta multipunto con catalizador y sistema VVT con  $7,4 \times 10^{10}$ .

### 3. Respecto a los equipos y técnicas de medición

La técnica de medición de los hidrocarburos totales (THC) por infrarrojo no dispersivo (NDIR) es de baja confiabilidad y subestima sustancialmente la verdadera emisión de THC a la atmósfera, ya que se produce condensación de los gases calientes en la sonda y en los filtros, previo a su ingreso al equipo de gases. La técnica NDIR es adecuada para CO y CO<sub>2</sub>, pero no lo es para THC. La técnica correcta, e internacionalmente aceptada para medir THC es la denominada ionización de llama (FID), que fue la usada para determinar los factores de emisión en el trabajo que aquí se presenta.

### 4. Respecto a la opacidad de humo

Para introducir la discusión sobre la opacidad de humo es necesario retomar las definiciones que al respecto de la opacidad están contempladas en la norma NTC 4231 de 2012, particularmente en el anexo B (ICONTEC NTC-4231-, 2012), que son análogas a las mismas definiciones de las normas de referencia de esta norma técnica colombiana (ISO 8178-10, 2002; ISO 11614, 1999; SAE J 1667, 1996):

**N<sub>s</sub>** = corresponde al porcentaje de opacidad estándar (%).

**N<sub>m</sub>** = porcentaje de opacidad medida (%). Es el porcentaje de opacidad medida en el opacímetro de una LTOE específica.

**K** = coeficiente de absorción de luz o densidad de humos (m<sup>-1</sup>).

**L<sub>m</sub>** = Longitud de trayectoria óptica efectiva medida. Es el mismo LTOE del opacímetro. Ver curvas de *L<sub>m</sub>* en Figura 4.1 (color azul).

**L<sub>s</sub>** = Longitud de trayectoria óptica efectiva estándar. Ver curvas de *L<sub>s</sub>* en Figura 4.1 (color verde). En algunas ocasiones el *L<sub>s</sub>* se aproxima al diámetro del tubo de escape y las curvas de *L<sub>s</sub>* que no estén definidas se pueden extrapolar.

En la Figura 4.17 se representan de manera gráfica las ecuaciones de: i) valores de K vs N<sub>m</sub> en las curvas de color azul y definidas en función de los LTOE (o L<sub>m</sub>) de los opacímetros que existen en el Valle de Aburrá; ii) valores de K vs N<sub>s</sub> en curvas de color verde y definidas en función de la LTOE estándar L<sub>s</sub>. Los límites actuales a nivel nacional se exigen bajo el criterio de N<sub>s</sub>.

Se puede emplear el concepto de N<sub>s</sub> para relacionar las mediciones de porcentaje de opacidad medido N<sub>m</sub>, que se evalúan en opacímetros con diferente LTOE o L<sub>m</sub>. En tal caso, las mediciones corresponden a un mismo valor de coeficiente de absorción de luz, K. Por ejemplo, en la Figura 4.17, un valor de opacidad medida de 60% en un opacímetro con LTOE de 430 mm es equivalente a una opacidad medida de aproximadamente 37% en un opacímetro con LTOE de 215 mm, y se pueden normalizar ambos valores aproximadamente a un valor de opacidad estándar, N<sub>s</sub> de 24% con un mismo valor de LTOE estándar L<sub>s</sub> de 127 mm.

Los límites de opacidad actuales de vehículos diésel definidos en la Resolución 910 de 2008 (Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible) están definidos en términos del porcentaje de opacidad estándar N<sub>s</sub>, calculado a partir de la opacidad medida N<sub>m</sub>, del L<sub>m</sub> (LTOE del opacímetro) y del L<sub>s</sub> (tomado como el diámetro del tubo de escape del vehículo). La ejecución de este proyecto permitió identificar que este procedimiento es inapropiado para el control efectivo del estado de mantenimiento. Vehículos con niveles de N<sub>m</sub> significativamente altos, pueden pasar la prueba de opacidad.

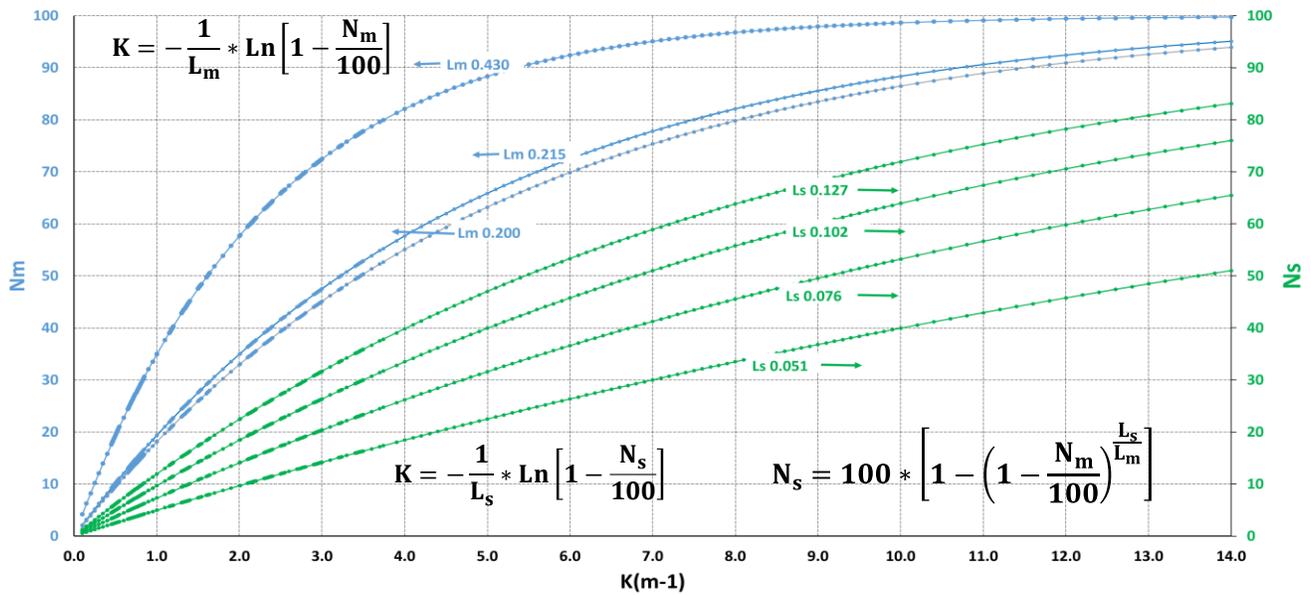


Figura 4.17. Relaciones derivadas de la ley de Beer Lambert sobre la opacidad de vehículos diesel

A modo de ejemplo, si se mira en la Figura 4.17 un límite de opacidad estándar  $N_s$  de 50%, exigido para vehículos año-modelo 1970 y anteriores, en un vehículo con diámetro de tubo de escape de 50 mm, le corresponderá un porcentaje de opacidad medido  $N_m$  cercano al 100 % con un opacímetro de 430 mm y un valor de densidad de humo ( $K$ ) de  $13,5 \text{ m}^{-1}$ , valor que se encuentra lejos de los exigidos por otros países. En México, por ejemplo, el valor máximo permitido de  $K$  es de  $2.25 \text{ m}^{-1}$ , mientras que en Brasil es de  $2.8 \text{ m}^{-1}$ , ambos para opacímetros que tienen LTOE de 430 mm.

Otra falencia de la Resolución en la exigencia de la opacidad de humo estándar, radica en que a igualdad de valores de opacidad medida  $N_m$  con un mismo opacímetro a dos vehículos que tengan diámetros de tubo de escape diferentes, los valores de opacidad estándar  $N_s$  serán diferentes.

La elevada opacidad de humo está ocasionada por deficiencias en la combustión de la mezcla aire y combustible en el motor. Cualquier factor que altere la dosificación correcta de uno de estos dos flujos podría identificarse como el causante de esta situación anómala. Las causas más comunes de opacidades de humo inaceptables pueden ser:

- Falencias mecánicas como excesivo desgaste de las camisas del bloque del motor permitiendo fugas de aceite lubricante a la cámara de combustión
- problemas en el turbocompresor (suministro de aire)
- Defectos en los inyectores o en la bomba de suministro de combustible en el motor
- Calibración inadecuada de la unidad de control electrónica del motor por parte del fabricante
- Alteraciones de cualquiera de los sistemas anteriores por parte del propietario o conductor
- Uso de aditivos, combustibles o dispositivos para los que el motor no fue diseñado sin recomendación previa del fabricante del motor.

Cabe esperar que un vehículo con problemas por opacidad de humo conlleve la emisión de elevadas concentraciones de  $\text{PM}_{2.5}$  a la atmósfera. Por esta razón, en este trabajo se propuso realizar mediciones en serie con ambos sistemas de medición: opacidad de humo con equipos y técnicos certificados por el IDEAM en la prueba

de aceleración libre que exige la Resolución 910 de 2008, y concentración de PM2.5 con un equipo de difusión por descarga iónica en una corona y lectura de carga activa de partículas a través de un electrómetro.

Las pruebas se realizaron en vías, en conjunto con el equipo técnico de la autoridad ambiental, en patios de empresas de carga, en patios de empresas de transporte público y en la Universidad de Antioquia (Ver Figura 4.18). En la Figura 4.19 se presentan los resultados de la prueba mencionada sobre una muestra de 132 vehículos diésel evaluados. Para tener mayor confiabilidad en los resultados de la campaña experimental se utilizaron tres opacímetros diferentes. Los valores reportados para ambas variables corresponden al promedio de los tres picos máximos de opacidad, tal como lo exige la Resolución 910/2008.



Figura 4.18. Pruebas para establecer la relación entre opacidad de humo y concentración de PM2.5

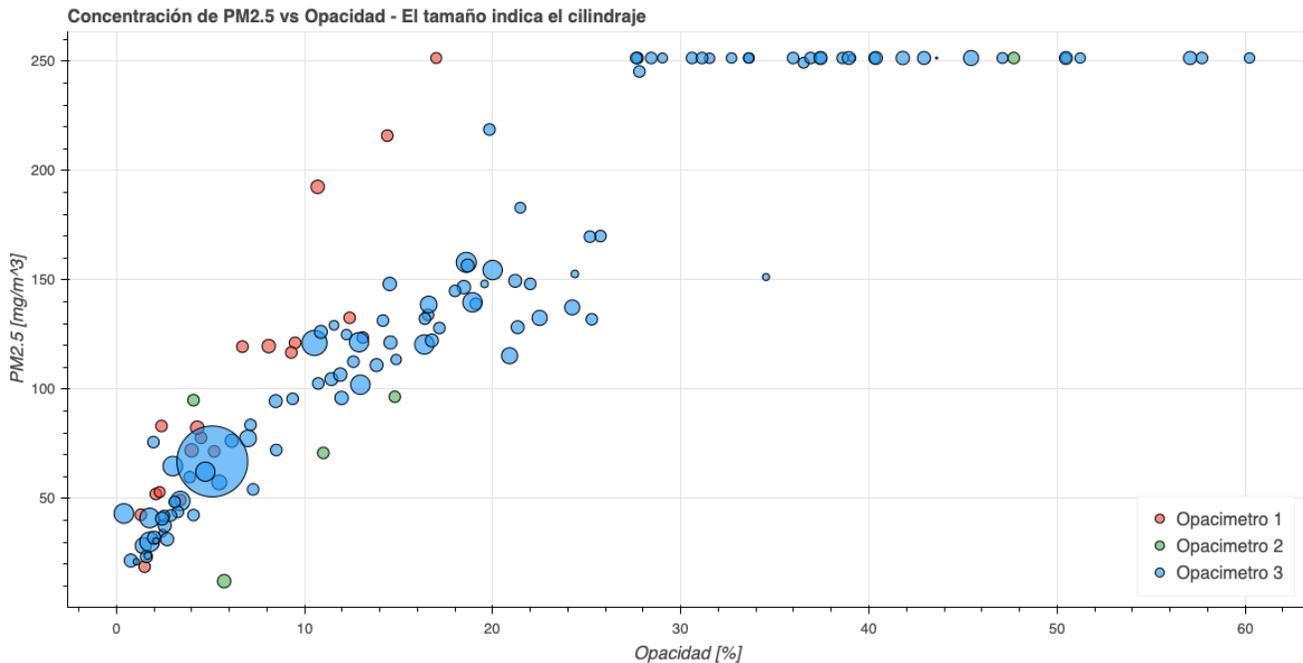


Figura 4.19. Resultados de campaña experimental sobre 132 vehículos diésel comparando opacidad de humo (%) vs concentración de PM2.5 ( $\text{mg}/\text{m}^3$ )

De esta campaña experimental se concluyó que no era posible establecer una relación confiable entre la opacidad de humo y la emisión de PM2.5. Para un valor único de opacidad de humo se encontraron varios valores de

concentración de PM2.5, y viceversa, con lo cual no es posible establecer una función que relaciones los dos parámetros que permitiera determinar un umbral apropiado de opacidad de humo en términos del PM2.5. Resultados similares se encontraron reportados en la literatura técnica (Brodrick, Sperling, & Weaver, 2000; Gautam, Byrd, Carder, Banks, & Lyons, 2000; Hessami & Child, 2004). Las principales razones por las que se presentan estas diferencias han sido discutidas en la literatura (Goede & V, 2015; Mike Jones, 2002):

1. La luz del sensor de los opacímetros presenta interferencia con la emisión del dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), es cual es un gas generado comúnmente en los motores diésel, y en mayor concentración cuando los motores vienen dotados con catalizador de oxidación diésel (DOC).
2. La resolución (exactitud) de los opacímetros actuales no es adecuada para motores con tecnología EURO 4/IV o superiores
3. Los opacímetros no son sensibles a material particulado menor a 250 nm

#### 4.4. ELEMENTOS PARA UNA PROPUESTA DE MODIFICACIÓN DE LA PRUEBA DE INSPECCIÓN TÉCNICA PERIÓDICA DE VEHÍCULOS DIÉSEL

Los impedimentos para establecer un límite apropiado de opacidad de humo que dieran cuenta del impacto sobre la concentración de PM2.5 en la atmósfera, llevaron a que se realizara una búsqueda en la literatura de alternativas para cambiar la prueba de inspección técnica periódica de vehículos diésel. Se encontraron dos reportes del instituto de investigaciones de Holanda (TNO), en los que encontraron una relación adecuada entre el factor de emisión de número de partículas por cada kilómetro (#/km) determinado en banco de rodillos dinamométrico para vehículos livianos, y la concentración del número de partículas durante un ralenti caliente de 60 segundos para vehículos EURO 5 o superiores dotados con filtro de partículas diésel (Kadijk, Elstgeest, Ligterink, & van der Mark, 2016, 2017). En la Figura 4.20 se presenta la correlación del factor de emisión de número de partículas por cada kilómetro (#/km) en función de la concentración del número de partículas en las condiciones de ralenti caliente por 60 segundos para la base de datos de vehículos medida.

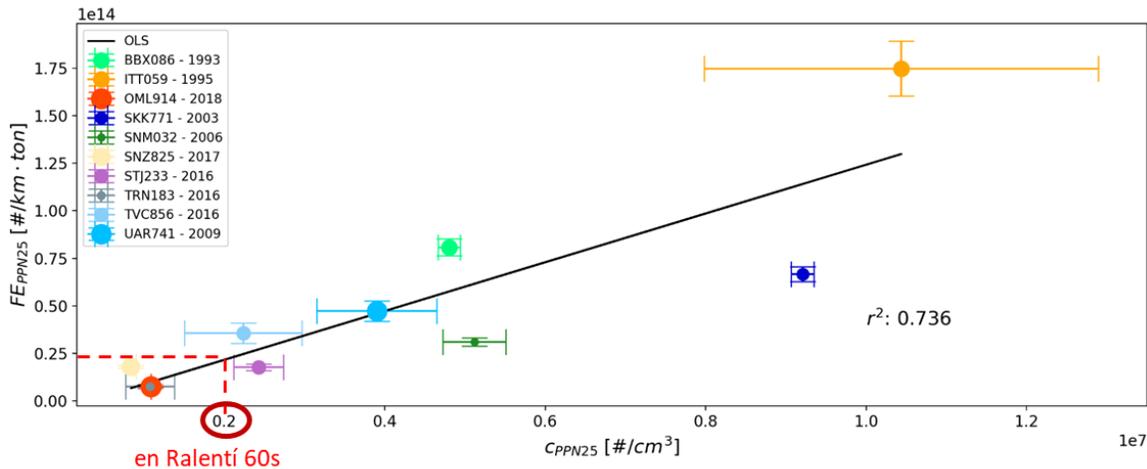


Figura 4.20. Factor de emisión para el número de partículas en función de la concentración del número de partículas al ralenti caliente de 60 segundos.

A diferencia del trabajo adelantado por el instituto TNO de Holanda, que fue sobre vehículos livianos con tecnología de control de emisiones que incorporaban filtros de partículas diésel (DPF), los vehículos sobre los que se realizaron las mediciones en este trabajo, representativos del parque automotor del Valle de Aburrá, eran de tecnologías EURO IV e inferiores, y ninguno estaba dotado con DPF. Por esta razón, además de relacionar los datos

con el número de partículas, se decidió hacerlo con la concentración en masa de PM2.5 como se muestra en la Figura 4.21.

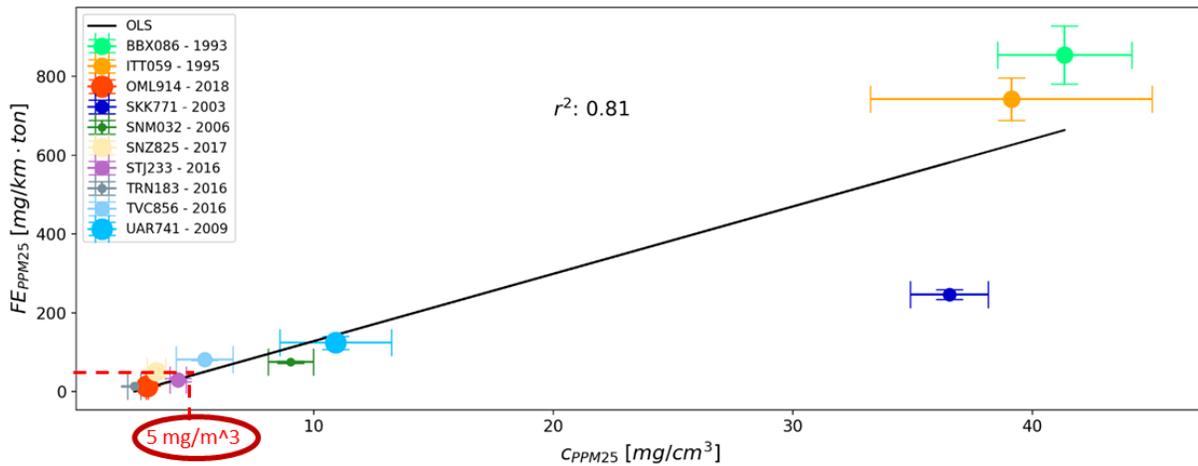


Figura 4.21. Factor de emisión para la masa de material particulado PM2.5 en función de la concentración del número de partículas al ralentí caliente de 60 segundos.

Tomando de estas dos figuras los vehículos que menos contaminan, se pueden determinar dos límites máximos que en principio pudieran brindar más información que la opacidad de humo, de cara a la contaminación del aire por partículas:

1. 2.000.000 #/cm<sup>3</sup>
2. 5 mg/m<sup>3</sup>

Con estos dos umbrales se realizó una campaña voluntaria para implementar distintivos ambientales a todos los vehículos de aquellas empresas firmantes del Pacto por la Calidad del Aire en el Valle de Aburrá que se quisieran someter a la prueba. Se midieron 1547 vehículos entre agosto y octubre de 2019 arrojando los resultados que se presentan en las Figura 4.22.

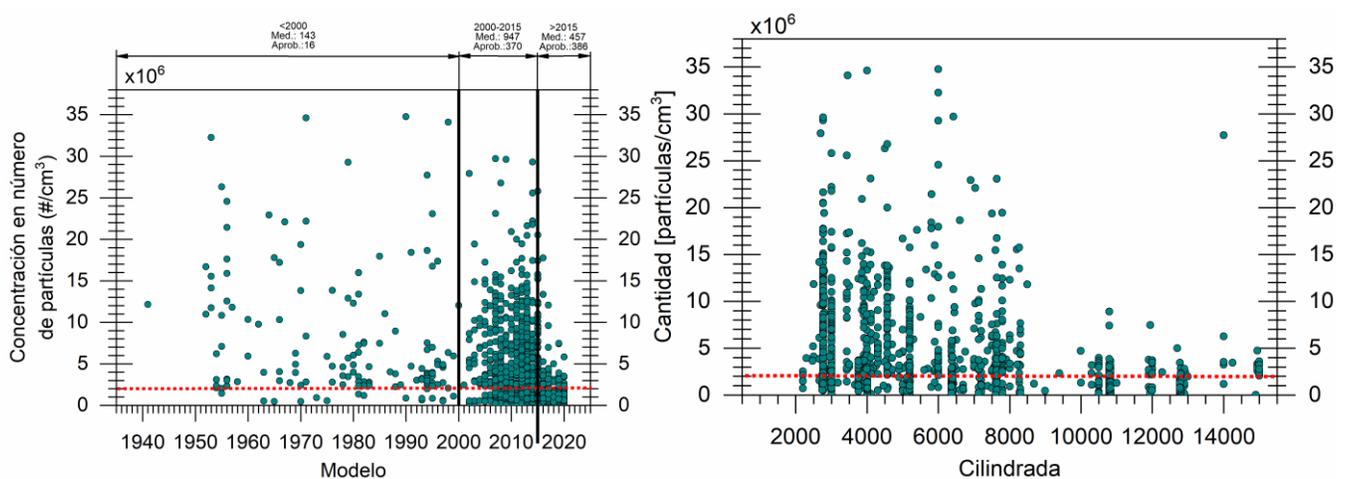


Figura 4.22. Resultados de la campaña voluntaria de medición de concentración del número de partículas (#/cm<sup>3</sup>) en condiciones de motor en ralentí caliente por 60 s. Muestra = 1547 vehículos

En la Tabla 4.7 se resumen los principales hallazgos de este piloto voluntario de distintivos ambientales. Llama particularmente la atención los vehículos nuevos (modelos 2019 y 2020), de los cuales el 14% fueron rechazados. Esto se debe a que los fabricantes de esos vehículos tienen dificultades en la puesta a punto de la calibración de la unidad electrónica.

Tabla 4.7. Resultados de la campaña experimental para implementación de distintivos ambientales

Medidos modelo < 2000	
Total	143 (9% del total)
Aprobaron	16 (11%)
Rechazados	127 (89%)
Medidos modelo 2001 - 2015	
Total	947 (61% del total)
Aprobaron	370 (39%)
Rechazados	577 (61%)
Medidos modelo 2016 – 2020	
Total	457 (30% del total)
Aprobaron	386 (84%)
Rechazados	71 (16%)
Medidos modelo 2019 - 2020	
Total	167 (11% del total)
Aprobados	144 (86%)
Rechazados	23 (14%)

Los resultados de esta prueba permiten concluir que el número de partículas es un indicador confiable del estado mecánico del motor, a pesar de que no es fácil aún establecer cuál podría ser la falla que presentan los vehículos rechazados. Para llegar a proponer modificaciones en la Resolución 910 de 2008 se requiere definir correctamente la metodología de la prueba y realizar un histórico de mediciones más contundente, pero el camino queda señalado.

#### 4.5. CONCLUSIONES

Este trabajo se había enfocado a la medición de factores de emisión localmente en el Valle de Aburrá sobre los vehículos livianos, pesados (de transporte de pasajeros y de carga), y de motocicletas, no obstante, la dinámica propia del proyecto, unido al interés compartido de sus ejecutores, dio lugar a la ampliación de su alcance, buscando adicionalmente relacionar la contaminación por material particulado PM2.5 con la opacidad de humo de la prueba de inspección técnica periódica de vehículos. A partir de los resultados obtenidos, se concluye:

1. La región metropolitana del Valle de Aburrá cuenta con ciclos de conducción propios de cada categoría de vehículos
2. Los factores de emisión de contaminantes gaseosos (CO, CO<sub>2</sub>, THC y NO<sub>x</sub>) utilizados en el inventario de emisiones del AMVA (año base 2017) están dentro del rango de los medidos localmente, sin embargo es conveniente utilizar los últimos, en tanto que reflejan más fielmente las condiciones propias, así como la tecnología vehicular representativa de la región.
3. Los factores de emisión de material particulado PM2.5 estaba siendo subestimado por varios órdenes de magnitud en el inventario de emisiones del AMVA (año base 2017).
4. Se realizaron modificaciones sustanciales al modelo establecido de Análisis Modal de Emisiones propuesto por la Agencia de Protección del Medio ambiente (EPA) de los Estados Unidos, permitiendo realizar predicciones confiables de factores de emisión en diferentes corredores urbanos de la región del Valle de Aburrá.
5. Se comprobó la utilidad de utilizar un nuevo contaminante criterio (número de partículas), el cual tiene más eficacia que la masa de partículas PM2.5, ya que las partículas más pequeñas se producen en mucha cantidad, pero pesan significativamente poco.
6. Los patrones de movilidad afectan significativamente la carga de contaminantes que va a la atmósfera. El análisis modal de emisiones permitió valorar que en la zona urbana de aire protegido del centro de Medellín, los factores de emisión pueden llegar a triplicarse respecto a los valores medios del Valle de Aburrá
7. Se propuso una metodología alterna a la establecida en la Resolución 910 de 2008 para detectar el mal estado de mantenimiento de los vehículos diésel. Esta metodología se basa en dos límites máximos de concentración del número y la masa de partículas, los cuales deben ser menores a 2.000.000 #/cm<sup>3</sup> y 5 mg/m<sup>3</sup>.

#### REFERENCIAS

- AMVA. (2018). *Inventario de emisiones atmosféricas del Valle de Aburrá, actualización 2017. Convenio de Asociación N°CA 583 de 2017*. Retrieved from [http://www.metropol.gov.co/CalidadAire/isdocConvenio243/Informe\\_Inventario\\_emisiones\\_2015.pdf](http://www.metropol.gov.co/CalidadAire/isdocConvenio243/Informe_Inventario_emisiones_2015.pdf)
- Brodrick, C.-J., Sperling, D., & Weaver, C. (2000). Multiple Smoke Opacity Measurements as Indicators of Particulate Emissions for Heavy-Duty Diesel Vehicle Inspection and Maintenance Programs. In *Univeristy of California, Berkeley* (Vol. 15). <https://doi.org/10.11436/mssj.15.250>
- Durbin, T. D., Johnson, K., Miller, J. W., Maldonado, H., & Chernich, D. (2008). Emissions from heavy-duty vehicles under actual on-road driving conditions. *Atmospheric Environment*, 42(20), 4812–4821. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.02.006>
- Fontaras, G., Martini, G., Manfredi, U., Marotta, A., Krasenbrink, A., Maffioletti, F., ... Colombo, M. (2012). Assessment of on-road emissions of four Euro V diesel and CNG waste collection trucks for supporting air-quality improvement initiatives in the city of Milan. *Science of the Total Environment*, 426, 65–72. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.03.038>
- Gautam, M., Byrd, R. L., Carder, D. K., Banks, P. D., & Lyons, D. W. (2000). Particulate matter emissions and smoke opacity from in-use heavy-duty vehicles. *Journal of Environmental Science and Health - Part A*

- Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 35(4), 557–573.  
<https://doi.org/10.1080/10934520009376986>
- Goede, M. P. De, & V, T. E. N. B. (2015). *Emission measurements on diesel vehicles with Diesel Particulate Filters, carried out with a second generation smoke meter*.
- Hessami, M. A., & Child, C. (2004). Statistical analysis of diesel vehicle exhaust emission: Development of empirical equations to calculate particulate emission. *SAE Technical Papers*, 2004(724). <https://doi.org/10.4271/2004-01-3066>
- Huang, C., Lou, D., Hu, Z., Feng, Q., Chen, Y., Chen, C., ... Yao, D. (2013). A PEMS study of the emissions of gaseous pollutants and ultrafine particles from gasoline- and diesel-fueled vehicles. *Atmospheric Environment*, 77, 703–710. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.05.059>
- Huo, H., Yao, Z., Zhang, Y., Shen, X., Zhang, Q., & He, K. (2012). On-board measurements of emissions from diesel trucks in five cities in China. *Atmospheric Environment*, 54, 159–167. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.01.068>
- ICONTEC NTC-4231-. NTC 4231. , (2012).
- ISO 8178-10. (2002). *Reciprocating internal combustion engines — Exhaust emission measurement — (Vol. 3)*. Vol. 3.
- ISO 11614. (1999). *Reciprocating internal combustion compression-ignition engines — Apparatus for measurement of the opacity and for determination of the light absorption coefficient of exhaust gas*.
- Kadijk, G., Elstgeest, M., Ligterink, N., & van der Mark, P. J. (2016). *Investigation into a Periodic Technical Inspection (PTI) test method to check for presence and proper functioning of Diesel Particulate Filters in light-duty diesel vehicles - part 2*. Delft.
- Kadijk, G., Elstgeest, M., Ligterink, N., & van der Mark, P. J. (2017). *Investigation into a Periodic Technical Inspection (PTI) test method to check for presence and proper functioning of Diesel Particulate Filters in light-duty diesel vehicles - part 2*. La Haya.
- López, J. M., Flores, N., Lumbreras, J., & Villimar, R. (2011). Comparison of the emission factors measured in real world driving with those of COPERT 4. *WIT Transactions of the Built Environment*, 116, 655–664. <https://doi.org/10.2495/UT110551>
- Mike Jones. (2002). Do opacimeters have a role in future diesel exhaust gas legislation? *6th ETH Conference on Nanoparticles Measurement*, 2–6. Zurich.
- Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2008). *Resolución 910*.
- SAE J 1667. (1996). *J 1667 Recommended Practice Snap Acceleration Smoke Test Procedure for Heavy-Duty Powered Vehicles*.
- Shen, X., Shi, J., Cao, X., Zhang, X., Zhang, W., Wu, H., & Yao, Z. (2018). Real-world exhaust emissions and fuel consumption for diesel vehicles fueled by waste cooking oil biodiesel blends. *Atmospheric Environment*, 191(August), 249–257. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.08.004>
- Wu, X., Zhang, S., Wu, Y., Li, Z., Zhou, Y., Fu, L., & Hao, J. (2015). Real-world emissions and fuel consumption of diesel buses and trucks in Macao: From on-road measurement to policy implications. *Atmospheric Environment*, 120, 393–403. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.09.015>
- Yang, L. (2018). Real-World Emissions in China: a Meta-Study of Pems Emissions Data From China 0 To China 5/V Light-and Heavy-Duty Vehicles. *The International Council on Clean Transportation*, (February). Retrieved from [www.theicct.org](http://www.theicct.org)

## RECOMENDACIONES

La contaminación atmosférica representa uno de los mayores desafíos que deben enfrentar actualmente los grandes centros urbanos para garantizar calidad de aire respirable en un marco de desarrollo sostenible desde el punto de vista de la salud, los recursos naturales y energéticos, el bienestar social y económico de sus habitantes.

El Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA), autoridad ambiental de carácter regional, como entidad local encargada de prevenir y controlar los factores de deterioro del medioambiente en todas sus dimensiones, y en particular la calidad del aire, ha visto abocada a tomar decisiones en algunos casos drásticas, pero acertadas, como la detención del tráfico urbano durante varios días (febrero-marzo de 2016), por los episodios críticos de concentración de PM2.5 registrado por las estaciones de monitoreo de calidad de aire operadas por el sistema de alerta temprana de Medellín y el Valle de Aburrá (SIATA).

Con la adopción de su Plan Integral de Gestión de Calidad del Aire (PIGECA), el AMVA se ha trazado el camino para cumplir al año 2030 los estándares de concentración de PM2.5 y de ozono en el aire, propuestos por la guía de calidad del aire de la Organización Mundial de la Salud. La tarea inicial fue bien concebida, y los logros, todos positivos a la fecha, se han hecho evidentes para la comunidad que habita esta región, gracias a una mirada sistémica que ha hecho posible un diálogo sinérgico entre el estado, el sector empresarial y la academia, que ha tenido como guía el bienestar de sus habitantes.

Varios de los elementos de política ambiental están soportados en el PIGECA, el cual tiene dentro de sus líneas de acción la actualización periódica del inventario de emisiones de la región, cuya información de carga de contaminantes a la atmósfera se obtiene necesariamente a partir de los Factores de Emisión, cuantificados para el caso de fuentes móviles, como la masa de un contaminante criterio emitido por el vehículo por cada kilómetro recorrido. La importancia de tener actualizado el inventario de emisiones para cualquier región geográfica del planeta radica en contar con los indicadores energéticos y de contaminación para que quienes hacen la política pública tomen las decisiones acertadas. Pero actualizar periódicamente el inventario de emisiones conlleva la actualización permanente de los factores de emisión.

La industria automotriz se caracteriza por su vertiginosa evolución tecnológica, las ciudades están en continuo cambio que conllevan actualizaciones en sus formas de movilidad, las obras de infraestructura viales están vigentes en las agendas públicas; todos estos elementos, unidos a nuevos actores desde el campo de oferta de energéticos para el sector transporte, hacen que los factores de emisión tengan que estar siendo actualizados periódicamente. Ya la región metropolitana cuenta con su línea base, con personal capacitado para fin, y con equipos sofisticados para realizar esta tarea, que debería estar en la agenda de la autoridad ambiental.

Las nuevas ofertas de transporte en las ciudades se enfocadas en la electricidad, en la sustitución total o parcial de los combustibles de origen petroquímico por biocombustibles, y otros energéticos como el gas natural, reclaman de una evaluación minuciosa sobre su impacto desde la dimensión energética, ambiental, económica y social. Desde el punto de vista ambiental, los factores de emisión son instrumentos de comparación esenciales para todas estas nuevas alternativas. Con estos actores en la cadena energética, se crea la necesidad de evaluar el impacto que pueden tener otro tipo de emisiones contaminantes no reguladas a la fecha, pero de las que se tienen evidencias de su toxicidad y mutagenicidad.

Se plantea el reto de que el AMVA amplíe su inventario de emisiones a compuestos tóxicos no regulados derivados de la combustión de las fuentes móviles. En el Valle de Aburrá se han consolidado políticas de gestión de calidad del aire que han contribuido a la reducción de la contaminación atmosférica en los últimos años y han brindado herramientas de prevención de episodios críticos. Sin embargo, la legislación y los estándares nacionales actuales para contaminantes criterio consideran límites máximos más laxos que los recomendados por entes internacionales como la Organización Mundial de la Salud, y otros contaminantes de potencial impacto en la salud no son monitoreados y/o regulados. Adicionalmente, los límites máximos de emisiones para fuentes móviles (reconocidas como las mayores contribuyentes al deterioro de la calidad del aire) sólo están establecidos para monóxido de carbono (CO), hidrocarburos totales (THC), óxidos de nitrógeno (NOx) y masa de material particulado (PM), pero la realidad es aún más demandante, la ciudadanía está expuesta a un problema de contaminación más extenso y complejo de lo previsto.

De acuerdo con los lineamientos para la formulación de políticas y estrategias intersectoriales para la prevención y el control de la contaminación del aire en las ciudades contemplados en el CONPES 3943 de 2018, es evidente la necesidad de ampliar la cobertura, calidad y disponibilidad de la información sobre las emisiones, el estado de la calidad del aire y sus efectos en la salud y el ambiente, y de fortalecer las autoridades ambientales para la formulación e implementación de planes de prevención, reducción y control de la contaminación del aire. El PIGECA manifiesta explícitamente la pertinencia de una visión integral de las sustancias emitidas a la atmósfera, que incluya contaminantes hasta ahora poco considerados en la región y en el país, como los compuestos tóxicos no regulados (CTNR). Quedó consagrado en este documento de gestión pública en materia ambiental la necesidad de realizar la evaluación del escenario actual, las tendencias de emisiones atmosféricas, la identificación de prioridades de atención, el impacto de medidas de mitigación y control, y establecer vínculos entre políticas de gestión de calidad del aire y políticas públicas en salud que sean efectivas en la reducción y prevención de los efectos negativos.

En resumen, las principales recomendaciones son:

- 1) Ampliar la base de datos a un mayor número de vehículos por cada categoría y modelo en la determinación de los factores de emisión.
- 2) Actualizar periódicamente los ciclos de conducción del AMVA, y emplearlos no sólo para fines de evaluación de factores de emisión, sino como instrumentos para selección de tecnologías y sistemas de transporte acertados.
- 3) Actualizar periódicamente los factores de emisión de contaminantes regulados en el AMVA
- 4) Incluir nuevos factores de emisión de sustancias tóxicas peligrosas no reguladas que son emitidas al ambiente por las fuentes móviles
- 5) Desarrollar el procedimiento detallado de la metodología del número de partículas como instrumento para realizar la inspección técnica periódica realizada en los CDA a los vehículos usados.
- 6) Revisar la pertinencia de las inspecciones técnicas periódicas exigidas por la Resolución 910 de 2008 a los vehículos usados, a partir de la evaluación de la calidad del aire en la región.

# GLOSARIO

## Factor de emisión

Es un índice que relaciona la emisión másica de un contaminante determinado con la actividad específica que lo genera. Normalmente cuando se trata de fuentes fijas se suele expresar en masa emitida de un contaminante por unidad de energía o por kg de combustible consumido en el proceso (g/MJ o g/kg). Cuando se trata de fuentes móviles, se suele expresar en unidades de masa por unidad de distancia recorrida (g/km), o en algunos casos también se expresa en masa por unidad de energía generada en el eje del motor (g/kWh).

## Inventario de emisiones

Es un instrumento que permite conocer la carga de emisiones contaminantes emitidas a la atmósfera de una región o país específico por unidad de tiempo. Existen diferentes aproximaciones para calcular dicha masa, para lo que se requiere normalmente de los factores de emisión. En el caso de las fuentes móviles, también necesita una caracterización detallada de la flota de vehículos de la región de interés, así como de la distancia anual recorrida. Normalmente el producto de estos tres parámetros se compara, y debería ser igual, al obtenido a partir del consumo de combustible.

## Ciclo de conducción

Es un perfil de velocidad vs tiempo, que tiene una duración específica, normalmente no mayor a 2100 segundos, y en el que se recoge información de la forma como se conduce (hábitos), así como de parámetros como el estado de la malla vial, topografía, condiciones climatológicas, y otros, asociadas a la conducción propia de una región en particular. Se constituye en una herramienta potente para evaluar comparativamente diversas tecnologías de dispositivos que tengan cualquier efecto sobre el desempeño y las emisiones de los vehículos, tipos de combustible, y demás parámetros que se sospechen puedan afectar a las emisiones contaminantes. Normalmente se determinan para ser reproducidos en bancos de ensayos, aunque también se pueden desarrollar en condiciones de conducción real.

Existen dos aproximaciones estadísticas típicas para sintetizar los ciclos de conducción, la estocástica, normalmente desarrollada a partir de micro-viajes, analizando desviaciones de parámetros característicos respecto a un valor promedio, o la determinística.

## **Protocolo de conducción**

Es un ciclo de conducción adaptado a condiciones particulares de una ruta de ensayos

## **Análisis modal de emisiones (AME)**

Es una metodología usada para estimar o predecir las emisiones contaminantes en unas condiciones de conducción específicas, a partir de mediciones realizadas en condiciones diferentes a las que se quiere predecir. El AME fue implementado hace más de una década por la agencia de protección ambiental de Estados Unidos de América (EPA – Environmental Protection Agency), y ha sido usado con modificaciones que permiten mejores predicciones, como es el caso del modelo IVE, donde se adicionó el parámetro denominado estrés del motor, o como el desarrollado en este trabajo, denominado estrés modificado.

## **Potencia específica vehicular (VSP)**

Es la potencia necesaria para vencer las resistencias al movimiento del vehículo por unidad de masa. Normalmente estas potencias están son: cinética (asociada a cambios en la velocidad), potencial (asociadas a cambio de pendiente de la vía), de rozamiento (para vencer la fricción con la carretera) y la resistencia aerodinámica, ampliamente afectada por el área frontal y la velocidad del vehículo.

## **Estrés del motor**

El estrés del motor es una forma de cuantificar el grado de exigencia al cual está siendo sometido el motor para suplir la demanda instantánea de potencia del vehículo. Este parámetro lo introdujo el IVE para usarlo como segundo descriptor, además de la VSP, con lo cual se mejora el poder de estimación del AME. En su definición se tiene en cuenta la VSP en el instante de interés, así como su valor promedio en una ventana temporal de 15 o 20 segundos (ver explicación detallada en el apartado 4.3 del Capítulo 1). De este modo considera la historia inmediatamente anterior, la cual tiene influencia significativa en las emisiones instantáneas de contaminantes. Por este motivo es que el ES logra mejorar la representación de los modos de operación.

## **Incertidumbre experimental**

Es la suma de los errores totales asociados a la medición de un parámetro determinado. Estos errores suelen dividirse en los correspondientes a la desviación estándar representativa del número de repeticiones (repetibilidad de un ensayo), y al error sistemático inherente a los equipos de medición (linealidad, vibraciones, método de detección, etc.).

## **Vehículo pesado**

- Vehículo automotor con al menos cuatro ruedas, diseñado y construido para el transporte de pasajeros (dividido en tres categorías: M1, M2 y M3) o para transporte de carga (dividido en tres categorías: N1, N2 y N3).
- Vehículo pesado de pasajeros M1: para transportar hasta 8 pasajeros más el conductor
- Vehículo pesado de pasajeros M2: para transportar más de 8 pasajeros más el conductor y cuyo peso bruto vehicular no supere las 5 toneladas (Microbuses y busetas).

- Vehículo pesado de pasajeros M3: para transportar más de 8 pasajeros más el conductor y cuyo peso bruto vehicular supera las 5 toneladas (buses).
- Vehículo pesado de carga N1: vehículo con peso bruto vehicular no superior a 3.5 toneladas (Categoría C2 pequeño).
- Vehículo pesado de carga N2: con peso bruto vehicular superior a 3.5 toneladas y que no exceda 12 toneladas (Categoría C2 grande).
- Vehículo pesado de carga N3: con peso bruto vehicular superior a 12 toneladas.

## ULSD

Combustible diésel de ultra-bajo contenido de azufre (menor a 15 ppm en peso).

## Emisiones contaminantes gaseosas reguladas

son óxidos de nitrógeno – NO<sub>x</sub> (NO + NO<sub>2</sub>); hidrocarburos totales – THC (quemados parcialmente + provenientes de combustión incompleta), monóxido de carbono – CO y dióxido de carbono CO<sub>2</sub>. Los VOC (compuestos orgánicos volátiles) no están reguladas, y son calculados normalmente en los modelos de factores de emisión como el IVE a partir de la composición del combustible y de las emisiones de THC. No todos los hidrocarburos emitidos por los motores son VOC, como tampoco se puede afirmar que todos los VOC tengan hidrocarburos en su composición.

## Material particulado (PM)

es el producto de la combustión incompleta de hidrocarburos y es considerado uno de los contaminantes que afectan en mayor proporción tanto la salud humana como al medioambiente. El PM es una mezcla compleja de material sólido y condensado que puede ser emitida tanto por motores de encendido provocado (gasolina), como de encendido por compresión (diésel). Los principales compuestos presentes en la fase sólida incluyen carbón negro o grafito (*black carbon*), y cenizas de metales, mientras que la fracción condensable que se suele adsorber sobre la fase sólida, está constituida por hidrocarburos de alto punto de ebullición provenientes del combustible y el aceite lubricante, agua y ácido sulfúrico (si el combustible tiene azufre). El carbono negro, también denominado hollín (*soot* en inglés), se suele denominar como carbón elemental (EC o carbón inorgánico equivalente a grafito puro). A la fracción orgánica que se adsorbe en la superficie del carbono negro, se le conoce como carbono orgánico (OC). La fracción orgánica puede ser emitida directamente a la atmósfera como PM (primario) o se puede generar en la atmósfera en la medida que los gases de hidrocarburos se condensan para convertirse en PM (secundario).

De acuerdo con la Mesa del Aire de California (*California Air Resources Board -CARB*), Material Particulado es todo componente de gases de escape de un motor (gasolina o diésel) que se deposite en un filtro después de haber sido diluido con aire ( $4 < \text{grado de dilución} < 50$ ) a una temperatura inferior a 52°C. Esta definición incluye tanto sólidos como líquidos condensados durante el enfriamiento ocasionado por la dilución de los gases con aire. El PM contiene enormes cantidades de hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs) que se cohesionan para formar redes cristalinas (tipo grafito) unidas a carbono orgánico presente en la fase sólida o que quedan en el material orgánico extraíble que forma parte de lo que se denomina fracción orgánica soluble (SOF).

El PM se puede separar en diferentes categorías de acuerdo a su tamaño aerodinámico: i) Partículas grandes (>10 micras), ii) PM<sub>10</sub> (≤ 10 micras), iii) Partículas finas o PM<sub>2.5</sub> (≤ 2.5 micras), iv) Partículas ultra-finas o PM<sub>0.1</sub> (≤ 100 nanómetros); y v) Nanopartículas (< 50nm). El 100% del PM emitido por los motores tanto a gasolina como diésel es de tamaño inferior a 1 micra, mientras que el 95% es menor a 300 nanómetros. Las partículas más pequeñas están presentes en grandes cantidades, pero contribuyen poco a la masa total del PM, por esta razón la norma

medioambiental Euro VI/6 ya no exige emisión específica de PM peso (g/kW-h o g/km), sino en número de partículas. En vista de lo anterior, todo el material particulado emitido por un motor (ciclo Otto o Diésel) será PM2.5.

Cada vez más, el PM es visto como un agente del cambio climático, jugando un papel significativo en la formación de neblina y causando preocupación por su deposición en hielo polar, lo cual se cree que dispara el descongelamiento a través de la absorción de radiación solar. Adicionalmente, el PM es conocido por deteriorar la salud humana, el PM2.5 puede penetrar adentro del pulmón y contribuir a enfermedades severas como cáncer y asma [pope]. Además, la capacidad de estas partículas de participar en reacciones químicas en la atmosfera aumenta con su área superficial específica, la cual es inversamente proporcional a su tamaño.

La formación de partículas se inicia en la cámara de combustión como consecuencia de la ausencia de oxígeno cuando el combustible empieza a quemarse. Dicha falta de oxígeno impide que la combustión se complete, generando así partículas de carbón deshidrogenado, también llamado hollín. Por lo tanto, la formación de las partículas depende en gran medida de lo homogénea que sea la mezcla antes de iniciar la combustión al interior del cilindro. En el caso del motor de encendido provocado o por chispa (MEP), el combustible (normalmente una mezcla de gasolina + etanol actualmente en Colombia) se inyecta durante el proceso de admisión, por lo que el combustible tiene mucho tiempo (sin que por ello deje de ser milisegundos) para mezclarse homogéneamente con el aire. Por el contrario, en el motor de autoencendido (MDA), el combustible (normalmente una mezcla de diésel + biodiesel) se inyecta inmediatamente antes del comienzo de la combustión en el interior del cilindro, por lo que apenas hay tiempo para la homogenización. No obstante, en los motores de gasolina convencionales (inyección multipunto), también hay lugar a formación de partículas (en cantidades mucho menores) debido a la condensación de hidrocarburos y a la presencia de aceite lubricante en la cámara de combustión.

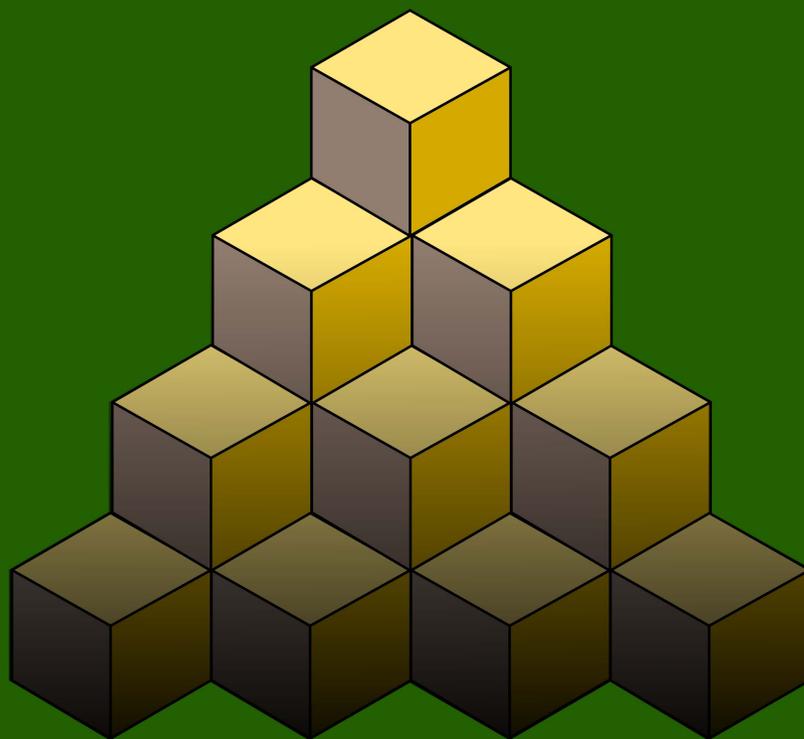
### **PM2.5**

Masa de material particulado de tamaño menor o igual a 2.5 micrómetros. La literatura coincide en reportar que cerca del 99% del material particulado emitido por la combustión en motores, tanto de ciclo Diésel como de ciclo Otto, corresponden a PM2.5. Las partículas de menor tamaño tienen poca masa y suelen concentrarse en tamaños inferiores a 300 nm (ultrafinas), constituyendo una distribución denominada “modo nucleación”, que son las que tienen mayor fracción de deposición en los pulmones.

### **PN2.5**

Número de partículas de tamaño menor o igual a 2.5 micras. Se ha establecido en la última directiva de la Euro 6, parte d, que entró en vigor a partir de septiembre de 2017, exige un máximo de 600,000 millones de partículas por cada kilómetro recorrido por vehículos diésel livianos (menores a 3.5 toneladas de peso bruto vehicular), es decir  $6 \times 10^{11}$  partículas/km.





# Factores de emisión de fuentes móviles en el Valle de Aburrá

---

2016 - 2019

Convenios No. 1096/2016 y 888/2017



**UNIVERSIDAD  
DE ANTIOQUIA**

[www.udea.edu.co](http://www.udea.edu.co)



[www.metropol.gov.co](http://www.metropol.gov.co)