

**ESTIMACIÓN DE LA EMISIÓN ANUAL DE PM₁₀ PROVENIENTE DE LAS
FUENTES MÓVILES EN VÍAS DE ALTO TRÁFICO DE BARRANQUILLA POR
MEDIO DE UN INVENTARIO DE EMISIONES CON EL MODELO IVE**

LAURA GONZÁLEZ



**Universidad de la Costa CUC
Departamento Civil y Ambiental
Programa de Ingeniería Ambiental
Barranquilla
2018**

**ESTIMACIÓN DE LA EMISIÓN ANUAL DE PM₁₀ PROVENIENTE DE LAS
FUENTES MÓVILES EN VÍAS DE ALTO TRÁFICO DE BARRANQUILLA POR
MEDIO DE UN INVENTARIO DE EMISIONES CON EL MODELO IVE**

Para optar al título de Ingeniera Ambiental

TESISTA:

Laura González

Directora de Trabajo de Grado

MSc. Andrea Moreno Ríos

Codirectora de Trabajo de Grado

Ph.D. Dayana Agudelo Castañeda

UNIVERSIDAD DE LA COSTA CUC

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

Programa de Ingeniería Ambiental

Barranquilla

2018

Nota de Aceptación.

Presidente del jurado

Jurado

Jurado

Barranquilla, Octubre de 2018

Dedicatoria

*Al foco de mi adoración y cariño, mi perro **Mateo** ▼ · ✿ · ▼.*

“Your mouth's a constellation

The stars are in your eyes

I'll take a spaceship and try and go and find you”

- T.W.C.P.A.E.B

Laura González

Agradecimientos

*Mi mayor agradecimiento a la **Universidad de la Costa** y a su programa de **Beca Talento**, sin el cual hubiese tenido pocas posibilidades de formarme en la noble carrera de la ingeniería ambiental.*

*A la **Magister Andrea Moreno**, por su amable y paciente labor como directora de este proyecto. Su dirección y retroalimentación constante fueron vitales en el desarrollo de todas las etapas de esta investigación.*

*A la **Doctora Dayana Agudelo** que, sin importar los cambios, se mantuvo firme en su apoyo como codirectora, y cuyo criterio académico fue indispensable para el desarrollo de este trabajo.*

*Al honorable grupo de **ingenieros** en especial a Duván y Stephanie, bálsamo de amistoso cariño y humor durante los altibajos de la academia. Todos me caen mal y los quiero a la vez, éxitos.*

*Al **Doctor Rafael Oyaga**, quien alentó mi interés por las ciencias ambientales y me encaminó de manera asertiva en la ingeniería ambiental.*

Contenido

Resumen	14
Abstract	15
1. Introducción	16
2. Planteamiento del Problema.....	19
3. Justificación.....	21
4. Objetivos	24
4.1.Objetivo General	24
4.2.Objetivos Específicos.....	24
5. Marco Teórico	25
5.1. Inventario de Emisiones	25
5.2. El Modelo IVE	27
5.2.1. Cálculo de Factores de Emisión.....	29
5.3. Tecnologías Vehiculares	30
5.3.1. Motor a gasolina y motores a diésel	30
5.3.2. Sistemas de control Aire/Combustible.....	33
5.3.3. Sistemas de control de emisiones	33
5.4. Patrones de Conducción	36
5.5. Emisiones Atmosféricas	37
5.5.1. Clasificación de los contaminantes atmosféricos	39
5.6. Material Particulado	39
5.6.1. Clasificación por tamaño.	40
5.6.2. Fuentes de emisión de material particulado.....	41
5.6.3. Formación del material particulado en el motor.....	44
5.6.4. Límites de exposición al material particulado.	45

5.6.5. Efectos en la salud humana.....	47
5.6.6. Efectos medio ambientales	49
6. Estado del arte	51
7. Metodología	55
7.1. Definición de las Zonas de Estudio	55
7.1.1. Vía 40.....	55
7.1.2. Avenida Circunvalar.	56
7.2. Manejo de los Aforos Vehiculares	57
7.3. Definición de las Tecnologías Vehiculares	60
7.3.1. Automóviles.....	62
7.3.2. Taxis.....	62
7.3.3. Buses.....	63
7.3.4. Camiones.....	63
7.3.5. Motos.....	63
7.3.6. Factores de actividad vehicular.....	65
7.4. Variables de Conducción.....	67
7.4.1. Patrones de conducción	67
7.4.2. Patrones soak	70
7.4.3. Uso de aire acondicionado.....	70
7.5. Información de Variables Locales y Calidad de los Combustibles.....	71
7.5.1. Variables locales.....	71
7.5.2. Programa de inspección y mantenimiento	71
7.5.3. Calidad de los combustibles	71
7.6. Manejo del Software del Modelo IVE.....	72
8. Resultados y Análisis	76

8.1. Manejo de los Aforos Vehiculares	76
8.2. Definición de las Tecnologías Vehiculares	79
8.2.1. Autos particulares	79
8.2.2. Taxis.....	81
8.2.3. Buses.....	83
8.3. Variables de Conducción.....	87
8.4. Emisión de Material Particulado	90
9. Conclusiones	102
10. Recomendaciones.....	105
11. Bibliografía.....	106
12. Anexos.....	123

Lista de Tablas y Figuras**Tablas**

Tabla 1. Comparación de algunos de los insumos necesarios para los modelos más usados internacionalmente.....	28
Tabla 2. Factores de corrección según la fracción de viaje y tipo de conducción.....	29
Tabla 3. Tecnologías para la mezcla del aire y el combustible en los motores.....	34
Tabla 4. Sistemas de control de emisiones de escape vehiculares.....	35
Tabla 5. Sistemas de control de emisiones evaporativas.....	36
Tabla 6. Límites de exposición de material particulado PM ₁₀ establecidos por diferentes autoridades ambientales y de salud.....	46
Tabla 7. Tecnologías vehiculares por especificar para el Modelo IVE.....	60
Tabla 8. Clases de la base de datos agrupadas.....	62
Tabla 9. Factores de actividad vehicular anuales asignados a las diferentes categorías.....	65
Tabla 10. Clases vehiculares del Modelo IVE con sus correspondientes clases vehiculares del parque automotor y los años que les toma alcanzar los límites de kilometraje.....	66
Tabla 11. Años que le toma a las motocicletas alcanzar los límites de kilometraje.....	66
Tabla 12. Fechas de registro de los patrones de conducción en las diferentes categorías vehiculares.....	68
Tabla 13. Puntos de corte de velocidad y de poder usados en el cálculo del Índice de RPM.....	69
Tabla 14. Límites para asignación de bins según valor de VSP y estrés del motor.....	69
Tabla 15. Distribución del tiempo de que ha pasado antes de encender el vehículo en las diferentes horas del día.....	70
Tabla 16. Variables locales y las fuentes de dónde fueron tomadas.....	71

Tabla 17. La calidad de los combustibles gasolina y diésel en Colombia para el año 2013.	72
Tabla 18. Tecnologías vehiculares definidas para los autos particulares.	80
Tabla 19 Tecnologías vehiculares definidas para los taxis.....	82
Tabla 20 Tecnologías vehiculares definidas para los buses.....	84
Tabla 21. Tecnologías vehiculares definidas para los camiones.	86
Tabla 22. Tecnologías vehiculares definidas para las motocicletas.	87
Tabla 23. Factor de emisión de PM ₁₀ por categoría en cada vía.....	96
Tabla 24. Cambio de factores de emisión en horas pico y horas valle.	97
Tabla 25. Factores de emisión de otros estudios.....	100

Figuras

Figura 1. Proceso de combustión en el motor.	31
Figura 2. Composición del material particulado de tecnologías vehiculares.....	32
Figura 3. Contribución de las fuentes contaminantes al PM ₁₀ total en diferentes regiones del mundo.	43
Figura 4. Dinámica de la Formación del material particulado.....	45
Figura 5. Material particulado depositado en el tejido foliar.....	50
Figura 6. Fotografía de la Vía 40.....	55
Figura 7. Fotografía de la Avenida Circunvalar.	56
Figura 8. Corredor conformado por la Vía 40 y la Avenida Circunvalar rodeando parte de la ciudad de Barranquilla.	57
Figura 9. Muestra de los aforos vehiculares tomados por la Secretaría de Tránsito.	58
Figura 10. Muestra de la base de datos de vehículos matriculados en Barranquilla.	61
Figura 11. Calendario de introducción de tecnologías vehiculares a Colombia.....	64
Figura 12. Pestaña de introducción de la flota en el programa del modelo IVE.	73
Figura 13. Pestaña de introducción de los datos de localidad en el programa del modelo IVE. ..	74

Figura 14. Pestaña de cálculo de las emisiones en el programa del modelo IVE.....	75
Figura 15. Flujo vehicular por hora en la Avenida Circunvalar.	77
Figura 16. Distribución promedio de la flota diaria en la Avenida Circunvalar.....	77
Figura 17. Flujo vehicular por hora Vía 40.....	78
Figura 18. Distribución promedio de la flota diaria en la Vía 40.	78
Figura 19. Distribución de autos particulares por tamaño y uso de combustible.	79
Figura 20. Distribución de taxis por tamaño y uso de combustible.....	81
Figura 21. Distribución de buses por tamaño y uso de combustible.	83
Figura 22. Distribución de camiones por tamaño y uso de combustible.	85
Figura 23. Distribución de motocicletas por tamaño.	86
Figura 24. Distribución de los patrones de conducción en los diferentes bins de potencia para la Av. Circunvalar en horario valle.....	88
Figura 25. Distribución del tiempo de conducción en las categorías de potencia vehicular.	89
Figura 26. Emisión de PM ₁₀ en la Av. Circunvalar durante las horas estudiadas.....	91
Figura 27. Emisión de PM ₁₀ en la Vía 40 durante las horas estudiadas.	91
Figura 28. Distribución de la emisión por categoría vehicular en la Av. Circunvalar y la Vía 40.	92
Figura 29. Distribución de la emisión por categoría vehicular en todo el corredor.....	93
Figura 30. Porcentaje de aporte por tipo de combustible en cada categoría vehicular.	94
Figura 31. Aporte total por tipo de combustible.	95
Figura 32. Cambio en factor de emisión y velocidad en horas pico respecto a horas valle en la Av. Circunvalar.....	98

Figura 33. Cambio en factor de emisión y velocidad en horas pico respecto a horas valle en la

Vía 40..... 98

Lista de Anexos

Anexo 1 Arquitectura del Modelo IVE.....	123
Anexo 2 . Corrección de la base de emisión.....	123
Anexo 3. Cambios en las propiedades físicas del material particulado durante su formación. ..	124
Anexo 4. Porcentajes de camiones según su tamaño, registrados a nivel nacional	124
Anexo 5. Significado de los diferentes bins de potencia.	124
Anexo 6. Significado de los diferentes estados de estrés del motor.	125
Anexo 7. Clasificaciones de bins por potencia específica vehicular y estrés del motor.	125
Anexo 8. Distribución de los autos particulares por edad.	126
Anexo 9. Distribución de los taxis por edad.	126
Anexo 10. Distribución de los buses por edad.....	127
Anexo 11. Distribución de los camiones por edad.	127
Anexo 12. Distribución de las motocicletas por edad.....	128
Anexo 13. Patrones de conducción en la Av. Circunvalar - Hora pico.	128
Anexo 14. Patrones de conducción en la Vía 40 - Hora valle.	129
Anexo 15. Patrones de conducción en la Vía 40 - Hora pico.	129

Resumen

El material particulado PM₁₀, es un contaminante de gran interés pues se tienen indicios sobre su incidencia negativa en la salud humana y el medio ambiente. Uno de los sectores que genera la mayor cantidad de PM₁₀ es el transporte, por eso se han adoptado los inventarios de emisiones de fuentes móviles para establecer la cantidad de PM₁₀ que se genera y la contribución de cada categoría vehicular, y como un instrumento de gran importancia en los procesos de gestión de la calidad del aire en áreas urbanas. Este trabajo tiene como propósito realizar el inventario de emisiones vehiculares en vías de alto tráfico de Barranquilla. La emisión total anual fue estimada en la Avenida Circunvalar y en la Vía 40 para el año base 2013 por medio de la metodología del Modelo IVE, utilizando aforos vehiculares, registros del parque automotor, y características de los patrones de conducción tomados en campo. Así se encontró que, en estas dos vías, anualmente se generarían 165 toneladas de PM₁₀, donde los mayores generadores serían los camiones, buses y motocicletas. Los vehículos que utilizan diésel generarían casi el 90% del contaminante. Por último, se encontró que la generación de PM₁₀ aumenta en las horas de mayor tránsito, no sólo por el aumento de vehículos, sino también por cambios en los patrones de conducción. Finalmente, se concluyó que el modelo IVE puede ser aplicado en la ciudad, además que los patrones de conducción deben ser objeto de estudio detallado en futuras investigaciones sobre emisiones vehiculares.

Palabras clave: *inventario de emisiones vehiculares, material particulado, patrones de conducción, Barranquilla*

Abstract

Particulate matter PM₁₀ is an atmospheric pollutant of great interest due to evidence about its negative impact on environmental and human health. Motorized transportation is one of the sectors that generates the greatest amount of PM₁₀, that's why vehicular emissions inventories have been adopted to establish the total amount of PM₁₀ generated and the contribution of each vehicle category to this, and as a highly valued instrument in air quality management processes in urban areas. The present work has as purpose to carry out a vehicular emissions inventory in high traffic roads of Barranquilla. The total annual emission was estimated in Avenida Circunvarar road and Vía 40 road for the base year 2013 through the methodology of the IVE Model, using vehicle per hour records, reports of the vehicle fleet in the city, and driving patterns data collected on field for each vehicular category. It was found that, in these two roads, 165 tons of PM₁₀ is generated annually, where the largest generators are trucks, buses and motorcycles. About the use of fuels, those that use diesel generate almost 90% of the pollutant. Finally, it was found that the generation of PM₁₀ increases in the hours of mayor traffic, not only due to increase in vehicle number, but also because of changes in driving patterns. Finally, it was concluded that the IVE Model can be applied in the city, as well that the driving patterns should be the object of detailed study in future investigations on vehicular emissions.

Keywords: *vehicular emissions inventory, particulate matter, driving patterns, Barranquilla.*

1. Introducción

En la actualidad, la contaminación atmosférica en los centros urbanos es uno de los temas de preocupación para sus habitantes y para las autoridades de salud pública a nivel mundial (WHO, 2018). Debido a la alta densidad poblacional y a la copiosa actividad económica en las urbes, la generación de contaminantes atmosféricos es muy intensa en un área relativamente reducida, generándose concentraciones elevadas de los contaminantes. Esta situación se vive en muchas de las grandes ciudades del mundo, sobre todo aquellas que muestran gran crecimiento económico (Galeotti, 2003).

Uno de los contaminantes atmosféricos de gran interés en estos inventarios, es el material particulado, debido a los indicios que se tienen sobre su incidencia en la salud humana, que se basan en investigaciones realizadas en diferentes países. Se presume que la exposición a ese tipo de material, tiene diversos efectos en la salud pública (según principalmente, por su composición y tamaño) que van desde aumento de las afecciones respiratorias leves, pasando por el incremento de visitas a servicios de urgencias por problemas respiratorios agudos (Shaughnessy, Venigalla, & Trump, 2015) y de consultas médicas por trastornos auditivos (Han, Lim, Jung, & Hong, 2017), hasta posible disfunción cardíaca asociada a inflamación pulmonar, disminución en el peso de bebés y acumulación de partículas magnéticas en el cerebro (Maher et al., 2016), en la de las plantas por modificaciones en la estructura por disposición del material, afecciones en el intercambio de gases (Rai, 2016), disminución de la radiación solar recibida en las hojas y lesiones por concentración de sustancias químicas (Grantz, Garner, & Johnson, 2003); y en materiales de edificaciones como ropa, cortinas, superficies pintadas, tan sólo depositándose en estos, así como a metales por acción corrosiva (Miller, 2011).

El transporte es una de las actividades que ostenta uno de los mayores aportes de contaminantes a la atmósfera, debido a los gases generados en el proceso de combustión en los motores de los vehículos. Respecto al material particulado, estudios como el de (Karagulian et al., 2015), han demostrado que esta actividad es la mayor participante en las emisiones de material particulado en las regiones de India, América Latina, Europa Occidental y África. Así, el transporte se ha convertido en una de las actividades más estudiadas con el fin de establecer con claridad su contribución a la contaminación atmosférica y consiguientemente establecer medidas para disminuirla.

El material particulado que proveniente de los vehículos automotores, está formado principalmente por hollín y partículas en una fase llamada “de nucleación”, estos se generan por la descomposición térmica de los combustibles y por el enfriamiento de los gases de escape (Harrison, Hester, & Querol, 2016). El material está compuesto por sustancias tanto orgánicas como inorgánicas, específicamente puede poseer amonios, sulfatos, carbono orgánico, carbono elemental y agua en estado líquido, entre otras (Chow & Watson, 1998).

En grandes ciudades del mundo, se han realizado estudios para determinar el grado de contribución de la actividad de transporte a la contaminación (Karagulian et al., 2015) y las ciudades colombianas no han sido la excepción. Inventarios de emisiones de fuentes móviles (y/o fijas) se han realizado en ciudades como Bogotá (Girardo, 2005), Medellín (Toro et al., 2013), Cali (González, 2017), entre otras. Un inventario de emisiones, es una cuantificación de la cantidad de contaminación que se liberan a la atmósfera en un lugar determinado, que puede ir desde pequeñas industrias localizadas en un punto fijo, calles, ciudades, regiones hasta nacionales enteras (EPA, 1999).

El Modelo IVE, o *IVE Model (International Vehicle Emissions Model)*, es un programa diseñado por el Centro Internacional de Investigación en Sistemas Sostenibles (ISSRC por sus siglas en inglés). Este se presenta como una herramienta para la estimación de los gases emitidos por vehículos a motor, basándose en las características y actividad de la flota vehicular, así como de las condiciones climáticas del lugar donde se desarrolla (Nicol Davis & Tolvet, 2008). Una de sus principales características es la utilización del factor de Potencia Específica Vehicular (VSP), que está altamente asociado con las emisiones, pues este factor relaciona la potencia del motor con la unidad de masa, y muestra la demanda de potencia del vehículo durante su operación a través de diferentes condiciones locales y velocidades (Losa & Papagiannakis, 2014). Además, se utilizan características de la localidad donde se realiza el inventario, como sus condiciones de humedad y temperatura, la utilización de aire acondicionado y las características de los combustibles que allí se distribuyen (Nicol Davis & Tolvet, 2008), por lo que el resultado es ajustado con las condiciones específicas del lugar.

Para esto, se hace uso de aforos vehiculares, registros del parque vehicular, información de condiciones climáticas locales y características de los combustibles distribuidos en la ciudad, así como las características de conducción de diferentes clases de vehículos, con el fin de obtener un estimado de las emisiones en la Vía 40 y la Avenida Circunvalar de la ciudad.

La utilidad de un inventario de emisiones radica en su importancia en los procesos de gestión de la calidad del aire, pues estos instrumentos son punto de partida en la toma de decisiones sobre implementación, evaluación y cambios en programas y medidas de control de la contaminación atmosférica (Gaitán & Paula, 2017).

2. Planteamiento del Problema

El material particulado proveniente de los vehículos, según (Khare, 2007), consiste en una mezcla de hollín, hidrocarburos pesados, ceniza y aceite lubricante, este proviene del motor de combustión, pero otras partes de los vehículos, así como su interacción con la carretera, también emiten este contaminante. Harrison, Hester, & Querol (2016) mencionan el desgaste de neumáticos, el desgaste de frenos, el desgaste de la superficie de la carretera y la resuspensión del como otras fuentes de emisión de este.

Las fuentes principales de emisión de material particulado en un lugar determinado dependen en gran medida de las dinámicas sociales en este y los principales tipos de actividades productivas que se desarrollan. A pesar de esto, actualmente se han definido un conjunto de actividades que se presume, aportan la mayor cantidad de material particulado a la atmósfera en diversas partes del mundo, y precisamente una de esas fuentes principales es la actividad de transporte. Según Karagulian et al. (2015), en su estudio sobre las contribuciones de material particulado por tipo de fuente, basado en los diferentes inventarios de emisiones realizados en ciudades del mundo, el tráfico en Latinoamérica, representado por diferentes tipos de vehículos, aporta en promedio, del 34% (en Brasil) al 38% (resto de Latinoamérica) del total de la emisión de material particulado en las ciudades reportadas de la región, a través de emisión directa de PM primario y la emisión de sustancias precursoras del PM secundario, que se forma por la interacción de contaminantes en la atmósfera.

Naturalmente, cuán mayor sea el número de vehículos motorizados circulando en una determinada área, mayor será la problemática de la contaminación por material particulado y la exposición de sus habitantes a este contaminante. Según las cifras del Ministerio de Transporte, sobre los vehículos con motor matriculados en el país, Colombia pasó de tener 1,5 millones de

vehículos en el año 1990 a tener más de 5,5 millones en el 2008 (Mintransporte, 2009b). En el año 2012, BBVA *Research*, en su publicación sobre la situación automotriz en Colombia, indicó que el país poseía un parque automotor de 6,8 millones de unidades y que entre el 2010 y 2020, el parque aumentaría 3,5 millones (Téllez et al., 2013). A la fecha actual, el Registro Único Nacional de Tránsito (RUNT), indica que, en Colombia, están registrados 13,5 millones de unidades (incluyendo maquinaria agrícola e industrial) (RUNT, 2017).

Específicamente, la ciudad de Barranquilla ha pasado de tener un parque automotor de casi 114 mil unidades en el 2010 (ADB, 2015), a tener 176 mil en el año 2017 (SDTSV, 2017), presentando crecimientos porcentuales anuales de casi el 8% (ADB, 2015). Además de esto, en la ciudad existen vías en las que el tráfico vehicular es mucho mayor comparado con las del resto de la ciudad, por lo que concentrarían una emisión significativa de material particulado.

El problema de generación de contaminantes atmosféricos por fuentes móviles en ciudades principales del país se ha evidenciado en diferentes estudios. Como los desarrollados en el Área metropolitana del Valle de Aburrá (Toro et al., 2013), el realizado en Bogotá para la Proyección del Plan Decenal de Descontaminación del Aire para Bogotá 2010-2020 (Behrentz & Sánchez, 2009) apoyados en el Modelo IVE y el realizado la zona de Cali – Yumbo con el modelo Mobile 6.0 (Jaramillo et al., 2004).

Por todo lo anterior se plantea la siguiente pregunta de investigación para este trabajo:

¿Cuál es la emisión anual de material particulado <10 µm en las vías de alto tráfico vehicular en la ciudad de Barranquilla?

3. Justificación

Los posibles problemas a la salud que pueda generar el material particulado atmosférico están definidos según la exposición a este, su composición y tamaño. En general, diversos estudios han sugerido, que la exposición al contaminante, puede aumentar el riesgo de desarrollar enfermedades respiratorias (Shaughnessy et al., 2015), cardíacas (Evelson et al., 2016), de desarrollo en los niños (Kim et al., 2016), e incluso de enfermedades neurológicas (Maher et al., 2016). En un estudio sobre prevalencia de síntomas de asma en 6 ciudades de Colombia realizado en el año 2004, se encontró que en Barranquilla estos síntomas se presentaron en el 8,1% de una muestra de 1015 habitantes (Dennis et al., 2004). Pero para el año 2010, la prevalencia era del 14,5% en una muestra de 700 personas (Dennis et al., 2012), aunque no se ha abordado el papel de este contaminante en las consultas por problemas respiratorios como el asma en la ciudad, las cifras deben tenerse en cuenta para resaltar la importancia de estudiarlo. Lo anterior, muestra que el estudio de la generación de material particulado en la ciudad es un tema de suma relevancia, especialmente del generado en el sector transporte, pues los estudios han mostrado que este es uno de los sectores que tiende a emitir la mayor cantidad de material particulado a la atmósfera en las principales ciudades de Colombia y de América Latina (Jaramillo et al., 2004; Behrentz & Sánchez, 2009; Toro et al., 2013; Karagulian et al., 2015).

Cabe resaltar que, según el IDEAM, entre los años 1998 y 2006, el material particulado fue el contaminante que aportaba la mayor degradación de la calidad del aire según la información obtenida en las redes de monitoreo del país, incluida la de la ciudad de Barranquilla (Costa, Saldarriaga, Lozano, & Suárez, 2007).

Los últimos reportes generados por la autoridad ambiental sobre las concentraciones de material particulado en la ciudad fueron presentados por el IDEAM; en el año 2007 (Costa et al.,

2007), donde muestreos del año 2006, indican concentraciones mensuales del PM₁₀ superiores a 160 µg/m³; y por la Sociedad de Ingenieros Químicos del Atlántico en el año 2009, contratada por el entonces Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente de Barranquilla (DAMAB) (Velásquez, 2012).

Según la Política de Prevención y Control de la Contaminación del Aire del entonces Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT) (MAVDT, 2010), una de las actividades necesarias dentro del plan de acción de la prevención y control, es la de identificar la participación de las diferentes fuentes de material particulado en áreas de contaminación media o alta, aquí es donde se resalta la importancia de generar un inventario de emisiones en la ciudad.

Si bien este trabajo no pretende estudiar la generación de toda la flota vehicular en toda la ciudad, propone comenzar por el estudio de las vías de mayor relevancia, por su importancia y flujo vehicular que, por esto, deben ser las más propensas a presentar una alta generación de material particulado (TPD & Epypsa, 2012). Anteriormente en la ciudad se han generado inventarios de emisiones como el de (TPD & Epypsa, 2012) y el de (Orozco & Romaña, 2017) estos han utilizado para la estimación la metodología CORINAIR, haciendo uso de factores de emisión adaptados para Colombia, velocidad promedio en las vías y número de vehículos por categoría. En esta investigación se decidió optar por el Modelo IVE, ya que este requiere de una serie de datos que adapta los factores de emisión a las condiciones de la ciudad (Nicol Davis & Tolvet, 2008), lo que teóricamente daría una estimación más aproximada a la realidad de la localidad estudiada. Estos factores son las condiciones climáticas, topográficas (altura), de calidad de los combustibles y de patrones de conducción, que en lugar de manejar una velocidad promedio, tiene en cuenta la velocidad de conducción segundo a segundo, que genera

información del estrés energético sobre el motor; este factor ha sido ampliamente usado para revelar el impacto de las condiciones de operación del vehículo en el consumo de combustible y emisión de contaminantes (Yao, Liu, & Li, 2013) . Además de esto, se decidió utilizar el modelo por su recomendada aplicación en ciudades de países en vía de desarrollo (Nicol Davis & Tolvet, 2008) como Colombia.

4. Objetivos

4.1. Objetivo General

Estimar la emisión total anual de PM₁₀ proveniente de las fuentes móviles en las vías de mayor tráfico de Barranquilla por medio de un inventario de emisiones a través del Modelo IVE.

4.2. Objetivos Específicos

- ✓ Analizar la flota vehicular que transita por la Vía 40 y Avenida Circunvalar durante días hábiles y no hábiles.
- ✓ Determinar las características de los patrones de conducción para horas de poco flujo vehicular y de alto flujo vehicular en las vías estudiadas.
- ✓ Calcular la emisión total anual de PM₁₀ en las vías principales usando el modelo IVE por categoría vehicular.
- ✓ Conocer la distribución temporal de la emisión total de PM₁₀ en las vías principales.

5. Marco Teórico

5.1. Inventario de Emisiones

Un inventario de emisiones es considerado un instrumento con el cual es posible estimar la cantidad de contaminantes que se liberan a la atmósfera en forma de emisiones en un tiempo y un espacio determinado, basándose en las fuentes de emisión estudiadas (MEJ, 2012).

Además de estimar el total de emisiones, los inventarios de emisiones son ampliamente usados para identificar el grupo, categoría o porción de fuentes de emisiones atmosférica cuyas contribuciones son más significativas, establecer cuán efectivas están siendo las medidas de gestión de la calidad del aire aplicadas y modelar la calidad del aire para un tiempo futuro (Inermanat, 2005).

En general, las emisiones de contaminantes son estimadas según la información de la intensidad de la actividad que los genera y un factor de emisión, así como se muestra en la ecuación 1.

$$E = FE \times DA \quad (\text{Ec. 1})$$

Dónde:

E: Emisión total

FE: Factor de emisión para el contaminante y actividad estudiada

DA: Dato de la actividad estudiada.

Los factores de emisión representan el promedio de la razón de emisión de contaminante respecto a la unidad del dato de actividad. Cuando no existen factores de emisión que reflejen la situación real del área estudiada, pueden utilizarse factores de emisión por defecto, definidos por agencias ambientales o estudios al respecto.

El dato de la actividad es una medida de la intensidad con la que se presenta la actividad que genera la emisión, esta información puede ser recolectada por medio de estadísticas y encuesta (MEJ, 2007).

Para los inventarios de emisiones de fuentes móviles, expresión que generaliza su cálculo, se muestra en la ecuación 2.

$$E = n * DA * FE \quad (\text{Ec. 2})$$

Dónde: E: emisión total del contaminante estudiado; n: número de vehículos de la categoría de interés; DA: dato de la actividad vehicular, usualmente expresada como la distancia total recorrida en un tiempo determinado y en condiciones específicas; FE: factor de emisión para el contaminante, que expresa una cantidad de contaminante que se genera por unidad de actividad del vehículo, usualmente se da en gramos de contaminante emitido respecto a la distancia recorrida (Aguilar et al., 2007).

En la actualidad, es común el uso de modelos computarizados para el cálculo de los inventarios de emisiones. Estos modelos se alimentan con los datos de las características de la flota vehicular, la actividad de la flota y algunas condiciones propias del área estudiada, como factores ambientales; la salida de los programas, pueden ser los factores de emisión necesarios para calcular la emisión total o la emisión total ya calculada. Aunque existen ya muchos modelos para este propósito, hay 4 de ellos en específico que han sido los más comúnmente utilizados en diferentes estudios, estos son el Modelo Mobile, de la EPA; el Modelo MOVES (*Motor Vehicle Emission Simulator*), también de la EPA, el Modelo COPERT (*Computer Programme to Calculate Emissions from Road Transport*) financiado por la Agencia Ambiental Europea y desarrollado por Microsoft; y el modelo que será utilizado en este trabajo, el Modelo IVE (*International Vehicle Emissions*) (Aguilar et al., 2007).

En la tabla Tabla 1 se muestra parte de la información requerida por los 4 programas anteriormente mencionados, también llamada *inputs* o *insumos*, estos insumos son datos de las condiciones ambientales locales, la composición de la flota vehicular por edad y/o modelo, la longitud de los diferentes tipos de vehículos, las características de los combustibles utilizados, entre otros. La razón por la que se utiliza el Modelo IVE, en lugar de los otros programas, es que este modelo ha sido diseñado para ser adaptable y flexible a cualquier país, incluso aquellos con poco desarrollo de inventarios de emisiones (Tolvet, 2009).

5.2. El Modelo IVE

El Modelo IVE, es un programa diseñado para estimar las emisiones de vehículos a motor, dirigido principalmente a países que se encuentra en vía de desarrollo. El modelo está escrito en lenguaje Java y fue desarrollado en un esfuerzo conjunto de la Universidad de California en Riverside, *Center for Environmental Research and Technology* (CE-CERT), *Global Sustainable Systems Research* (GSSR), y *The International Sustainable Systems Research Center* (ISSRC), usando fondos proporcionados por la EPA, Estados Unidos (Davis et al., 2005).

El proceso de estimación de las emisiones en el software comienza con la base de factores de emisión por defecto, junto con una serie de factores de corrección que dependen de las variables locales, cuyos valores el usuario debe especificar. Los tres componentes críticos que usa el modelo son los factores de emisión de vehículos, la actividad vehicular y la distribución de la flota vehicular. En el Anexo 1 se muestra una versión ilustrada de la arquitectura del modelo (Nicol Davis & Tolvet, 2008).

Tabla 1. *Comparación de algunos de los insumos necesarios para los modelos más usados internacionalmente.*

Grupo	Modelo IVE	Modelo Mobile 6.0	Modelo Moves	COPERT
Características de la localidad	<ul style="list-style-type: none"> - Características de la gasolina - Características de diésel - Programa de inspección y mantenimiento - Uso del aire acondicionado 	<ul style="list-style-type: none"> - Características del combustible - Programa de inspección y mantenimiento 	<ul style="list-style-type: none"> - Formulación del combustible - Programa de inspección y mantenimiento 	<ul style="list-style-type: none"> - Características del combustible. - Programa de inspección y mantenimiento
Tecnología vehicular	<ul style="list-style-type: none"> - Distribución de la flota vehicular por tecnología 	<ul style="list-style-type: none"> - Distribución de la flota vehicular por clase 	<ul style="list-style-type: none"> - Población vehicular por tipo y año modelo para el año base 	<ul style="list-style-type: none"> - Distribución de la flota vehicular por clase
Actividad vehicular	<ul style="list-style-type: none"> - Desglose detallado de actividad (KRV) por categoría vehicular - Número de arranques, por día y categoría vehicular, y tiempo entre arranques consecutivos - Factores de emisión para cada tecnología bajo las condiciones locales de operación. 	<ul style="list-style-type: none"> - Distribución de kilómetros recorridos por tipo de vía - Distribución de velocidad promedio por hora y tipo de vía - Distribución de la longitud promedio de los viajes - Número de arranques por día y tipo de vehículo, distribuido por hora - Tiempo de reposo del vehículo 	<ul style="list-style-type: none"> - Distribución de kilómetros recorridos por tipo de vehículo, tipo de vía, año modelo y hora del día. - Distribución de velocidad promedio por hora y tipo de vía - Distribución del número de arranques del vehículo, por tipo de vehículo, año modelo y hora del día - Tiempo de reposo del vehículo, por tipo de vehículo, año modelo y hora del día 	<ul style="list-style-type: none"> - Distribución de kilómetros recorridos por tipo de vehículo y de vía - Distribución del número de arranques por tipo de vehículo - Distribución de velocidad promedio por tipo de vehículo y de vía - Distribución de la longitud promedio de los viajes - Datos sobre consumo de combustible

Nota: Adaptado de Tolvet (2009)

5.2.1. Cálculo de Factores de Emisión. Para realizar el cálculo de las emisiones, el Modelo IVE internamente multiplica una base de factores de emisión que tiene para cada tipo de tecnología, por cada uno de los factores de corrección y la distancia recorrida por cada tecnología. En el Anexo 2 se muestra el proceso de corrección de la base de emisión, por la serie de factores de corrección para obtener el factor de emisión ajustado (Davis & Tolvet, 2008). Hay dos tipos de bases de factores de emisión, una para para las emisiones producidas por el vehículo en marcha y otra para las emisiones generadas en el encendido. Por medio de la ecuación 3, se ponderan los factores de emisión corregidos por la fracción de viaje que realiza y el tipo de conducción que tiene cada tecnología vehicular, la ecuación 4 se calcula el factor de emisión de encendido (Davis & Tolvet, 2008).

$$Q_{running} = \Sigma_t \{ f_{[t]} \times \Sigma_d [Q_{[t]} \times \bar{U}_{FTP} \times f_{[dt]} \times K_{[dt]}] \} / \bar{U}_C \quad \text{Ec. 3}$$

$$Q_{start} = \Sigma_t \{ f_{[t]} \times Q_{[t]} \times \Sigma_d [f_{[dt]} \times K_{[dt]}] \} \quad \text{Ec. 4}$$

En la Tabla 2 se muestran los factores de corrección para las dos ecuaciones anteriores.

Tabla 2.

Factores de corrección según la fracción de viaje y tipo de conducción.

Variable	Descripción
B[t]	Base de factores de emisión para cada tecnología (partida (g/partida) o en ruta (g/km))
Q[t]	Factores de emisión ajustados para cada tecnología (partida (g/partida) o en ruta (g/km))
f[t]	Fracción de viaje por tecnología específica
f[dt]	Fracción de tiempo por cada tipo de conducción o fracción de tiempo soak (tiempo que lleva el vehículo en reposo) tecnología específica
\bar{U}_{FTP}	Velocidad Promedio del ciclo de conducción LA4 (una constante (kph))
\bar{U}_C	Velocidad Promedio del ciclo de conducción específico, valor ingresado por el usuario en el archivo Localidad (kph)

Nota: tomado de Davis & Tolvet (2003)

5.3. Tecnologías Vehiculares

Las emisiones que producen los vehículos dependen también en gran medida del tipo de tecnología que este posee. Las emisiones en estos varían dependiendo de aspectos como el combustible utilizado, cual es la tecnología de control de aire y combustible en el motor y si existen o no tecnologías de control de emisiones. A continuación, se describen algunos aspectos relevantes sobre los tipos de motores a gasolina, los motores a diésel y algunas de las tecnologías de control A/C y de control de emisiones que utilizan.

5.3.1. Motor a gasolina y motores a diésel. Kates & Luck (1982) exponen las similitudes y diferencias que existen entre estos tipos de motores. Resalta que los dos son de combustión interna, eso quiere decir que el combustible es quemado dentro de cilindros del motor; y además, la mayoría de los motores realizan ciclos de cuatro tiempos que consiste en las etapas de aspiración, compresión, motriz y escape, realizadas por el pistón; y por último, estos dos combustibles, el diésel y la gasolina, son combustibles líquidos obtenidos del petróleo, aunque la gasolina se diferencia por ser altamente volátil a temperaturas relativamente bajas, mientras que el diésel requiere de altas temperaturas para evaporarse.

La principal diferencia que poseen los motores de gasolina y diésel es el proceso de explosión para generar la energía a través de la quema del combustible. En ambos motores se presenta un ciclo de cuatro etapas que consisten en la inyección de combustión, inyección de compresión, proceso de combustión y escape. Durante la fase de inyección en el motor a gasolina, el combustible se mezcla con aire. Por otro lado, en el motor a diésel entra sólo aire que es calentado a temperaturas de más de 540 °C. En la fase de compresión, en el primero se calienta la mezcla de aire y gasolina, luego es requerida la chispa de las bujías para encenderla y generar la combustión. Mientras que en el motor diésel, debido a la volatilidad del combustible y

la temperatura del oxígeno, sólo se necesita inyectar el primero y que estos entren en contacto para producirse la explosión (NCHEu, 2017). El proceso se refleja en la Figura 1.

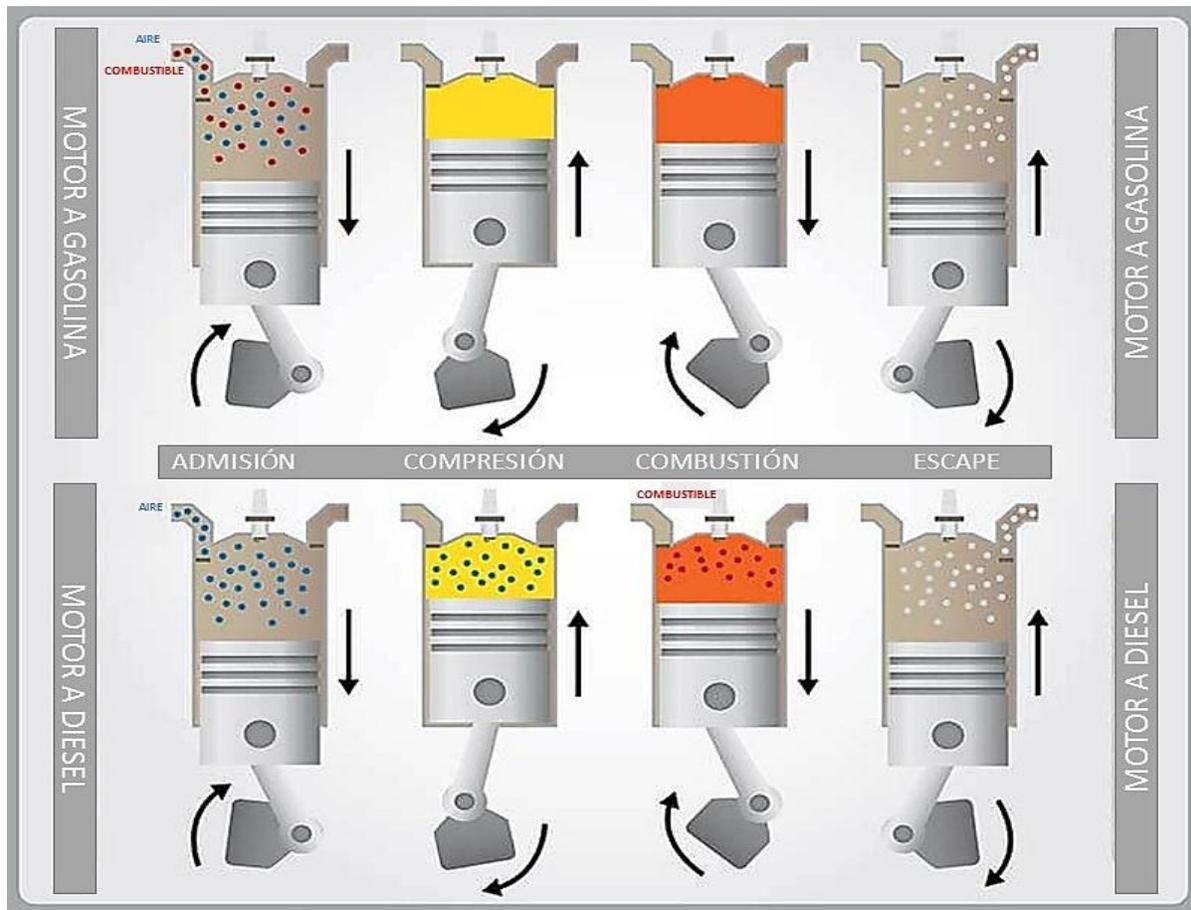


Figura 1. Proceso de combustión en el motor.

Nota: gasolina (arriba) y diésel (abajo). Recuperado de (NCHEurope, 2016)

Respecto a los combustibles en sí, el poder calorífico del diésel es aproximadamente 45,5 MJ/kg (mega Joules por kilogramo), ligeramente más bajo que la gasolina que es 45,8 MJ/kg. Sin embargo, el combustible diésel es más denso que la gasolina y contiene aproximadamente un 15% más de energía por volumen (aproximadamente 36,9 MJ/litro en comparación con 33,7 MJ/litro). Teniendo en cuenta la diferencia en la densidad de energía, la eficiencia general del motor diésel es aún un 20% mayor que la del motor de gasolina, a pesar de que el motor diésel es más pesado (ACEA, 2017).

En lo que respecta a las emisiones de material particulado, los vehículos a combustible diésel generan este contaminante en cantidad considerablemente mayor que los vehículos a gasolina (Camner, 1988), además de eso, los vehículos pesados a diésel, son los mayores emisores entre las diferentes categorías de vehículos diésel (Harrison et al., 2016). Así mismo, debido a la composición inherente de los combustibles, las características de este contaminante varían en función del combustible utilizado y su tecnología.

En los motores de gasolina se forma por la condensación del vapor de aceite en el escape, estas emisiones de material particulado son usualmente pequeñas para motores de cuatro tiempos, mientras que en los motores diésel son considerablemente más altas. Las emisiones diésel en forma de humo negro, son una de las principales fuentes de altas concentraciones de material particulado en la mayoría de las grandes ciudades de países en vía de desarrollo (Faiz, Weaver, & Walsh, 1996). En la Figura 2, se muestran la composición del material particulado de las emisiones de escape un vehículo de tecnología diésel tradicional (TDE), uno de tecnología diésel moderna (NTDE) y uno de tecnología de gasolina moderna (Modern GE)

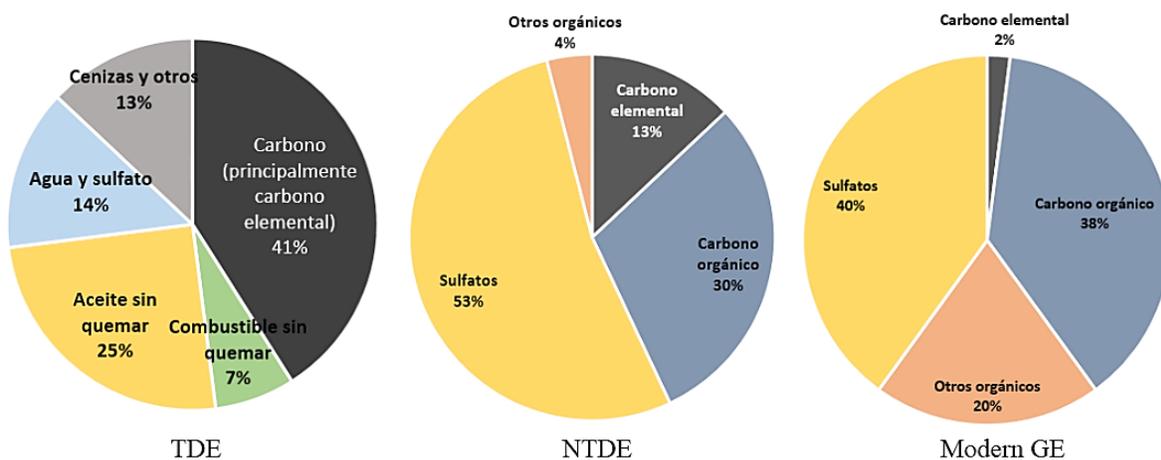


Figura 2. Composición del material particulado de tecnologías vehiculares.

Nota: Diésel tradicionales (TDE), nuevas tecnologías diésel (NTDE) y tecnologías modernas a gasolina (Modern GE). Adaptado de Cheung et al. (2009).

5.3.2. Sistemas de control Aire/Combustible. Según Lents et al. (2012), uno de los factores más relevantes para mantener las emisiones vehiculares bajas, es mantener una relación de la mezcla de aire en condiciones estequiométricas. Mantener la mezcla en condiciones estequiométricas se refiere a inyectar el suficiente aire para que se queme la totalidad del combustible inyectado. Generalmente para un consumo completo del combustible se necesita que se inyecte un cierto exceso de aire, teniendo en cuenta los límites que supone la inflamabilidad de la mezcla (Bosch, 2005). De manera general, estudios han mostrado que el motor diésel requiere 15,1 partes de aire por cada parte de diésel a quemar (Castro, 2002), mientras que el motor a gasolina necesita 14,7 partes de aire para quemar una parte de gasolina (Bosch, 2005). En la

Tabla 3 se muestran las tecnologías de mezcla de aire/combustibles utilizadas internacionalmente.

5.3.3. Sistemas de control de emisiones. Aunque la manera más efectiva de controlar las emisiones vehiculares es evitar la liberación de contaminantes en la combustión, por ejemplo, modificando la forma cómo se mezcla el aire y el combustible para aumentar su eficiencia y reducir la formación de contaminantes. Aun así, la mayoría de los vehículos requieren un cierto grado de tratamiento de los gases de escape antes de que se liberen a la atmósfera (Flagan & Seinfeld, 2012). Algunos sistemas de control de emisiones vehiculares, producto de la combustión o de escape se muestran en la

Tabla 4.

Tabla 3.

Tecnologías para la mezcla del aire y el combustible en los motores.

Tipo de combustible	Tecnología Aire/Combustible	Descripción
Gasolina, alcohol, gas natural, propano	Carburador	Sistema mecánico en donde válvulas de mariposa controlan el nivel de vacío en los inyectores de combustible, resultando un aumento o disminución del flujo de combustible hacia el motor.
Gasolina, alcohol, gas natural, propano	Inyección de combustible en un sólo punto (SPFI)	El combustible es inyectado después de la toma de aire antes de alcanzar el motor.
Gasolina, alcohol, gas natural, propano	Inyección de combustible multipunto (MPFI)	El combustible se inyecta cerca de las válvulas de toma de cada cilindro del motor.
Gas natural, propano	Adaptación de reconversión del motor	Algunos sistemas de remplazo han sido diseñados para convertir motores a gasolina para que operen con gas natural y propano. Estos sistemas pueden aumentar las emisiones vehiculares.
Diésel	Pre-Inyección	El combustible es inyectado en un único punto en la toma de aire antes de llegar al motor.
Diésel	Inyección directa	El combustible es inyectado en las válvulas de toma o directamente en la cámara de combustión.

Nota: adaptado de Lents et al. (2012)

Tabla 4.

Sistemas de control de emisiones de escape vehiculares

Tipo de combustible	Tecnología control de emisiones	Descripción
Gasolina, alcohol, gas natural, propano, diésel	Recirculación de gas de escape (EGR)	Devuelve parte del gas de escape a la cámara de combustión con el fin de reducir la temperatura de la cámara y de esta forma reducir la formación de NO.
Gasolina, alcohol, gas natural, propano	Catalizador de 2 vías	Oxida el CO e hidrocarburos (COV) en CO ₂ y H ₂ O. Puede reducir CO y COV hasta en un 95%
Gasolina, alcohol, gas natural, propano	catalizador de 3 vías	Oxida el CO e hidrocarburos (COV) igual que el catalizador de 2 vías, además convierte el NO en N ₂ y O ₂ .
Diésel	Filtro de partículas	Remueve el material particulado desde el flujo del gas de escape por intermedio de un filtro removible.
Diésel	Filtro catalítico de material particulado	Destruye el material particulado del gas de escape recolectándolo en un filtro que contiene material catalítico y luego quema el material particulado para removerlo.
Diésel	Catalizador de Oxidación Diésel (DOC)	Similar al catalizador de 2 vías, este sistema destruye el CO, COV e hidrocarburos particulados del flujo de escape.
Diésel	Inyección de urea	La urea es inyectada al flujo de escape para reducir el NO que se forma en el motor hasta en un 50%.
Diésel	Inyección de urea con catalizador	La urea es inyectada al flujo de escape y luego transportada a través de un catalizador donde se elimina el NO hasta en un 90%.

Nota: adaptado de Lents et al. (2012)

Además de las emisiones de escape, los vehículos también pueden presentar emisiones evaporativas. Este término se refiere a las emisiones relacionadas al combustible pero que no son producto de su quema o combustión (Mellios, Smit, & Ntziachristos, 2013). Estas emisiones

pueden darse por la exposición del auto a la temperatura ambiental del día, durante la operación del motor cuando el vehículo está en uso o durante la terminación de la operación (CaARB, 1975). Una de las formas de generación de emisiones evaporativas más común es la expulsión a la atmósfera de vapores generados de la evaporación del combustible en el tanque o el sistema de conducción (EPA, 2009). Los sistemas utilizados en el control de emisiones evaporativas se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5.

Sistemas de control de emisiones evaporativas.

Combustible	Tipo de control	Descripción
Gasolina, alcohol, gas natural, propano, diésel	Ventilación positiva del cárter (PCV)	Toma el aire en la reserva de aceite y lo envía a la toma de aire del motor para capturar vapor de escape orgánico y quemarlo en el motor.
II	Filtro de carbón activado	Toma aire desde el tanque de combustible y absorbe los compuestos orgánicos del aire. Cuando el motor está en marcha, el aire pasa por el filtro para separarlo del carbón e ingresarlo al motor para su combustión.

Nota: adaptado de Lents et al. (2012)

5.4. Patrones de Conducción

Un patrón de conducción se puede considerar como una función de probabilidad que resume la velocidad y aceleración alcanzadas por los vehículos conducidos a lo largo de una ruta específica durante un período de tiempo particular (Watson, 1978). Una de las variables de mayor importancia en el Modelo IVE es la determinación de estos patrones de conducción, pues permiten incorporar la operación segundo a segundo de los vehículos estudiados en lugar de utilizar una velocidad promedio (Lents et al., 2012).

Los patrones de conducción en el Modelo IVE son utilizados para el cálculo de la potencia específica vehicular VSP y el estrés del motor, factores con los que luego se clasifican los segundos del recorrido en categorías llamadas bines, con los que el Modelo utiliza para la estimación de las emisiones vehiculares en ruta.

La VSP se expresa en kilovatios por tonelada y representa la demanda de potencia instantánea del vehículo dividida por su masa. Este parámetro depende de la velocidad, aceleración y altitud instantánea del vehículo (Jiménez, 1999). La potencia instantánea es utilizada por el vehículo para rebasar la resistencia a la rodadura que se genera entre los neumáticos y la carretera, y para superar la resistencia aerodinámica y aumentar la energía cinética y potencial (Rojas, 2015). Además de la VSP, se utiliza un parámetro llamado estrés del motor, éste según Davis & Tolvet (2008), se correlaciona con los requisitos de carga de potencia del vehículo durante los últimos 20 segundos de funcionamiento y las revoluciones por minuto implícitas del motor.

5.5. Emisiones Atmosféricas

Las emisiones atmosféricas son contaminantes suspendidos (como partículas sólidas, o aerosoles) o gases tóxicos que son liberados a la atmósfera desde una fuente de emisión (Eionet, 2017). Aunque actualmente existen diferentes definiciones para la contaminación atmosférica, la más aceptada es la dada por la Organización Mundial de la Salud (OMS), que establece: “La contaminación atmosférica se define como la alteración de las características naturales de la atmósfera por cualquier agente de tipo químico, físico o biológico” (WHO, 2018), que incluye diferentes agentes además de sólo sustancias, y no especifica qué fuente produce estas alteraciones, por lo que pueden ser de origen natural o antropogénico.

Esta es la definición que se utiliza en la actualidad para definir la problemática de la entrada de contaminantes en el aire, aunque la alteración de este medio ha estado presente desde mucho antes de que existiera si quiera quien la definiese, así, por ejemplo, en una época primitiva (en el eón proterozoico del supereón precámbrico, desde hace 2500 millones hasta hace 542 millones de años) los organismos dependían de un ambiente bajo en oxígeno, por lo que cuando los organismos fotosintéticos prosperaron, se produjo un evento de contaminación de la atmósfera por el residuo de la fotosíntesis: el oxígeno (Phalen & Phalen, 2013). Así muchos cambios en la tierra a través de los años trajeron diferentes eventos de contaminación atmosférica, como la erupción de volcanes y el choque de meteoritos. Con el surgimiento del hombre, y el uso del fuego, se presentó la contaminación de espacios cerrados como cuevas, por el uso de combustibles como madera y otros materiales orgánicos; para cocinar, calefacción, alejar animales salvajes y plagas. Se ha descubierto cuevas antiguamente habitadas por seres humanos, cubiertas con hollín, y cuerpos momificados del periodo paleolítico que presentan oscurecimiento de los pulmones (Makra, 2015) o daños en la estructura ósea de la nariz, con lo cual se asume que, en la antigüedad, los seres humanos padecían de irritación ocular, irritación nasal y problemas respiratorios debido a la inhalación de humo (Phalen & Phalen, 2013).

De la antigüedad, hasta hoy día han surgido nuevas fuentes de contaminación atmosférica, así como las complicaciones a la salud y el ambiente relacionadas a esta. Desde la quema de madera, pasando por la extracción minera que generaba enfermedades del aparato respiratorio como la silicosis, los olores ofensivos generados por aguas negras y desechos orgánicos de los alimentos en las ciudades tempranas, la emisión de humo y hollín por quema de combustibles para calefacción e iluminación en centros urbanos antes del uso de la energía eléctrica (Makra, 2015), hemos llegado a poseer la fuentes de emisión que se presentan en la

actualidad, como los medios de transporte, las industrias, las generadoras de energía, las industrias de extracción minera, entre muchos otros, que producen diferentes contaminantes, que son actualmente de preocupación mundial.

5.5.1. Clasificación de los contaminantes atmosféricos. En el área ambiental, existen diversas formas de clasificar los contaminantes del aire. Según el propósito, estos pueden clasificarse según el modo de entrada a la atmósfera, su estado físico, su composición molecular y según los problemas a la salud y otras amenazas que represente.

En la clasificación según el método de entrada a la atmósfera, los contaminantes se dividen en dos categorías: los contaminantes primarios y los contaminantes secundarios, los primeros provienen de fuentes identificables y se emiten a la atmósfera directamente ya sea por reacciones mecánicas o físicas; los contaminantes secundarios se caracterizan por no provenir directamente de una fuente, sino ser el resultado de reacciones entre contaminantes primarios y/o otras sustancias u energías propias de esta, como el agua y luz solar (Pfafflin & Ziegler, 2006).

Respecto a la clasificación según el estado, los contaminantes pueden dividirse en aquellos que se encuentran en estado gaseoso, en estado sólido y en estado líquido, pero las últimas dos clasificaciones implican que las sustancias se encuentran en forma de partícula, así la clasificación por el estado físico se simplifica en estado gaseoso y particulado (Compton, Devuyst, Hens, & Nath, 2013).

5.6. Material Particulado

El material particulado, MP o PM (por *particulate matter*) atmosférico se refiere a una compleja mezcla de pequeñas partículas líquidas o sólidas que se encuentran en el aire, con capacidad o no de sedimentar y de origen diverso, que puede ser antropogénico o natural (Garreaud et al., 2006).

5.6.1. Clasificación por tamaño. El material particulado primario puede ser clasificado por su composición química como material particulado compuesto por elementos inorgánicos, compuestos inorgánicos, compuestos orgánicos y sustancias radiactivas, y por su origen como material particulado de fuentes naturales, de fuentes de combustión estacionarias, industrial, relacionado al transporte y otros (como el que proviene del tabaco, cocinas, uso de espray, etc.) (Phalen & Phalen, 2013). Además de esto, la EPA (United States *Environmental Protection Agency*) en “Directrices para el monitoreo específico de partículas” (*Guideline on Speciated Particulate Monitoring*) ofrece una clasificación de los componentes del material particulado, según esto, la mayor parte de la masa del material particulado tanto en áreas urbanas como en no urbanas es una combinación de componentes químicos como:

- ✓ **Material geológico:** Polvo suspendido conformado principalmente por óxidos de aluminio, silicio, titanio, hierro, calcio y otros óxidos de metal.
- ✓ **Amonios y Sulfatos:** Como sulfato de amonio, bisulfato de amonio y ácido sulfúrico, resultantes de la conversión de gases a partículas.
- ✓ **Nitratos:** en el aire se da un equilibrio gas/partícula entre el amoníaco, ácido nítrico, ambos en forma de gas y el nitrato de amonio particulado.
- ✓ **Cloruro de sodio:** puede encontrarse en el aire de zonas costeras o cercanas a ellas.
- ✓ **Carbono orgánico:** consiste en cientos o posiblemente miles de compuestos que contienen más de 20 átomos de carbono.
- ✓ **Carbono elemental:** las partículas de carbono elemental son también llamadas hollín, usualmente están compuestas de carbón puro en forma de grafito, pero también pueden contener coque, alquitrán, entre otros.

- ✓ **Agua en estado líquido:** el contenido de agua en el material particulado depende de su composición y la humedad relativa del ambiente. Algunos compuestos como los nitratos solubles, sulfatos, amonio, sodio, otros iones inorgánicos y algunos materiales orgánicos pueden absorber agua del vapor presente en la atmósfera (Chow & Watson, 1998).

Es importante resaltar que el material particulado no posee una composición específica, sino que su masa y composición varía considerablemente en términos espaciotemporales, además de esto es susceptible a ser influenciado por las condiciones meteorológicas y climáticas de la zona donde se presente (Zereini & Wiseman, 2010).

Así como otros contaminantes atmosféricos pueden formarse en la atmósfera por la interacción de sustancias precursoras provenientes de las emisiones, el material particulado también puede conformarse en el aire por condensación o reacción química de los gases y vapores, reacciones químicas entre partículas primarias con gases y/o vapores, coagulación de diferentes tipos de partículas primarias o por la adquisición de revestimiento superficial de partículas ya formadas, proceso que altera su composición (Phalen & Phalen, 2013).

Durante la XIX Reunión de Foro de Ministros de Medio Ambiente de América Latina y El Caribe, dada en Los Cabos México en el año 2014, se definió en el Plan de Acción Regional Sobre Contaminación Atmosférica, el material particulado como uno de los contaminantes que deben ser controlados con prioridad debido a sus efectos a la calidad del aire, el cambio climático y los beneficios de controlarlos, principalmente, a la salud de las personas, a la economía y a los ecosistemas (PNUMA, 2014).

5.6.2. Fuentes de emisión de material particulado. El material particulado primario, proviene de un amplio rango de fuentes de emisión, la contribución de cada tipo de fuente a la emisión total de este contaminante puede variar dependiendo del lugar, la temporada, la hora del

día, etc. Las fuentes de material particulado más significativas son la combustión residencial, el transporte de carretera, las industrias de energía y manufactura, el tráfico marítimo, las actividades agrícolas y algunas fuentes naturales (Harrison et al., 2016).

En la Figura 3, se muestran la emisión aproximada de diferentes fuentes de material particulado en varias regiones del mundo. Karagulian et al. (2015) en su revisión de las fuentes de emisión locales al rededor del mundo, encontraron que el tráfico, es el mayor contribuyente en regiones como Latinoamérica, Europa del occidental, África, India y el norte de China.

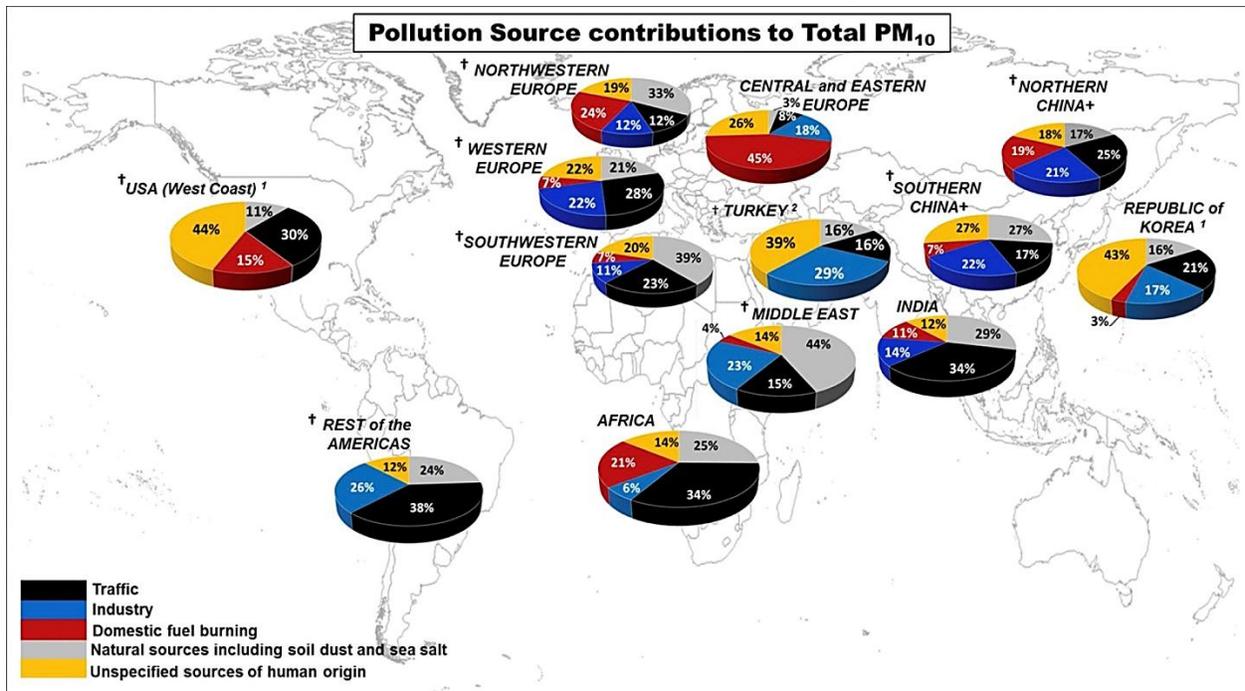
El material particulado emitido por los vehículos se categoriza según el modo en que este se forma. El material particulado puede formarse durante la quema del combustible o por medio de la interacción entre algunos elementos del vehículos, ya sea entre sí o con el suelo (Harrison et al., 2016).

La cuantificación de las emisiones de material particulado por el escape de los vehículos depende mayoritariamente de factores como los siguientes:

- ✓ tipo de motor
- ✓ edad del motor
- ✓ tecnología de tratamiento de emisiones que pueda poseer el automóvil
- ✓ las características del combustible, por ejemplo, las emisiones de vehículos a combustible diésel son generalmente mayores que aquellos que utilizan gasolina. También será mayor la emisión de material particulado resultante de combustible con alto contenido en azufre.
- ✓ el nivel de mantenimiento del vehículo
- ✓ las condiciones ambientales y la forma de conducción (patrón de conducción), para los viejos estándares de emisiones vehiculares, los vehículos a bajas velocidades tendían a emitir mayor material particulado, sin embargo eso ha sido remplazado en los nuevos

estándares, ahora se establece que más que por la velocidad en sí, la emisión de material particulado incrementa durante la aceleración, así como en el transporte de cargas pesadas y durante la “conducción agresiva” (constante aceleración y desaceleración) (Harrison et al., 2016).

Figura 3. Contribución de las fuentes contaminantes al PM₁₀ total en diferentes regiones del mundo.



Nota: tomado de (Karagulian et al., 2015)

Por otro lado, las emisiones de material particulado por desgaste de frenos, desgaste de neumáticos, desgaste de la carretera y resuspensión de partículas; siguen siendo poco estimables. Los métodos con que se dispone para esta tarea, se basan en el uso de trazadores químicos, o de la distribución de las partículas por tamaño como indicativo se la posible fuente (Thorpe & Harrison, 2008). Sin embargo, a la fecha hay avances al respecto, por ejemplo Querol et al. (2004), en su estudio sobre el origen del material particulado en algunas ciudades de Europa, usando información de las ciudades, encontraron que la mitad de la emisión de material particulado puede ser atribuido a este tipo de emisión en los autos, mientras que (Thorpe &

Harrison, 2008), demostraron en Berlín, que alrededor de la mitad del aumento del material particulado al lado de las carreteras en comparación con el resto de la ciudad, puede ser atribuido a la resuspensión de partículas de polvo.

Este trabajo se enfoca en la emisión de material particulado por el escape de los vehículos en las vías estudiadas, pues hasta el momento, el Modelo IVE no contempla la estimación de material particulado diferente a esta forma de emisión.

5.6.3. Formación del material particulado en el motor. En la mayoría de las áreas urbanas, la emisión de material particulado primario proviene principalmente de los vehículos. Estos tienen típicamente una distribución bimodal, que consiste en una fase de hollín y una fase de nucleación, la fase de hollín es rica en carbón elemental y tiene un pico de distribución entre los 50 y 100 nm; por otro lado, la fase de nucleación tiene un pico de distribución entre los 15 y los 30 nm, las partículas de esta fase resultan principalmente del enfriamiento de los gases de escape (Harrison et al., 2016). Por procesos de coagulación, aglomeración y aumento del área superficial, una parte de estas partículas se convertirán en partículas de diámetro PM₁₀ (Merkisz & Pielecha, 2015)

La formación del hollín durante la quema del combustible es un proceso complejo que se da en unos cuantos microsegundos. Los vehículos emiten ambas fases, pero la fase de hollín es más pronunciada en las emisiones diésel (Harrison et al., 2016). En ese lapso, las partículas sólidas se forman a partir de pequeñas gotas de combustible. El hollín comienza como resultado de la oxidación de moléculas de combustible, o por la descomposición térmica de hidrocarburos insaturados. Inicialmente, en la cámara de combustión del motor se da el proceso de nucleación (formación de núcleos), donde aumenta el número total de partículas; luego de esto, se da lugar a la condensación (conversión de gases a partículas), donde aparecen las primeras partículas de

hollín identificables, con diámetros de alrededor de 2 nm. Las partículas de este tamaño son especialmente móviles y colisionan entre ellas, resultando en estructuras más grandes, con diámetros aerodinámicos de 10 nm a 80 nm, aunque aquellas que van de los 15 nm a los 30 nm son las más comunes. Después de esto, se presenta el proceso de aglomeración, donde las partículas aumentan su área superficial gracias a la combinación de partículas ya existentes, dependiendo de la mezcla de vapores y de su temperatura (Merkisz & Pielecha, 2015). En la Figura 4 puede observarse el proceso de formación del material particulado, donde se muestran los precursores de las partículas, que son los gases y el hollín; así como las fases de la formación de estas, nucleación, condensación y aglomeración. También en el Anexo 3 se muestran los cambios en las propiedades del material particulado incluyendo el lugar donde ocurren.

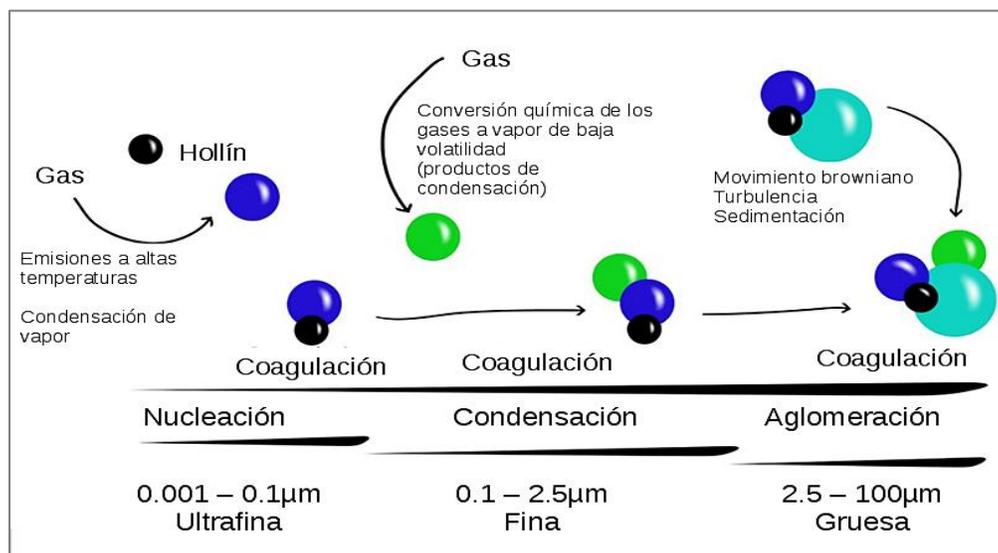


Figura 4. Dinámica de la Formación del material particulado.

Nota: Adaptado de Falcon, Osornio, Sada, & Segura (2016)

5.6.4. Límites de exposición al material particulado. Para evitar la excesiva exposición de la población a los diferentes contaminantes atmosféricos, entidades ambientales o de salubridad a nivel de las regiones y de las naciones al rededor del mundo, han creado estándares

de calidad del aire, que indican los límites de concentración de los contaminantes en el ambiente, ya sea de forma anual, diaria, y en algunos casos horaria. El principal organismo guía el establecimiento de los límites de exposición a contaminantes atmosféricos es la Organización Mundial de la Salud (OMS o WHO en inglés). Las guías de calidad del aire relativas al material particulado, emitidas por la OMS recomienda orientar las normas para alcanzar las concentraciones más bajas posibles del contaminante. Hoy día no se han identificado umbrales exactos de exposición en que las personas estén seguras, además, existe una gran variedad de formas de exposición y de respuesta al material particulado, por lo que una norma o valor guía, no ofrecería una absoluta protección contra los diferentes efectos a la salud que este produce (WHO, 2005). Los estándares de concentración de material particulado en diferentes regiones y en Colombia se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6.

Límites de exposición de material particulado PM₁₀ establecidos por diferentes autoridades ambientales y de salud.

Entidad	Tiempo promedio	Concentración límite µg/m ³
Organización Mundial de la Salud	Anual	20
	24 horas	50
Agencia Ambiental Europea	Anual	40
	24 horas	50
Agencia de Protección Ambiental (EU)	24 horas	150
Ministerio de Ambiente (Colombia)	Anual	50
	24 horas	75

Nota: adaptado de EPA (2015), Resolución 2254 del 2017, OMS (2005), Comisión Europea-Medio ambiente (2017).

5.6.5. Efectos en la salud humana. Los efectos sobre la salud humana que tiene el material particulado dependen de la capacidad de este de interactuar con el sistema respiratorio del ser humano. La capacidad de llegar a ciertas partes del sistema respiratorio u otras partes del cuerpo depende principalmente del tamaño de las partículas.

Aunque el mecanismo con el cual el material particulado logra efectos adversos en el sistema cardiovascular aún no ha sido comprendido en su totalidad, se han realizado diferentes estudios que indican los mecanismos con los que la afección puede darse. Actualmente, se cree que la inhalación del material particulado genera una inflamación pulmonar, que a su vez induce una inflamación sistémica que conlleva a la disfunción cardíaca (Evelson et al., 2016).

En el año 2017, se realizó en Corea del Sur, un estudio enfocado en estimar la relación entre la exposición al material particulado y las consultas médicas relacionadas con tres de las enfermedades más comunes que causan disfunción vestibular. El sistema vestibular (conformado por pequeñas estructuras membranosas dentro del oído) relaciona el cerebro con la fuerza gravitacional y sus componentes se encuentran ubicados en el oído interno en una parte que no posee función auditiva (Chacón, 2005). Según el estudio, para el caso de la ciudad de Seúl, se demostró una asociación significativa entre la exposición al material particulado en el ambiente y un aumento en el número de visitas hospitalarias por enfermedad de Ménière (anomalía del oído interno que causa vértigo, tinnitus, congestión y pérdida de la audición), especialmente en los adultos mayores (Han et al., 2017).

También en Corea del Sur, se demostró que la exposición prenatal y postnatal a altos niveles de material particulado PM₁₀ (> 50 µg/m³) tiene una asociación negativa con el peso corporal de los niños. El estudio se realizó evaluando la exposición al material particulado de

1129 parejas de madres y bebés, así como llevando control del peso de los pequeños al momento del nacimiento, y a los 12, 24, 36 y 60 meses (Kim et al., 2016).

Investigadores de George Mason University, en su estudio sobre los efectos de los niveles respirables de material particulado en una población de jóvenes adultos saludables, encontraron resultados que apoyan su hipótesis que expone la asociación entre los cambios a corto plazo en las concentraciones de material particulado en el ambiente y los cambios, también a corto plazo, en problemas respiratorios agudos en jóvenes adultos saludables. El estudio, cuya población fue un grupo de jóvenes militares activos localizados en tres bases militares de los Estados Unidos, sugiere un aumento del 0,6% en el número de visitas a la sala de urgencias hospitalarias por cada 10 µg/m³ de aumento en la concentración de PM₁₀ (Shaughnessy et al., 2015).

Uno de los estudios más sobrecogedores de los últimos años sobre los efectos a la salud de la exposición al material particulado, fue el hallazgo de la presencia abundante de nanopartículas de magnetita en el cerebro humano. El estudio realizado por investigadores de la Universidad de Lancaster, Inglaterra, analizó muestras de cerebro de personas de Ciudad de México y Manchester (BBC, 2016). Estas nanopartículas de magnetita coinciden con las generadas por efecto de la combustión que pueden encontrarse en el material particulado de áreas urbanas. La preocupación por esta sustancia subyace en el hecho de que esta puede responder a campos magnéticos externos y es tóxica para el cerebro por su implicación en la producción de especies reactivas de oxígeno, estas a su vez, están ligadas a enfermedades neurodegenerativas, como Alzheimer (Maher et al., 2016).

Sin embargo, debe resaltarse que aún deben realizarse muchos más estudios respecto a los efectos a la salud que conlleva la exposición al material particulado. Por ejemplo Lynch et al. (2016), evaluaron las evidencias que respaldan los modos de acción, que las distintas

investigaciones en el tema han sugerido como la forma en que se genera el cáncer de pulmón por exposición a material particulado. Entre los modos de acción se estudiaron el daño al ADN, otros efectos genotóxicos (como la mutagenicidad y clastogenicidad) y la expresión genética, expresión de proteínas y metilación del ADN. Evaluando la calidad de los estudios y la solidez de la evidencia, se concluyó que el peso de las evidencias indica, que es más plausible que el PM de varias fracciones de tamaño puedan causar daño directo al ADN, pero también se sugiere que esta forma de acción requiere de más investigación que indique si ese daño al ADN puede generar otros efectos, incluido el cáncer de pulmón. Según el estudio, las otras formas de acción cuentan con evidencia insuficiente.

5.6.6. Efectos medio ambientales. A pesar de que el material particulado no es directamente visible, el aumento de su concentración puede cambiar las características de absorción y transmisión de luz en la atmósfera, lo que puede llevar a una reducción en la visibilidad en una zona afectada (Miller, 2011).

Por otro lado, el material particulado puede causar daño en los materiales de las construcciones. El material particulado puede manchar superficies pintadas, ropa y cortinas tan sólo depositándose en ellas. También puede causar corrosión en metales, por la acción de especies químicas corrosivas presentes (Miller, 2011).

El material particulado es bastante heterogéneo en su constitución. Este ejerce sus efectos sobre la vegetación y los ecosistemas según su carga masiva de componentes químicos y, debido a que esta composición varía de forma espacial y temporal, sigue siendo difícil predecir los impactos que este contaminante puede causar a un ecosistema (Grantz et al., 2003).

A pesar de eso, se han llevado a cabo investigaciones que concluyen algunos efectos negativos que provoca el material particulado en las plantas. Esto es indicado en trabajos como la

revisión bibliográfica hecha por Rai (2016), en donde se abordan algunos efectos adversos en las plantas, como la disminución del crecimiento debido a la a la interacción con la superficie foliar y modificación de su estructura que resulta de la deposición de las partículas en las hojas. Esto se da pues las partículas afectan el intercambio de gases en las hojas.

Respecto a la masa del material particulado depositado en las hojas de las plantas como se muestra en la Figura 5, puede también alterar la radiación (solar) recibida por la cobertura de la superficie. Por otro lado, los efectos de los diferentes componentes químicos de las partículas, han sido señalados como causantes de lesiones o necrosis a causa de la alcalinidad, salinidad o acidez (Grantz et al., 2003).

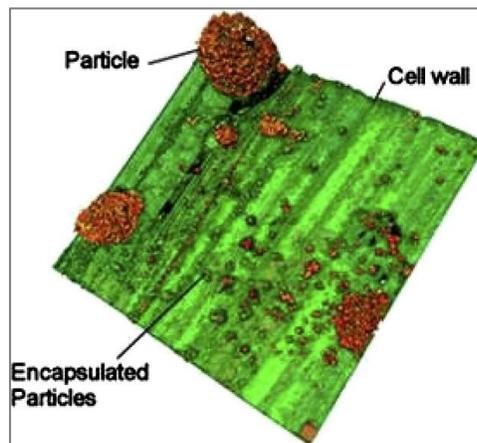


Figura 5. Material particulado depositado en el tejido foliar.

Nota: Tomado de Terzaghi et al. (2013)

Una de las formas en la que el material particulado puede afectar los ecosistemas en un nivel más generalizado, es la afección de los microorganismos que viven en las plantas y el suelo y que tienen un papel importante en la descomposición de material orgánico (Grantz et al., 2003). Por ejemplo, se encontró que la descomposición de hojas de roble que contienen elementos como hierro, zinc, cobre, cromo y plomo, se ve afectada por su presencia (Cotrufo, De Santo, Alfani, Bartoli, & De Cristofaro, 1995).

6. Estado del arte

Según Granier, Artaxo Netto, & Reeves (2004), los inventarios de emisiones para uso científico, comenzaron a realizarse en la década de los 70's, para los óxidos de sulfuro y nitrógeno, se hacían para áreas grandes y con poca resolución espacial y temporal. Tal fue la importancia que ganaron los inventarios de emisiones, que, por medio de acuerdos y protocolos, se llegaron a generar inventarios en regiones enteras del mundo, como el realizado por el Programa de Cooperación para el Seguimiento y la Evaluación de la Transmisión a Larga distancia de Contaminantes Atmosféricos en Europa, apoyado por el Protocolo de Ginebra de 1984 (EMEP, 1984).

Las entidades ambientales más reconocidas a nivel internacional como la *Environmental Protection Agency* (EPA) de Estados Unidos y la *European Environmental Agency* (EEA) de la Unión Europea, tienen a disposición de los interesados, guías, procedimientos y herramientas informáticas para la debida realización de inventarios de emisiones. Por ejemplo, en 1985, El Consejo de la Unión Europea, creó un programa para reunir, coordinar y garantizar la calidad de la información sobre el estado del medio ambiente en la Unión Europea, llamado CORINE, y uno de sus proyectos fue el desarrollo del Inventario de Emisiones Atmosféricas de CORINE, más conocido como el CORINAIR (Granier et al., 2004). Hoy día, el libro guía para inventario de emisiones de CORINAIR, es uno de los documentos de consulta básicos en la realización de inventarios de emisiones en todo el mundo.

En América Latina se han ejecutado talleres sobre la realización de inventarios de emisiones, como el llevado a cabo en San José - Costa Rica, en el año 2014. Allí se expuso, por ejemplo, como la región había duplicado su generación de gases de efecto invernadero y este aumento provenía de la ganadería, silvicultura y otros usos de la tierra (Salvatore, 2014).

En la actualidad, gran parte de los países y sus ciudades principales realizan inventarios de emisiones contaminantes como herramientas para apoyar sus políticas de emisiones de gases de efecto invernadero y de gestión de la calidad del aire. Según Karagulian et al. (2015), a nivel global, el 25% de los aportes de PM₁₀, proviene del tráfico, 18% de actividades industriales y el 15% de la quema doméstica de combustibles. El tráfico es el mayor contribuyente de PM₁₀, en las regiones de África, India y América (excepto en Estados Unidos, donde es el segundo). Uno de los países con niveles de contaminación particularmente altos es la India, allí, en Nueva Delhi, su capital, que es de hecho la ciudad más estudiada en términos de contaminación atmosférica en el mundo, se logró establecer que el alto tráfico es una de las mayores causas por las cuales el PM₁₀ anual en esta ciudad, excede hasta 11 veces el estándar de la OMS (Mukherjee & Agrawal, 2017).

En Colombia, el inventario de emisiones a nivel nacional se realiza principalmente para obtener la contribución nacional de gases de efecto invernadero a la atmósfera, estos inventarios son necesarios para generar la información pertinente para la toma de decisiones encaminadas a alcanzar las metas referentes a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (Pulido et al., 2016). Aunque el material particulado no es un contaminante cubierto en este tipo de estudios, por no tratarse de un gas de efecto invernadero, si pueden encontrarse estudios académicos que evalúan la emisión de este contaminante a la atmósfera a nivel nacional. Tal es el caso del estudio llevado a cabo por Castro & Escobar (2006), titulado “Estimación de las emisiones contaminantes por fuentes móviles a nivel nacional y formulación de lineamientos técnicos para el ajuste de las normas de emisión”, donde, como el título lo indica, se centra en la evaluación de la emisión de fuentes móviles. En este trabajo se realizó un ajuste de factores de emisión de vehículos para

Colombia, basándose en los certificados de pruebas dinámicas de lotes de vehículos importados, que representan los automóviles que circulan en el país desde 1997.

En Colombia, se han realizado estudios como el de Behrentz, Rojas, Osorio, & Uscátegui (2016). Este evalúa la concentración de PM respirable en vías de transporte público colectivo con alto flujo en Bogotá. Encontraron que, durante la investigación, se presentaron porcentajes de excedencia del valor de PM₁₀ máximo anual, hasta del 35% y de excedencia del valor de PM₁₀ máximo diario de hasta el 12%, con valores que alcanzaban incluso los 2.700 µg/m³ en tiempo real. Otro estudio realizado que relaciona el material particulado y las vías de alto tráfico en Bogotá, es el de Franco et al. (2009), donde se caracterizan los niveles de PM₁₀ en colegios distritales ubicados cerca de vías de alto tráfico, se encontró que aquellos colegios ubicados cerca de este tipo de vías presentan mayores niveles de PM en comparación con un colegio de control ubicado en un área semi rural.

En la ciudad de Cartagena, en el año 2015, se llevó a cabo un estudio con el fin de desarrollar la metodología para la realización de inventarios de emisiones de fuentes móviles, donde se propuso el uso del Modelo Internacional de Emisiones Vehiculares (IVE), por la oportunidad que da este de incluir las características propias del lugar estudiado para la adaptación de los factores de emisión (Avila & Lora, 2015).

En el año 2007, el MAVDT auspició la estimación de la contaminación por PM₁₀ debido al uso de combustibles fósiles en algunas ciudades del país, se encontró que en Barranquilla se generaban, en ese momento, 1660 toneladas de esta forma, como se cita en (Caro & Uribe, 2008). En el diagnóstico para la formulación del plan maestro de movilidad del distrito de Barranquilla, se presentó la aplicación de los factores de emisión del modelo EMEP/CORINAIR para estimar la carga contaminante producida por el parque automotor en la atmosfera de la

ciudad; se encontró que los vehículos generan aproximadamente 800 ton/año (sin incluir lo generado por las motocicletas, lo cual haría la cifra mayor) (TPD & Epypsa, 2012).

El inventario de emisiones del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, realizado con el Modelo IVE, en el año 2015, arrojó que las fuentes móviles emiten casi el 80% del material particulado PM_{2.5}, y esto supone un reto para la región debido al crecimiento del parque automotor en los últimos años (especialmente de motocicletas (Toro et al., 2013)). El inventario de emisiones en Bogotá, con año base del 2008, muestra que, en esta ciudad, se generan alrededor de 2500 toneladas de material particulado respirable al año, el 60% de este proviene de las fuentes móviles. En el caso de Bogotá, es tal la preocupación por este contaminante, que se ha establecido que para el año 2020, debe lograrse una reducción en el 80% de sus emisiones proyectadas para ese año, que corresponde a reducir la generación a sólo 940 toneladas por año, este estudio fue también realizado con el Modelo IVE (Behrentz & Sánchez, 2009). Por otro lado, en la ciudad de Cali y el municipio de Yumbo, en el año 2003, se reportó un aporte porcentual del 80% en la generación de contaminantes atmosféricos por parte de las fuentes móviles, estudio realizado con la utilización del modelo Mobile 6.0 (Jaramillo et al., 2004). También con el Modelo IVE, se realizó en la ciudad de Pereira, la estimación de emisiones contaminantes en el año 2007, encontrándose que las motos son el vehículo que aporta la mayor cantidad de material particulado al día (Restrepo, Izquierdo, & López, 2007).

Por último, en el año 2016, se estudió la exposición personal al material particulado menor a 2,5 micras proveniente de vías de alto tráfico en Barranquilla y se encontraron valores de exposición personal de hasta 238 µg/m³, que constituyen un riesgo para la salud (Rodríguez & Núñez, 2016).

7. Metodología

7.1. Definición de las Zonas de Estudio

Para la aplicación del Modelo IVE en este estudio, se seleccionaron 2 de las vías más transitadas según el Plan Maestro de Movilidad del Distrito (TPD & Epypsa, 2012) y de mayor relevancia en la ciudad de Barranquilla, estas son la Vía 40 y la Avenida Circunvalar.

7.1.1. Vía 40. Esta es una vía categorizada como de tipo II, o arterial según el Plan de Ordenamiento Territorial. Tiene una longitud de 8,5 km, y un ancho de 24 m. Posee doble sentido de circulación en direcciones sureste y noroeste; corre de forma paralela al margen occidental del Río Magdalena conectando diferentes zonas de la ciudad desde la carrera 46 en el sur, hasta la Avenida Circunvalar en el norte, con la cual se conecta por una glorieta que constituye el final de la Vía 40 y el Inicio de la Avenida Circunvalar. La Vía 40 presenta flujos vehiculares de hasta 2.225 vehículos por hora en su intersección de con la Avenida Murillo (Calle 45) (SDTSV, 2013). En la Figura 6 se muestra una fotografía de la vía 40.



Figura 6. Fotografía de la Vía 40.

Nota: tomado de <https://goo.gl/8jB5Aw>

7.1.2. Avenida Circunvalar. Es la única vía categorizada como de tipo I, o interregional, en la ciudad de Barranquilla, pues conecta con las carreteras nacionales y desplaza vehículos desde y hacia el interior del país. Inicia en la glorieta donde termina la Vía 40 y se extiende rodeando la ciudad hasta la calle 30 con una longitud de 19 km. En los suelos que la rodean pueden encontrarse zonas residenciales desde estrato bajo hasta estrato alto, zonas industriales, zonas de uso institucional e incluso un cementerio. Los mayores flujos vehiculares en esta vía se presentan en su intersección con la calle 30, donde pueden presentarse hasta 2.586 unidades por hora en sentido norte (SDTSSV, 2013). En la Figura 7, se muestra una fotografía de la Avenida Circunvalar.



Figura 7. Fotografía de la Avenida Circunvalar.

Nota: Tomado de <https://goo.gl/s4nwSM>

En Figura 8, se muestra el corredor que conforma la Vía 40 y la Avenida Circunvalar.

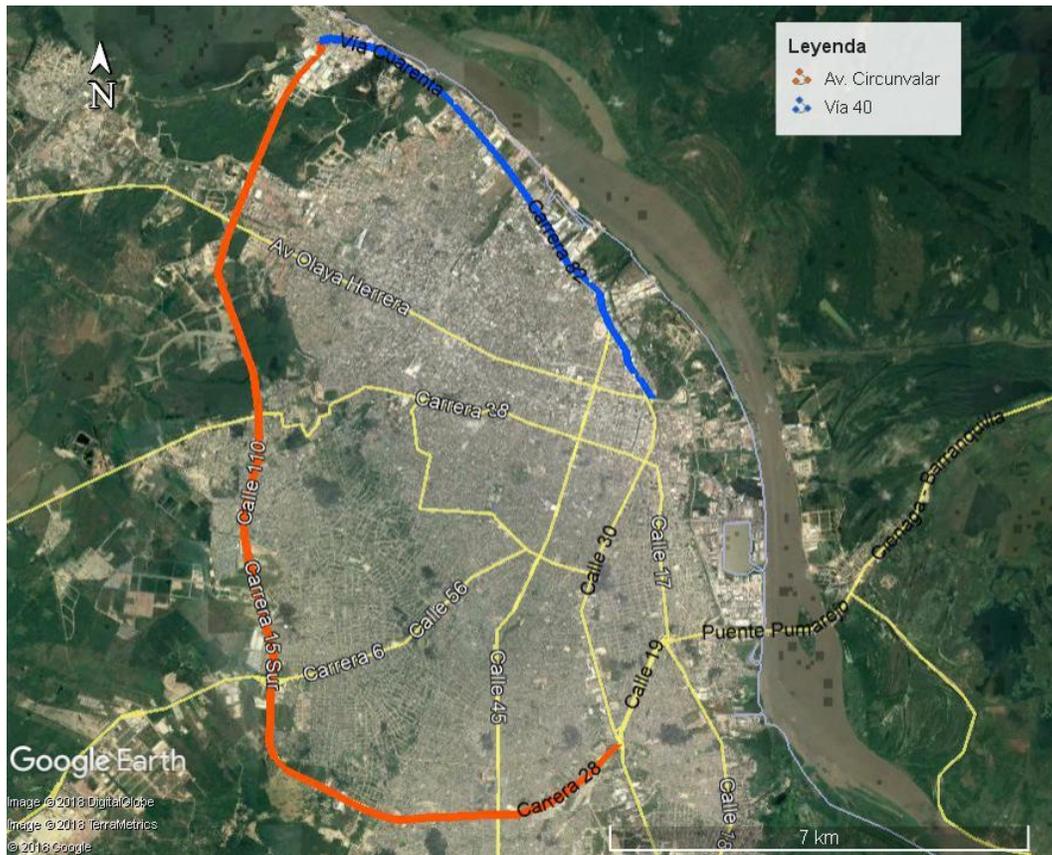


Figura 8. Corredor conformado por la Vía 40 y la Avenida Circunvalar rodeando parte de la ciudad de Barranquilla.

Nota: Tomado de Google Maps, 2018.

7.2. Manejo de los Aforos Vehiculares

Se utilizaron los datos de aforos vehiculares realizados en el año 2013 en 6 intersecciones con la Vía 40 y 5 con la Avenida Circunvalar. Estos aforos fueron tomados por la Secretaría Distrital de Tránsito y Seguridad Vial de Barranquilla, con el fin de mantener actualizadas las bases de datos de sistemas electrónicos de tránsito como los semáforos y los equipos de detección electrónica, así como para satisfacer las necesidades de profesionales la entidad u de

otras. Los aforos pueden encontrarse en la página web oficial de la Secretaría mencionada (SDTSV, 2013).

Los aforos contienen el número de vehículos que transitan por cada acceso de las vías en diferentes horas del día, en días hábiles, y están segregados en autos, buses, camiones y motocicletas, como se muestra en Figura 9. Para su uso en esta investigación, se inició por tomar solamente los vehículos que transitaban en direcciones norte-sur (NS) y sur-norte (SN) en la Avenida Circunvalar; y en las direcciones occidente-oriente (Occ-Or) y oriente-occidente (Or-Occ) en la Vía 40, los vehículos que transitaban en dirección diferentes a estas, no lo hacían por las vías estudiadas, sino que cruzaban temporalmente sobre estas, circulando por otras vías que las intersectan.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U			
1	SDB																							
2	Formato N° 4: VOLUMEN DE ARRIBOS																							
3																								
4	CONTRATO No. : DE OBRA																							
5	DIRECCION : Av Circunvalar - Cr 53 CRUCE No. : GRUPO No. : 1 (N-S)																							
6	AFORADOR : JULIO VASQUEZ No. CARRILES : 2 FECHA : 8/07/2013																							
7																								
8	HORAS																							
9	VEHICULOS				TOT	TOT	HORA	VEHICULOS				TOT	TOTA	HOR	VEHICULOS				TOT	TOT				
10	M	A	B	C	AL V.	AL V.	S	M	A	B	C	AL	L V.	AS	M	A	B	C	AL V.	AL V.				
10	7:30	9	75	20	7	137		11:45	10	32	9	22	110	374	16:00	5	12	8	21	83				
	7:45							12:00							16:15									
11	7:45	15	64	20	16	152		12:00	4	19	10	25	104	424	16:15	5	14	10	26	102				
	8:00							12:15							16:30									
12	8:00	5	50	12	13	109		12:15	6	23	8	29	115	465	16:30	12	26	6	18	89				
	8:15							12:30							16:45									
13	8:15	9	22	11	14	84	481	12:30	4	26	5	17	81	409	16:45	20	50	11	32	162	436			
	8:30							12:45							17:00									
14	8:30	4	14	10	17	79	423	12:45	5	24	9	21	97	396	17:00	29	33	13	24	134	486			
	8:45							13:00							17:15									
15	8:45	5	16	9	11	64	335	13:00	4	21	4	24	91	383	17:15	37	26	11	33	149	534			
	9:00							13:15							17:30									
16	9:00	4	20	7	9	59	285	13:15	5	20	8	20	89	357	17:30	16	20	12	15	90	534			
	9:15							13:30							17:45									
17	9:15	3	18	7	14	69	270	13:30	7	19	5	19	80	357	17:45	9	17	10	20	92	464			
	9:30							13:45							18:00									
18	9:30	5	28	11	28	123	314	13:45	8	14	4	13	59	318	18:00	10	18	8	20	89	419			
	9:45							14:00							18:15									
19	9:45	3	25	10	30	122	371	14:00	9	19	9	13	74	301	18:15	14	20	9	15	83	353			
	10:00							14:15							18:30									
20	11:00	3	14	9	8	54		14:15	6	27	10	20	100	313	18:30	10	15	7	14	69	332			
	11:15							14:30							18:45									
21	11:15	8	21	8	13	74		14:30	15	39	9	22	120	352	18:45	9	17	7	15	73	314			
	11:30							14:45							19:00									
22	11:30	8	21	6	40	137		14:45	6	17	6	21	85	378										
	11:45							15:00																
23	MAÑANA				VOLUMEN MÁX = 481				MEDIO DÍA				VOLUMEN MÁX = 465				TARDE				VOLUMEN MÁX = 534			
24					HORA MAX VC 7:30 - 8:30								HORA MAX VOL 11:30 - 12:30								HORA MAX VC 16:45 - 17:45			

Figura 9. Muestra de los aforos vehiculares tomados por la Secretaría de Tránsito.

Nota: M: motocicleta; A: autos particulares y taxis; B: buses; C: camiones. Tomado de SDTSV (2013)

Por cada hora, se obtuvieron dos aforos por categoría (auto, moto, bus, camión) en cada una de las seis intersecciones en la Vía 40, la mitad de ellos en dirección Occ-Or y el resto en dirección contraria. Los dos aforos por categoría, en cada intersección, se promediaron para obtener uno por intersección, que luego fueron promediados entre sí para tener un número que representase los vehículos de dicha categoría, en un solo carril, recorriendo los 17 km que suman los dos sentidos de la Vía 40. La misma operación se llevó a cabo con los datos de la Av. Circunvalar. Finalmente, se consiguió un conteo por categoría, cada hora entre las 7:00 y 18:00, por vía; faltando únicamente los aforos de las horas 10:00 y 15:00, que se estimaron promediando las horas inmediatamente anteriores, con la inmediatamente posterior para obtener un valor medio entre estas.

Para contar con un estimado de los camiones y buses según su tamaño que pasan por las vías, así como para tener el número estimado de taxis, se utilizaron los porcentajes que representaron estos vehículos en los conteos hechos para el trabajo “Formulación del plan maestro de movilidad del distrito de Barranquilla” en el año 2012 (TPD & Epypsa, 2012), este en su capítulo de “Tránsito y gestión del tráfico” indica que de los buses que transitan en las vías de la ciudad, el 7,5% son microbuses, el 34,4% busetas y el 58% buses grandes; respecto a los camiones, se muestra que el 30,5% son camiones de 2 ejes pequeños, el 18,6% son camiones de dos ejes grandes y el 50,8% son camiones de 3 ejes o más; sobre los taxis, se indica que del total de la categoría automóvil, el 59,3% fueron particulares y el 40,6% fueron taxis. Para encontrar el número aproximado de vehículos que transitan las Vía 40 y la Av. Circunvalar, se tomó en cuenta

la reducción en el tránsito por estas vías durante los días no hábiles, que el plan maestro de movilidad reporta es del 56% menos y 21% menos respectivamente (TPD & Eypysa, 2012).

7.3. Definición de las Tecnologías Vehiculares

Para que pueda calcularse la emisión vehicular en el Modelo IVE, se requiere también de información sobre el tipo de tecnologías que cuentan los vehículos que transitan en las vías estudiadas, la información sobre esta tecnología, que requiere el modelo se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7.

Tecnologías vehiculares por especificar para el Modelo IVE.

Tipo de combustible	Tamaño del vehículo	Alimentación del combustible	Kilometraje acumulado	Tecnología de control de emisiones	Control de emisiones evaporativas
- Gasolina	- Liviano (Lt)	- Carburador	- Menos de 79 mil Km	- Convertidor 2 vías	- Válvula de ventilación positiva (PCV)
- Diesel	- Mediano (Med)	- Inyección Monopunto (SPFI)	- Entre 80 mil y 161 mil Km	- Convertidor 3 vías	- Válvula de ventilación positiva y control en el tanque de combustible
- Gas Natural	- Pesado (Hvy)	- Inyección Multipunto (MPFI)	- Más de 161 mil Km	- Euro I - Euro II	- Control de evaporativas

Nota: Adaptado de Tolvet (2009)

Para definir las características tecnológicas de los vehículos, se usó la base de datos de la flota vehicular de la ciudad. Esta cuenta con información correspondiente al tipo de vehículo, tipo de combustible usado y año de matrícula, como se muestra en la Figura 10.

	A	B	C	D	E	F
1	CLASE	SERVICIO	COMBUSTIBL	MODELO	ESTADO	TOTA
2	AUTOMOVIL	PARTICULAR	SIN ESPECIFICAR	1985	Activo	1
3	AUTOMOVIL	PARTICULAR	SIN ESPECIFICAR	1988	Activo	1
4	AUTOMOVIL	PARTICULAR	SIN ESPECIFICAR	1989	Activo	1
5	AUTOMOVIL	PARTICULAR	SIN ESPECIFICAR	1992	Activo	1
6	AUTOMOVIL	PARTICULAR	SIN ESPECIFICAR	1996	Activo	1
7	AUTOMOVIL	PARTICULAR	SIN ESPECIFICAR	2003	Activo	1
8	AUTOMOVIL	PARTICULAR	SIN ESPECIFICAR	2004	Activo	1
9	AUTOMOVIL	PARTICULAR	SIN ESPECIFICAR	2006	Activo	2
10	AUTOMOVIL	PARTICULAR	SIN ESPECIFICAR	2007	Activo	2
11	AUTOMOVIL	PARTICULAR	SIN ESPECIFICAR	2009	Activo	1
12	AUTOMOVIL	PARTICULAR	SIN ESPECIFICAR	2011	Activo	1
13	AUTOMOVIL	PARTICULAR	SIN ESPECIFICAR	2012	Activo	1
14	AUTOMOVIL	Desconocido	GASOLINA	1949	Activo	1
15	AUTOMOVIL	Desconocido	GASOLINA	1950	Activo	3
16	AUTOMOVIL	Desconocido	GASOLINA	1951	Activo	7
17	AUTOMOVIL	Desconocido	GASOLINA	1952	Activo	6
18	AUTOMOVIL	Desconocido	GASOLINA	1953	Activo	33
19	AUTOMOVIL	Desconocido	GASOLINA	1954	Activo	46
20	AUTOMOVIL	Desconocido	GASOLINA	1955	Activo	198
21	AUTOMOVIL	Desconocido	GASOLINA	1956	Activo	214
22	AUTOMOVIL	Desconocido	GASOLINA	1957	Activo	103
23	AUTOMOVIL	Desconocido	GASOLINA	1958	Activo	22
24	AUTOMOVIL	Desconocido	GASOLINA	1959	Activo	26

Figura 10. Muestra de la base de datos de vehículos matriculados en Barranquilla.

Nota: tomado de TPD & Epyrsa (2012)

La base de datos del parque automotor contiene un total de 17 clases vehiculares con un total de 121.244 unidades registradas hasta el año 2012. Según los aforos vehiculares, por las vías seleccionadas sólo se registró el paso de autos, buses, camiones y motocicletas, por lo que sólo se usaron las clases de vehículos correspondientes, como se muestra en la Tabla 8, con la selección de sólo estas categorías y la eliminación de unidades que carecían de información sobre tipo de servicio y combustible usado, se obtuvo una base de 119.707 vehículos hasta el año 2012, que corresponde de al 98.7% de todos los vehículos registrados hasta ese mismo año.

Tabla 8.

Clases de la base de datos agrupadas.

Clase utilizada	Nombre en Modelo IVE	Nombre en base de datos	Unidades
Autos particulares	Auto/sml Truck	Automóvil, Camioneta, Campero Particular	64570
Taxis	Auto/sml Truck	Automóvil, Camioneta, Campero Público	11973
Moto	Sml Engine	Motocicletas	31805
Bus	Bus/Truck	Microbús, buseta, bus	6763
Camión	Bus/Truck	Camión, volqueta, tracto/camión	4615
Total			119726

Notas: sml significa pequeño (small). Adaptado de TPD & Epypsa (2012)

7.3.1. Automóviles. en este punto, se necesita también de una segregación de los vehículos según su tamaño, y su uso, por eso, se asumió que, en la categoría automóvil, las camionetas corresponden los pesados, los camperos a los livianos y los registrados simplemente como automóvil son livianos.

7.3.2. Taxis. todas las camionetas, camperos y automóviles de uso público se asumieron como taxis pesados, medianos y livianos respectivamente. Por otro lado, para determinar el número de taxis que para el año 2013 utilizaban gas natural vehicular (GNV) como combustible, se tomaron en cuenta los porcentaje de 90% GNV y 10% gasolina reportado por actores del transporte público individual en la ciudad (Sourdis, 2013) en el año 2013 y el reportado por (TPD & Epypsa, 2012) según una encuesta realizada a empresas de transporte público individual en la

ciudad, donde se aseguró que el porcentaje de vehículos que utilizan gas natural era del 80% para el año 2012.

7.3.3. Buses. entre los buses, las busetas y microbuses se tomaron como medianos y livianos respectivamente, mientras que aquellos simplemente registrados con la etiqueta de buses, se tomaron como buses pesados.

7.3.4. Camiones. ya que las clases de camiones no contaban con etiquetas que llevaran a una clara clasificación por tamaño, se usaron los porcentajes de camiones según su tamaño, registrados a nivel nacional en la clasificación del transporte en Colombia realizada por el Ministerio de Transporte en el año 2005 (Mintransporte, 2005), donde se muestra el número de camiones según su tamaño y/o ejes, matriculados en Colombia desde el año 1900 hasta el año 2003, teniendo en cuenta también la tabla Peso Bruto Vehicular máximo para los camiones en la Resolución 1782 de 2009 del Ministerio de Transporte. También se utilizaron los porcentajes de camiones livianos, medianos y pesados a nivel nacional del “Análisis de Emisiones del Parque de Camiones de Colombia (Sistemas Sustentables, 2012) (ver Anexo 4). Igualmente se asignó el uso de combustibles según estadísticas nacionales mostradas en (Correa et al., 2013).

7.3.5. Motos. para definir la distribución por tamaño del parque de motocicletas, se tuvieron en cuenta los reportes realizados por diferentes publicaciones, como la de Granada (2009), indicando que, en el 2009, el 97% de las motocicletas en Colombia, tenían un cilindraje menor a los 200 cc, que corresponde a motocicletas medianas (hasta 100 cc) y livianas (de 100 cc hasta 300 cc) según la clasificación del modelo IVE. También, según cifras del Comité de Ensambladoras Japonesas (CEDE, 2011), en el año 2010 las ventas de motocicletas en el año estuvieron distribuidas según su cilindraje en 49% livianas, 43% medianas y 8% restante entre pesadas y no especificadas. Por otro lado, según Toro et al. (2013) en el 2015 en el área de

jurisdicción del Área Metropolitana del Valle de Aburrá la flota de motos estaba conformada en un 31% por motocicletas de menor o igual cilindraje a 100 cc, el 66% eran de cilindraje mayor a 100 cc y menor a 300 cc y el 3% de cilindraje mayor a 300 cc. Con estos datos asumió el porcentaje de motocicletas livianas como 40%, el de medianas como 55% y el de pesadas como 5%. Para el uso de motocicletas con motor de 2 tiempos y 4 tiempos, dada la falta de información distrital y nacional, se tuvieron en consideración los porcentajes reportados por Rojas (2015) en la jurisdicción de la CAR Cundinamarca, que son del 38% para motos de 2 tiempos y de 62% para motos de 4 tiempos.

Para segregar los vehículos según el uso de las tecnologías mostradas en la Tabla 7, se utilizó un calendario de introducción de tecnologías vehiculares y de propiedades de los combustibles a través de los años en el país de la Figura 11, se asume que un vehículo matriculado en la ciudad en un año específico poseerá la tecnología que, según el calendario, era la que en ese momento se estaba introduciendo en el país.

Propiedades de los combustibles y categoría vehicular		<90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14
Gasolina	Plomo	Con Pb	Ninguno																							
	Azufre (ppm)	1000																			300					
	Benceno (% Vol)	0.7																								
	Etanol (% Vol)	Ninguno																10								
	Control Aire/Combustible	Carburador	SPFI							MPFI																
	Control de emisiones evaporativas	Ninguno								Canister	PCV/Canister															
	Control de emisiones de escape	Ninguno								Catalizador de 2 o 3 vías											Euro II	Euro III				
Diésel	Azufre (ppm)	5000	4500							4000					500	50										
	Biodiésel (% Vol)	No																					2			
	Dispositivo de mezcla aire/combustible	Iny. Pre Cámara								Inyección directa											Common Rail (FL)					
	Control de emisiones de escape	Pre Euro – EPA 1998								Euro I											Euro II/Euro	Euro IV				

Figura 11. Calendario de introducción de tecnologías vehiculares a Colombia.

Nota: adaptado de Toro et al. (2013)

En la clasificación por tecnologías en el Modelo IVE, se designaron los autos particulares y taxis a gas natural como tecnologías de combustible NG Retrofit que corresponde a los autos particulares con capacidad de trabajar con dos diferentes combustibles, usualmente gasolina y gas.

7.3.6. Factores de actividad vehicular. La información sobre los kilómetros que recorre cada clase de vehículo anualmente se tomó de el plan maestro de movilidad del año 2012, donde se recopiló información arrojada por diferentes concesionarios. Según esto, anualmente un auto particular recorre alrededor de 20.000 km, los taxis y buses 100.000 km y los camiones 30.000 km. Si bien no se muestra una metodología específica para el cálculo de los factores de actividad, estos son similares a los documentados en otras regiones del país (Toro et al., 2013)(Rojas, 2015), a excepción del factor de actividad asignado a los buses y taxis, que difiere mucho de el de otras ciudades, como los factores de actividad en la jurisdicción de la CAR Cundinamarca (63.000 km bus y 45.000 km taxi) y los del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (61.000 km y 43.000 km, respectivamente). Por lo que se optó por un factor de actividad de 80.000 km anuales para taxis y buses, más equilibrado entre el reportado por la autoridad local y por las investigaciones en otras regiones. Estos factores se resumen en la Tabla 9.

Tabla 9.

Factores de actividad vehicular anuales asignados a las diferentes categorías.

Clase de auto	Clase modelo IVE	Actividad anual (km/año)
Autos part.	Auto/sml Truck	20.000
Taxis	Auto/sml Truck	80.000
Bus	Bus/Truck	80.000
Camiones	Bus/Truck	30.000
Motos	Sml Engine	20.000

Nota: adaptado de (TPD & Epypsa, 2012)

Los factores de actividad vehicular se utilizan para definir a qué edad los vehículos alcanzan los límites de kilometraje que definen a los automóviles, buses, taxis y camiones nuevos (menos de 79.000 km), de kilometraje medio (entre 79.000 y 161.000 km) y los antiguos (más de 161.000 km), y a las motocicletas nuevas (menos de 25.000 km) (Tabla 10.), de kilometraje medio (entre 25.000 y 50.000 km) y las antiguas (más de 50.000 km) (

Tabla 11.).

Tabla 10.

Clases vehiculares del Modelo IVE con sus correspondientes clases vehiculares del parque automotor y los años que les toma alcanzar los límites de kilometraje.

Clase IVE	Clase del parque	<79 Kkm	80-161Kkm	>161Kkm
años en alcanzar límites				
Auto/sml Truck	Auto particular	<4	4 - 8	>8
Auto/sml Truck	Taxis	<1	1 - 2	>2
Bus/Truck	Bus	<1	1 - 2	>2
Bus/Truck	Camiones	<3	3 - 5	>5

Nota: adaptado de Davis & Tolvet (2008)

Tabla 11.

Años que le toma a las motocicletas alcanzar los límites de kilometraje.

Clase IVE	Clase del parque	0-25Kkm	25-50Kkm	>50Kkm
años en alcanzar límites				
Sml Engine	Motos	<1	1 - 3	>3

Nota: sml engine: motor pequeño. adaptado de Davis & Tolvet (2008)

7.4. Variables de Conducción

7.4.1. Patrones de conducción. Para obtener el patrón de conducción de los vehículos a estudiar, se realizó una campaña de medición de los patrones de conducción de las diferentes categorías vehiculares estudiadas, como se indica en el Anexo B del manual de usuario del Modelo IVE. La medición se realizó con un módulo GPS marca Garmin, modelo eTrex® 10, propiedad de la Universidad de la Costa, registrando el posicionamiento del vehículo en cada segundo, durante su recorrido por las vías estudiadas, tanto en horas valle, que son aquellas donde menos tráfico se presenta en las vías; como en horas pico, horas en las que hay mayor afluencia vehicular. Se realizó un recorrido por cada categoría vehicular para la Vía 40 y para la Av. Circunvalar, a excepción de los camiones en ambas vías durante horas pico debido a la mayor dificultad que representa la grabación de estos recorridos, por lo que se optó por utilizar el recorrido de los autos en hora pico, pues a esta hora ambas categorías transitan a velocidades relativamente similares. En total se realizaron 18 recorridos.

Las mediciones se realizaron en días sin lluvia y poca nubosidad, pues los días lluviosos afectan los patrones de conducción y el registro de datos del módulo GPS. Las mediciones en los diferentes vehículos se realizaron como se indica en la Tabla 12.

Luego de hacer el recorrido por las vías, se obtiene del dispositivo GPS un archivo .gpx, con datos segundo a segundo de la latitud, longitud, altura y la hora, estos se utilizaron para generar la distribución en los 60 bins o puntos que se basan en 20 categorías de VSP (potencia específica vehicular) y 3 de estrés del motor, el significado de los diferentes bins y los estados de estrés puede verse en el Anexo 5 y el Anexo 6. Para calcular el VSP y el estrés del motor, es necesario, además de la altura, disponer también de la velocidad instantánea del vehículo, para esto se convirtieron los archivos, a través de la herramienta *on line* GPS Visualizer, desarrollada

por Adam Schneider, afiliado a la *Social Science Division* de la Universidad de California. La herramienta convierte los archivos .gpx a archivos .txt que incluyen la velocidad. Con la velocidad segundo a segundo se definió la aceleración en cada instante, luego con estos dos factores y la altitud se calculó el VSP segundo a segundo utilizando la ecuación 5 y 6.

Tabla 12.

Fechas de registro de los patrones de conducción en las diferentes categorías vehiculares.

Categoría	Av. Circunvalar	Vía 40	Horario
Bus	09-abr-18	09-abr-18	Valle
	21-may-18	21-may-18	Pico
Moto	10-abr-18	10-abr-18	Valle
	11-jul-18	11-jul-18	Pico
Auto Particular	10-abr-18	10-abr-18	Valle
	23-may-18	12-jul-18	Pico
Camión	02-feb-18	10-jul-18	Valle
	23-may-18	12-jul-18	Pico
Taxi	31-ene-18	16-mar-18	Valle
	30-ene-18	10-jul-18	Pico

Nota: elaboración propia.

$$VSP = v[1.1a + 9.81(\tan^{-1}(\sin(\text{pendiente}))) + 0.132] + 0.000302v^3 \quad (\text{Ec. 5})$$

$$\text{pendiente} = (h_{t=0} - h_{t=-1}) / v_{t=-1} t_{00} \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde v es la velocidad (m/s), a la aceleración (m/s²) y h la altitud (m).

Después de esto se calculó el estrés del motor, que requiere de la potencia prepromedio, y el índice de RPM, según la ecuación 7. La potencia prepromedio, se obtiene promediando el VSP de 25 a 5 segundos antes para cada instante como se muestra en la ecuación 8. Y el índice de RPM se calcula con la velocidad y el factor denominado divisor de velocidad (ecuación 9), que se asigna dependiendo una serie de categorías de velocidad y VSP como se muestra en la Tabla 13.

$$\text{Estrés del motor} = \text{RPM Index} + (0.08\text{ton/KW}) \times \text{Poder prepromedio} \quad (\text{Ec. 7})$$

$$\text{Poder prepromedio} = \text{Promedio (VSP}_{t=-5} \text{ a } t=-25)\text{KW/ton} \quad (\text{Ec. 8})$$

$$\text{RPM Index} = \text{Velocidad}_{t=0} / \text{Divisor de velocidad} \quad (\text{Ec. 9})$$

Tabla 13.

Puntos de corte de velocidad y de poder usados en el cálculo del Índice de RPM

Cortes de velocidad (m/s)		Cortes de poder (KW/ton)		Divisor de velocidad (s/m)
min	max	min	max	
0,0	5,4	-20	400	3
5,4	8,5	-20	16	5
5,4	8,5	16	400	3
8,5	12,5	-20	16	7
8,5	12,5	16	400	5
12,5	50	-20	16	13
12,5	50	16	400	5

Nota: adaptado de Davis & Tolvet (2008)

Calculado el VSP y el estrés del motor, se asignaron el bin de potencia correspondiente a cada segundo. Un fragmento de los límites para asignar los bins de potencia se muestran en la Tabla 14. La tabla completa puede encontrarse en el Anexo 7.

Tabla 14.

Límites para asignación de bins según valor de VSP y estrés del motor.

Bin	VSP (KW/Ton)		Estrés del motor	
	menor	mayor	menor	mayor
8	-15,2	-11,1	-1,6	3,1
9	-11,1	-7,0	-1,6	3,1
10	-7,0	-2,9	-1,6	3,1
11	-2,9	1,2	-1,6	3,1
12	1,2	5,3	-1,6	3,1
13	5,3	9,4	-1,6	3,1
14	9,4	13,6	-1,6	3,1
15	13,6	17,7	-1,6	3,1
16	17,7	21,8	-1,6	3,1
17	21,8	25,9	-1,6	3,1
18	25,9	30,0	-1,6	3,1

Nota: adaptado de Davis & Tolvet (2003)

7.4.2. Patrones soak. Se utilizaron los patrones de encendido reportados por el inventario de emisiones vehiculares realizado en Bogotá (Girardo, 2005). Según este estudio, estos se muestran en la Tabla 15. Estos patrones representan el tiempo que han pasado los vehículos apagados, antes del encendido (Nicol Davis & Tolvet, 2003a). En horas de la mañana, al comenzar la jornada, un mayor porcentaje de vehículos llevan entre 12 y 18 horas apagados.

Tabla 15.

Distribución del tiempo de que ha pasado antes de encender el vehículo en las diferentes horas del día.

Hora	Tiempo antes de encendido									
	15 min	30 min	1 h	2 h	3 h	4 h	6 h	8 h	12 h	18 h
7	24,8%	8,0%	3,2%	3,2%	1,6%	0,0%	0,8%	2,4%	22,4%	33,6%
8	33,3%	13,6%	3,7%	8,0%	3,1%	1,2%	0,6%	0,6%	8,6%	27,2%
9	33,3%	13,6%	3,7%	8,0%	3,1%	1,2%	0,6%	0,6%	8,6%	27,2%
10	32,6%	15,5%	15,0%	13,9%	5,9%	3,2%	2,1%	2,1%	2,1%	7,5%
11	32,6%	15,5%	15,0%	13,9%	5,9%	3,2%	2,1%	2,1%	2,1%	7,5%
12	30,8%	12,3%	18,1%	15,0%	2,6%	3,5%	4,8%	0,9%	1,3%	10,6%
13	30,8%	12,3%	18,1%	15,0%	2,6%	3,5%	4,8%	0,9%	1,3%	10,6%
14	30,5%	9,6%	12,7%	15,7%	5,6%	3,0%	4,6%	4,6%	6,6%	7,1%
15	30,5%	9,6%	12,7%	15,7%	5,6%	3,0%	4,6%	4,6%	6,6%	7,1%
16	22,5%	14,4%	13,9%	11,2%	8,0%	7,5%	4,3%	1,1%	10,7%	6,4%
17	22,5%	14,4%	13,9%	11,2%	8,0%	7,5%	4,3%	1,1%	10,7%	6,4%
18	26,5%	8,5%	12,8%	10,0%	9,0%	4,3%	10,0%	1,9%	7,1%	10,0%

Nota: adaptado de Girardo (2005)

7.4.3. Uso de aire acondicionado. El modelo requiere el porcentaje de autos que usarían aire acondicionado para una temperatura de 27 °C. Este valor, se asume es del 80% de la flota de vehículos particulares y taxis, 10% para los buses y 20% para los camiones.

7.5. Información de Variables Locales y Calidad de los Combustibles

7.5.1. Variables locales. Las variables por definir en esta sección son la temperatura, la humedad relativa y la altitud. Para esto, se consultaron los valores medios multianuales para el mes de octubre (mes en el cual se realizaron los aforos) de humedad y temperatura, registrados por el IDEAM desde el año 1981 al 2010 (IDEAM, 2015). Las fuentes consultadas para las diferentes variables se muestran en la Tabla 16. La altitud de la zona fue registrada junto con los datos de localización segundo a segundo de los vehículos de las categorías estudiadas.

Tabla 16.

Variables locales y las fuentes de dónde fueron tomadas.

Variable	Valor	Fuente
Temperatura ambiente	27,6°C	IDEAM
Humedad en el ambiente	81%	IDEAM
Altitud	25	Lecturas GPS

Nota: adaptado de Davis & Tolvet (2003a)

7.5.2. Programa de inspección y mantenimiento. El programa de inspección y mantenimiento se realiza en los Centros de Diagnóstico Automotor y los requisitos se encuentran especificados en las Norma Técnica Colombiana NTC 5375 (ICONTEC, 2006), está definido como programa ralenti descentralizado. El dato es solicitado en las características de localidad en el Modelo IVE.

7.5.3. Calidad de los combustibles. Las características de los combustibles en Colombia se encuentran también en el calendario de la Figura 11. Las variables de la calidad de los combustibles necesarios para el cálculo en el Modelo IVE se resumen en la

Tabla 17.

Tabla 17.

La calidad de los combustibles gasolina y diésel en Colombia para el año 2013.

Variable	Valor
Calidad general de gasolina	moderada
Azufre en gasolina	300 ppm
Plomo en gasolina	Ninguno
Benceno en gasolina	0,70%
Calidad general del diésel	Moderada
Azufre diésel	50 ppm

Nota: adaptado de Rojas (2015), Toro et al. (2013), Castillo (2016).

7.6. Manejo del Software del Modelo IVE

En las Figura 12., Figura 13. y Figura 14 se muestra la interfaz del programa de modelación de emisiones vehiculares IVE.

La Figura 12. muestra la pestaña de ingreso de la distribución de la flota vehicular, donde se agregan las diferentes categorías seleccionándolas en la lista del índice de tecnologías vehiculares señalada con el número 1. Después de esto se indica el porcentaje que representa cada tecnología seleccionada, hasta que el total sea de aproximadamente 100%, zona con el número 2.

Archivo Idioma

Modelo Internacional de Emisiones Vehiculares

Cálculo Localidad **Flota** Ajustes Generales

Flota
 Bus Tesis

Agregar Tecnología Todos los Tipos de CO... Todas las mezclas AIR...

0 Pt: Auto/SmTk : Lt : Carb : None : PCV : <79K km

	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 1 AC	Grupo 2 AC
0 Pt: Auto/SmTk : Lt : Carb : None : PCV : <79K km				
1 Pt: Auto/SmTk : Lt : Carb : None : PCV : 80-161K km	0.01			
2 Pt: Auto/SmTk : Lt : Carb : None : PCV : >161K km	0.03			
3 Pt: Auto/SmTk : Med : Carb : None : PCV : <79K km	0.12			
4 Pt: Auto/SmTk : Med : Carb : None : PCV : 80-161K km	0.03			
5 Pt: Auto/SmTk : Med : Carb : None : PCV : >161K km	0.01			
6 Pt: Auto/SmTk : Hv : Carb : None : PCV : <79K km	8.09			
7 Pt: Auto/SmTk : Hv : Carb : None : PCV : 80-161K km	0.67			
971 NG: Tk/Bus : Hv : Carb/Mx : None : PCV : >161K km	0.02			
968 NG: Tk/Bus : Med : Carb/Mx : None : PCV : >161K km	0.16			
965 NG: Tk/Bus : Lt : Carb/Mx : None : PCV : >161K km	0.15			
933 Pt: Tk/Bus : Hv : FI : EuroII : PCV : <79K km	0.02			
930 Pt: Tk/Bus : Med : FI : EuroII : PCV : <79K km	0.1			
927 Pt: Tk/Bus : Lt : FI : EuroII : PCV : <79K km	0.06			
907 Pt: Tk/Bus : Hv : FI : 3Wy : PCV : 80-161K km	0.01			
904 Pt: Tk/Bus : Med : FI : 3Wy : PCV : 80-161K km	0.01			
901 Pt: Tk/Bus : Lt : FI : 3Wy : PCV : 80-161K km	1.01			
908 Pt: Tk/Bus : Hv : FI : 3Wy : PCV : >161K km	1.1			
905 Pt: Tk/Bus : Med : FI : 3Wy : PCV : >161K km	0.44			
902 Pt: Tk/Bus : Lt : FI : 3Wy : PCV : >161K km	2.0			
1132 Ds: Tk/Bus : Hv : FI : EuroII : None : 80-161K km	3.73			
1131 Ds: Tk/Bus : Hv : FI : EuroII : None : <79K km				

99.99% + 0.0% = 99.99% Normalización

Figura 12. Pestaña de introducción de la flota en el programa del modelo IVE.

Nota: tomada del programa IVE Model.

Figura 14. Pestaña de cálculo de las emisiones en el programa del modelo IVE.

Nota: tomada del programa IVE Model.

8. Resultados y Análisis

8.1. Manejo de los Aforos Vehiculares

De los aforos realizados en las 6 intersecciones con la Vía 40 y las 5 intersecciones con la Avenida Circunvalar se obtuvieron los resultados promedios por hora que se muestran en la Figura 15. Luego de cruzar estos aforos con los porcentajes de subcategorías encontrados en el Plan Maestro de Movilidad de Barranquilla (TPD & Epypsa, 2012), se estimó que en promedio, el total de vehículos que circulan por la vía Circunvalar en los días hábiles se distribuyen como se muestra en la Figura 16.. A su vez, la Figura 17. muestra las horas de mayor flujo vehicular en la Vía 40, y en promedio el total de vehículos que circulan por la vía 40 en los días hábiles se distribuye como se muestra en la Figura 18. Con los aforos, se encontró que por la Avenida Circunvalar pueden circular de 10% a 37% más vehículos que por la Vía 40, esto naturalmente relacionado a que la primera es una vía de categoría I con más capacidad de circulación, mientras que la segunda es de categoría II. En la Avenida Circunvalar donde se destacan las horas 7 y 8 am, y las 5 y 6 de la tarde como las de mayor flujo, a diferencia de la Vía 40, donde además de esas, destaca el medio día por un aumento significativo del flujo vehicular, posiblemente relacionado a la concentración de lugares de trabajo, pues es a esta hora cuando los empleados tienen su descanso. En ambas vías los autos particulares y los taxis constituyen más del 60% de la flota vehicular, pero en la Vía 40 el porcentaje que conforman estos vehículos es del 71%, a diferencia de la Circunvalar que es del 61%. Respecto a los buses, en la Vía 40 también se presenta un mayor porcentaje (7,24%), que en la circunvalar (5,76%), esto posiblemente se deba también a la concentración de sitios de trabajo y que además la Vía 40 está directamente rodeada en algunos tramos por zonas residenciales. Por otro lado, en la Avenida Circunvalar se presenta un mayor porcentaje camiones y de motocicletas.

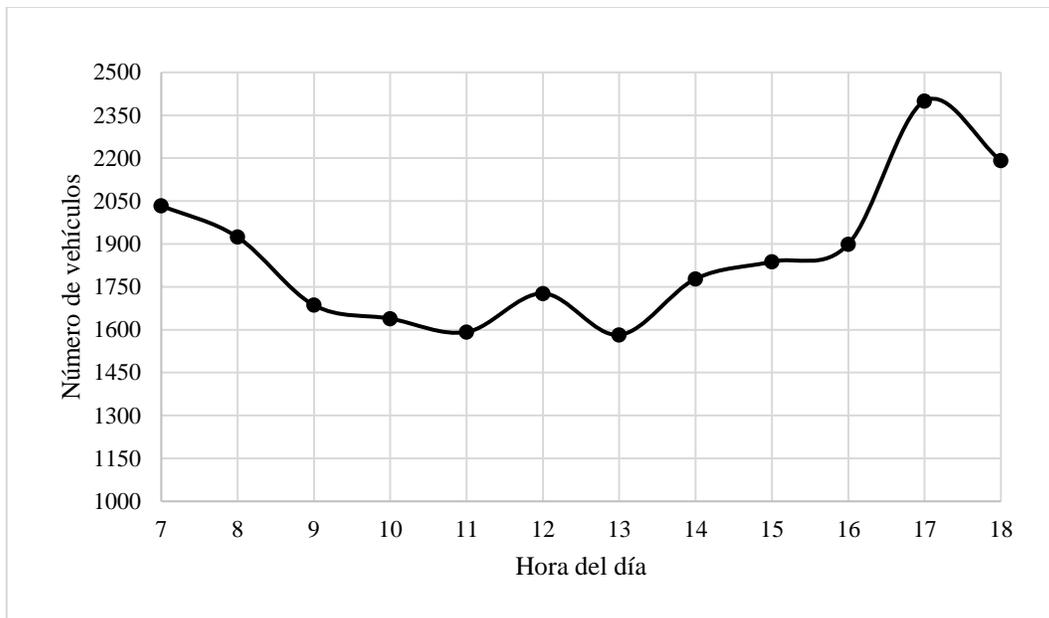


Figura 15. Flujo vehicular por hora en la Avenida Circunvalar.

Nota: Elaboración propia.

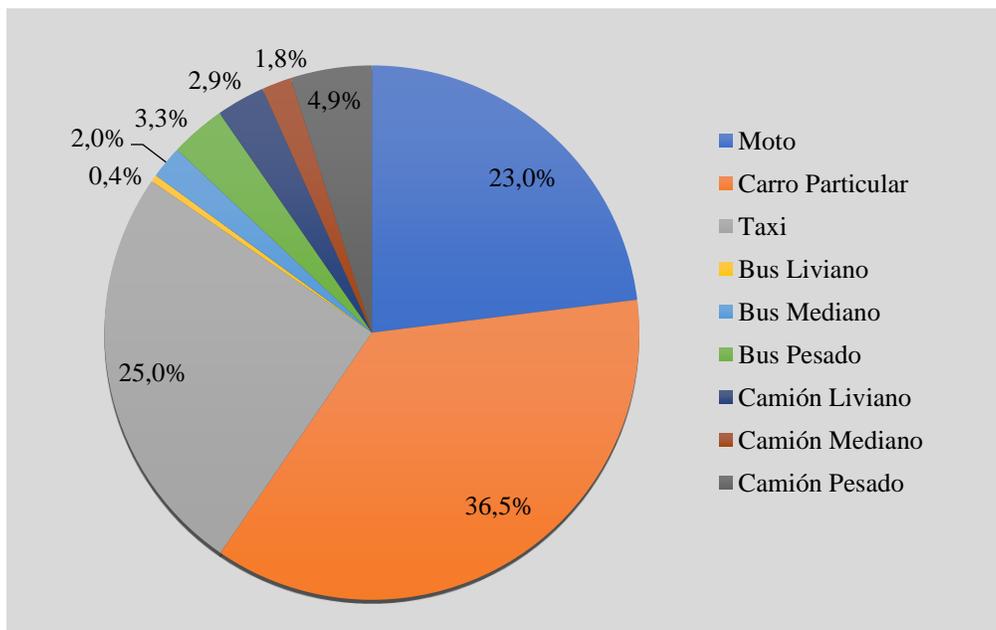


Figura 16. Distribución promedio de la flota diaria en la Avenida Circunvalar.

Nota: Elaboración propia.

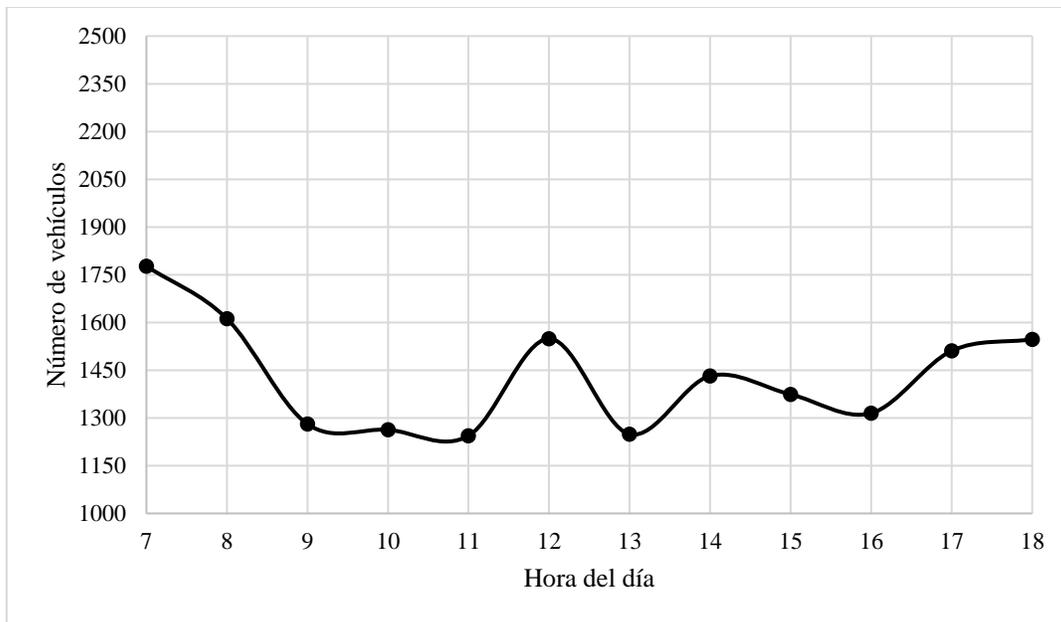


Figura 17. Flujo vehicular por hora Vía 40.

Nota: Elaboración propia.

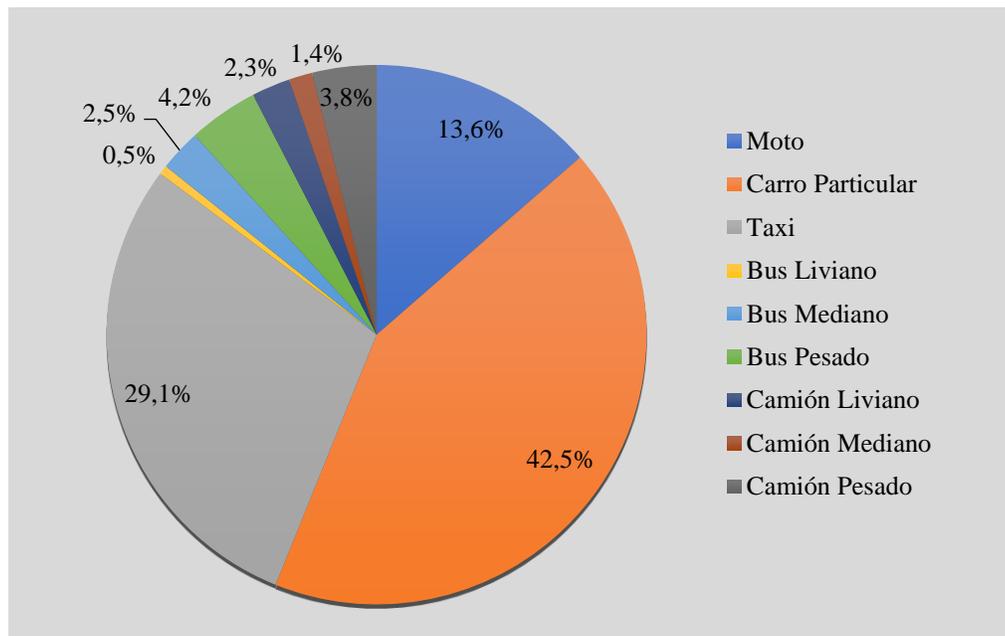


Figura 18. Distribución promedio de la flota diaria en la Vía 40.

Nota: Elaboración propia

8.2. Definición de las Tecnologías Vehiculares

8.2.1. Autos particulares. Para el año 2013, la flota de automóviles particulares en la ciudad estaba constituida principalmente por automóviles livianos en un 67%, seguido de los pesados (camionetas) y los medianos (camperos). Se encontró que en los autos particulares predomina el uso de gasolina en vehículos livianos, medianos y pesados, aunque su uso disminuye al aumentar el peso del vehículo, dándole paso al diésel, como se muestra en la Figura 19.

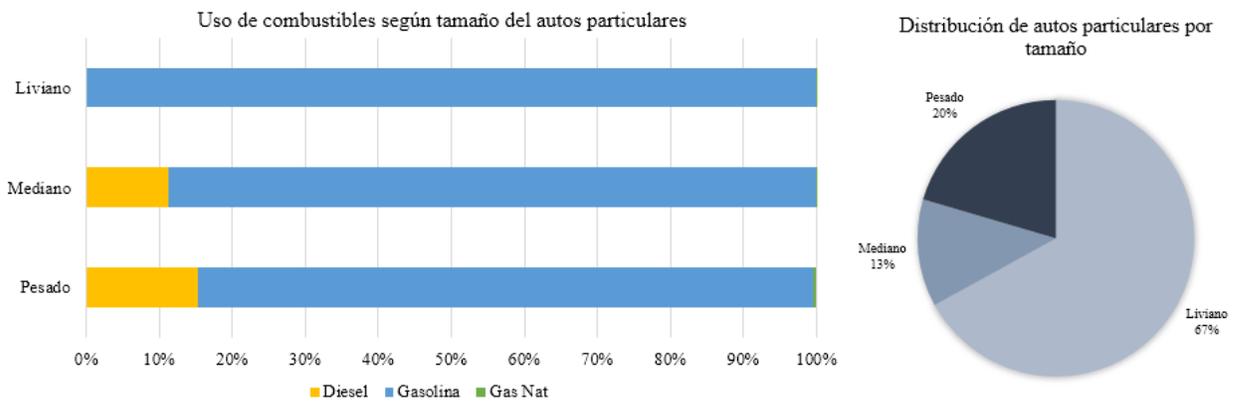


Figura 19. Distribución de autos particulares por tamaño y uso de combustible.

Nota: Elaboración propia con datos de TPD & Eypysa (2012).

En estos vehículos el uso de gas natural es notoriamente bajo comparado con el 7,6% de vehículos particulares que usan gas, reportados en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá en el año 2013 (Toro et al., 2013).

El 97% de los autos particulares tenían entre 1 y 30 años, casi la mitad (47%) tenía para entonces, de 1 a 5 años, y sólo en el año anterior, el 2012, se habían matriculado el 13% de la flota estudiada. La completa distribución de edad de los vehículos particulares estudiado se muestra en el Anexo 8.

En comparación, la flota de autos particulares nacional, para el año 2013, casi el 7% de los autos particulares se habían matriculado en el año 2012 y el 28% tenía entre 1 y 5 años (Mintransporte, 2015) mostrando que el parque de autos particulares en Barranquilla era más moderno, para el momento.

En lo que respecta a tecnologías vehiculares de control de la mezcla de aire y combustible, así como de control de los gases de escape, se encontró que según los años modelo y el calendario de introducción de tecnologías vehiculares en Colombia (Figura 11), el 59,5% de los autos particulares deben poseer sistema de control de la mezcla tipo inyección multipunto con control de gases de escape tipo catalizador de 3 vías, seguido por los sistemas de inyección multipunto con estándar de emisión Euro II y los sistemas de inyección mono punto sin tecnología de catalizador, como se muestra en la Tabla 18.

Tabla 18.

Tecnologías vehiculares definidas para los autos particulares.

Categoría vehicular	Combustible	Control Aire/combustible	Control de gases de escape	Cantidad	Porcentaje en categoría vehicular
Auto particular	Diésel	Inyección precámara	Ninguno	17	0,03%
		Inyección precámara	Mejorado	47	0,07%
		Inyección directa	Recirculador + Mejorado	1687	2,61%
		Inyección Common Rail	EuroII	1232	1,91%
	Gasolina	Carburador	Ninguno	6067	9,40%
		Inyección Monopunto	Ninguno	7264	11,25%
		Inyección Monopunto	2 vías	1752	2,71%
		Inyección Multipunto	3 vías	38461	59,56%
		Inyección Multipunto	EuroII	7942	12,30%
		Carb/Mezclador	Ninguno	41	0,06%
		Gas Natural	Carb/Mezclador	2 vías	7
Carb/Mezclador	3 vías		53	0,08%	

Nota: elaboración propia a partir de datos de TPD & Epypsa (2012).

En comparación, en el inventario de emisiones del año 2015 en la jurisdicción de la CAR Cundinamarca (Rojas, 2015), se encontró un porcentaje de uso de la tecnología inyección multipunto y catalizador de 3 vías de 41% en autos particulares, seguido del 41% de uso de carburador sin catalizador. También en la ciudad de Cali, la inyección multipunto es definida como la tecnología de mezcla de mayor uso en los vehículos particulares (González, 2017).

8.2.2. Taxis. La flota de taxis en el año 2013 estaba conformada principalmente por autos livianos (88%) y taxis pesados (camionetas) con casi el 12%, mientras que los autos medianos (camperos), tan sólo representaban el 0,1% de los vehículos. Tanto en autos livianos como en medianos, el uso de gasolina y de gas natural son del 10% y 90% respectivamente, porcentajes que disminuyen en los taxis pesados debido al aumento en el uso del diésel (32%), dejando al gas natural y la gasolina en 7% y 61%, todo esto se muestra en la Figura 20.

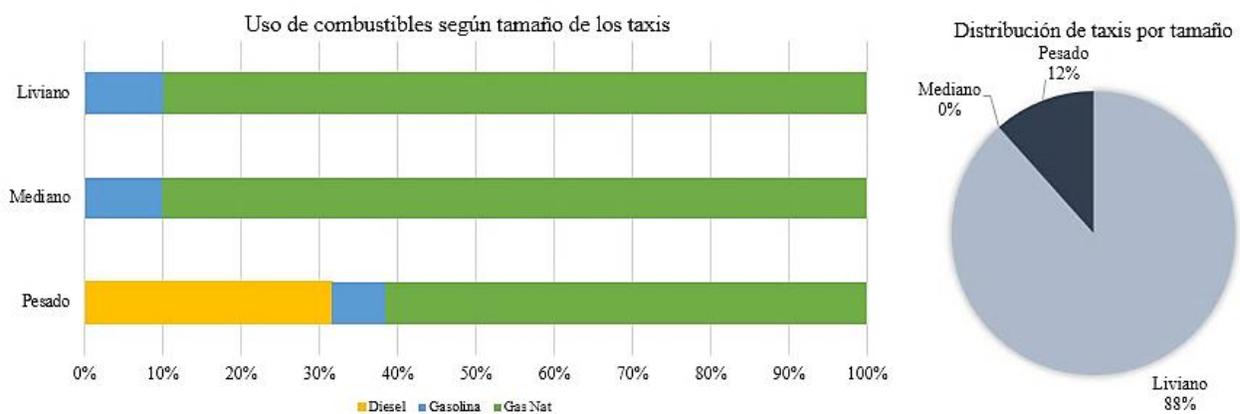


Figura 20. Distribución de taxis por tamaño y uso de combustible.

Nota: elaboración propia con datos de (TPD & Epypsa, 2012).

En su distribución por edad, como lo muestra el Anexo 9, son similares a la flota de vehículos particulares, pues al igual que esta, el 13% de los vehículos fueron matriculados en el 2012, y un poco más de la mitad (52%) fueron matriculados entre 5 y 1 años anteriores al 2013.

Respecto a los 10 años anteriores al 2013, la flota de taxis es más moderna que la de autos particulares con porcentajes matriculados en ese lapso de 82% y 69% respectivamente.

En comparación al parque de taxis nacional, en el cual el 8% de los vehículos se habían matriculado en el 2012 y el 32% en los últimos 5 años (Mintransporte, 2015), el parque de taxi de la ciudad de Barranquilla es más moderno.

Debido al alto uso de gas natural vehicular en los taxis de la ciudad, la tecnología predominante de control de aire combustible es carburador/mixer que corresponde a los vehículos convertidos para utilizar este combustible. En el control de gases de escape la tecnología de mayor uso sería el catalizador de 3 vías con el 75%. En comparación, en la jurisdicción de la CAR Cundinamarca (Rojas, 2015) se reportó que la tecnología de mayor uso entre los taxis era la inyección multipunto con catalizador de 3 vías. Todas las tecnologías utilizadas en los taxis se muestran en la Tabla 19.

Tabla 19

Tecnologías vehiculares definidas para los taxis

Categoría vehicular	Combustible	Control Aire/combustible	Control de gases de escape	Cantidad	Porcentaje en categoría vehicular
Taxi	Diésel	Inyección precámara	Mejorado	12	0,10%
		Inyección directa	Recirculador + Mejorado	395	3,30%
		Inyección Common Rail	EuroII	52	0,43%
	Gasolina	Carburador	Ninguno	77	0,65%
		Inyección Monopunto	Ninguno	44	0,37%
		Inyección Monopunto	2 vías	27	0,22%
		Inyección Multipunto	3 vías	843	7,04%
		Inyección Multipunto	EuroII	160	1,34%
		Carb/Mezclador	Ninguno	1090	9,10%
		Carb/Mezclador	2 vías	242	2,02%
Gas Natural	Carb/Mezclador	3 vías	9031	75,42%	

Nota: elaboración propia a partir de datos de TPD & Epypsa (2012).

8.2.3. Buses. En la flota de buses de la ciudad se encontró que la mayoría de estos (59%) corresponden a vehículos pesados, seguido de los medianos (busetas, 17%) y por último los livianos (microbuses, 24%). Esta categoría presenta el mayor uso de diésel, con un uso del 70% en todos los vehículos, mayoritariamente en los buses medianos. Como se muestra en la Figura 21, en esta categoría destaca el uso de gas natural vehicular con un porcentaje de casi el 9%, el segundo mayor entre las categorías estudiadas. En El Área Metropolitana del Valle de Aburrá y la jurisdicción de la CAR Cundinamarca se reporta uso de gas natural en buses de 13,2% y 15% respectivamente (Toro et al., 2013)(Rojas, 2015). Aunque por el aumento del peso se esperaría también un mayor uso del diésel en los buses pesados, este disminuye en comparación con los auto medianos, dándole paso al uso del gas natural vehicular, este último tiene un uso del 14% en los buses pesados.

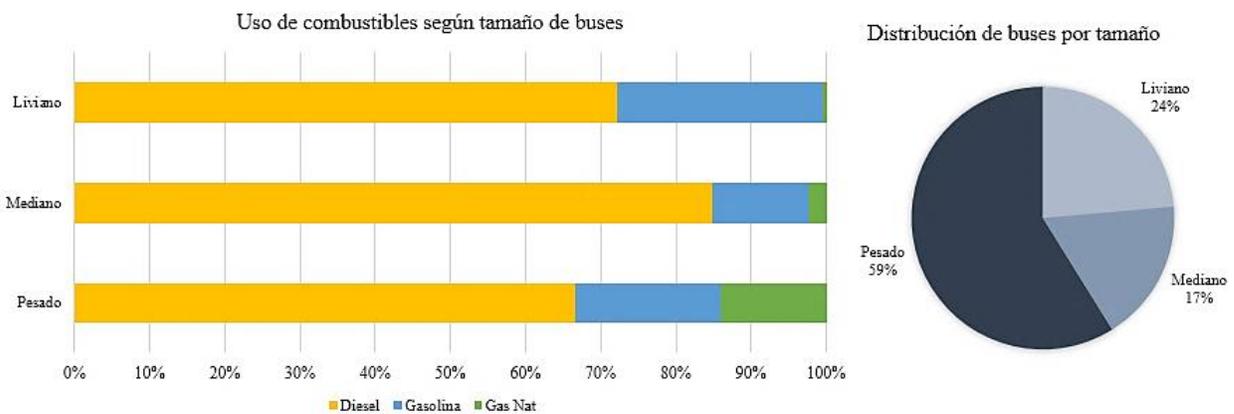


Figura 21. Distribución de buses por tamaño y uso de combustible.

Nota: elaboración propia con datos de TPD & Epypsa (2012).

La edad de los buses matriculados en la ciudad está más distribuida en los 10 años anteriores al 2013, así en el 2012 se matricularon sólo el 6% de los buses, y el 22% de los buses tienen entre 1 y 5 años, pero casi la mitad (47%) de toda la flota se encuentra matriculada desde hace 1 a 10 años, como se muestra en el Anexo 10. Aun así, la flota de buses barranquillera tiende a ser

más moderna que la flota de buses nacional, en esta, para el total de buses del año 2013, sólo el 4% fue matriculado en el 2012, y aproximadamente un tercio (34%) está matriculado entre el 2003 y el 2012 (Mintransporte, 2015).

En la Tabla 20 se muestran las tecnologías utilizadas en parque de buses. Se observa que abunda el uso de la tecnología de control de la mezcla aire/combustible tipo inyección directa. A esta tecnología se le asignó el uso de control de emisiones de escape tipo “mejorada” (*improved*), pues se desconoce el uso de sistema de recirculación de gases de escape (EGR), la segunda opción disponible para este tipo de tecnología. La inyección directa con control de emisiones mejorado en buses se reporta en la jurisdicción de la CAR Cundinamarca con 68% de uso en la categoría (Rojas, 2015).

Tabla 20

Tecnologías vehiculares definidas para los buses.

Categoría vehicular	Combustible	Control Aire/combustible	Control de gases de escape	Cantidad	Porcentaje en categoría vehicular	
Bus	Diésel	Inyección precámara	Ninguno	1192	17,67%	
		Inyección directa	Mejorado	2984	44,23%	
		Iny. Common Rail	EuroII	623	9,24%	
		Carburador	Ninguno	688	10,20%	
		Iny. Common Rail	Ninguno	371	5,50%	
		Iny. Common Rail	Cat. 2 Vías	64	0,95%	
	Gasolina	Iny. Common Rail	Cat. 3 Vías	212	3,14%	
		Iny. Common Rail	Euro II	21	0,31%	
		Carb/mezclador	Ninguno	580	8,60%	
		Gas Natural	Carb/mezclador	2 Vías/Recirculador	2	0,03%
			Carb/mezclador	3 Vías/Recirculador	9	0,13%

Nota: elaboración propia a partir de datos de TPD & Epypsa (2012).

8.2.4. Camiones. En los camiones se utilizaron promedios nacionales de matrículas de vehículos de carga para determinar el porcentaje de vehículos livianos, medianos y pesados, así como el porcentaje de uso de gasolina y diésel. Así, se estimó que la flota de camiones está conformada principalmente por vehículos livianos, seguido de los medianos y los pesados son los de menor uso. Los usos de diésel en los diferentes tamaños de vehículos se estimaron en un 60% para los vehículos livianos, 70% para los medianos y en 80% para los pesados. Lo anterior se muestra en la Figura 22.

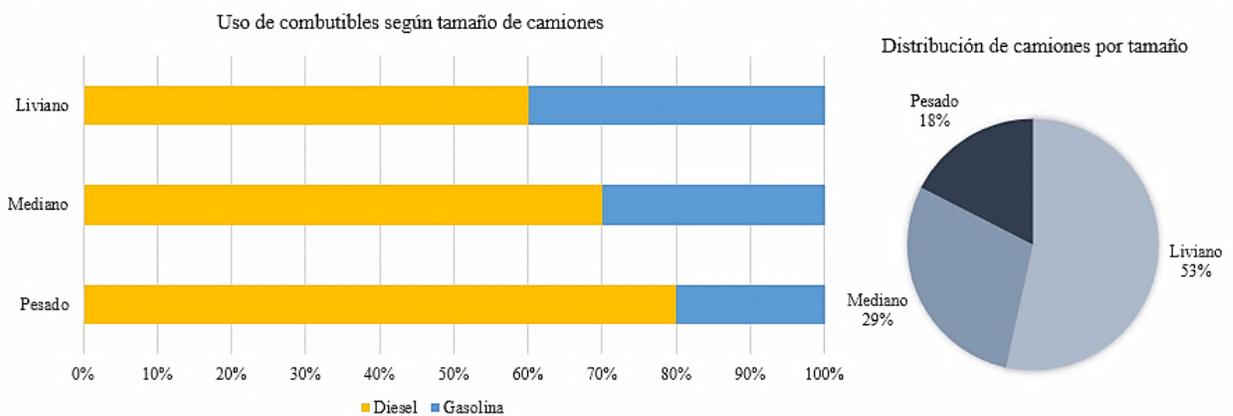


Figura 22. Distribución de camiones por tamaño y uso de combustible.

Nota: Elaboración propia con datos de TPD & Epyrsa (2012), Mintransporte (2005) y Sistemas Sustentables (2012).

Según la distribución por edad mostrada en el Anexo 11, el 33% del parque de camiones de la ciudad está constituido por modelos entre el 2008 y 2012, siendo así un poco más moderno que los camiones a nivel nacional, pues en ese mismo lapso están matriculados el 23% de estos (Mintransporte, 2015).

En la Tabla 21, se observa que al igual que en la flota de buses, la tecnología de mayor uso es la inyección directa de los vehículos a combustible diésel, a la cual se le asignó el uso de

control de emisiones mejorado. A modo de comparación, la inyección directa en la jurisdicción de la CAR Cundinamarca se reporta con un uso del 47% en la flota de camiones (Rojas, 2015).

Tabla 21.

Tecnologías vehiculares definidas para los camiones.

Categoría vehicular	Combustible	Control Aire/combustible	Control de gases de escape	Cantidad	Porcentaje en categoría vehicular
Camión	Diésel	Inyección precámara	Ninguno	1217	26,38%
		Inyección directa	Mejorado	1572	34,08%
		Iny. Common Rail	EuroII	275	5,96%
		Carburador	Ninguno	304	6,59%
	Gasolina	Iny. Common Rail	Ninguno	230	4,99%
		Iny. Common Rail	Cat. 2 Vías	62	1,34%
		Iny. Common Rail	Cat. 3 Vías	853	18,49%
		Iny. Common Rail	Euro II	100	2,17%

Nota: elaboración propia a partir de datos de TPD & Epypsa (2012).

8.2.5. Motos. La distribución por tamaño dada a las motocicletas se muestra en la Figura 23.

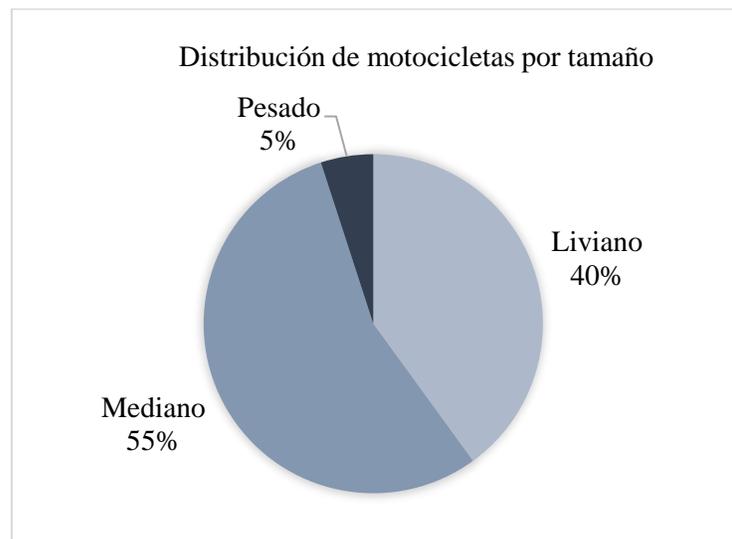


Figura 23. Distribución de motocicletas por tamaño.

Nota: elaboración propia.

Respecto a la distribución por edad que se encuentra en el Anexo 12, se encontró que el para el 2013, el 9% de las motocicletas tenían entre 1 y 5 años, mientras a nivel nacional en ese mismo año, las motocicletas entre 1 y 5 años representaban el 47% del total nacional. Aun así, en la ciudad el 74% de las motocicletas matriculadas tienen entre 1 y 10 años, mientras que, en ese mismo periodo, nacionalmente el registro alcanza un 71% del total (Mintransporte, 2015). Estas diferencias se deben a los distintos años de mayores registros de motocicletas a nivel nacional y distrital.

Tabla 22.

Tecnologías vehiculares definidas para las motocicletas.

Categoría vehicular	Combustible	Motor, Control Aire/combustible	Control de gases de escape	Cantidad	Porcentaje en categoría vehicular
Moto	Gasolina	2 ciclos	Ninguno	Ninguno	22,16%
		2 ciclos	Mejorado	Ninguno	13,38%
		4 ciclos, carburador	Ninguno	Ninguno	9,50%
		4 ciclos, carburador	Mejorado	Ninguno	53,51%
		4 ciclos, carburador	Catalizador	Ninguno	1,46%

Nota: elaboración propia a partir de datos de TPD & Epypsa (2012).

8.3. Variables de Conducción

De los 18 patrones de conducción observados, se encontró que en general la mayor parte del tiempo de conducción tienden a acumularse entre los bins 6 y 16 de la potencia vehicular con estrés bajo, como se observa en la

Figura 24, que representa la distribución de los patrones de conducción en horas valle por la avenida Circunvalar. El resto de las representaciones gráficas de los patrones de conducción de la

Av. Circunvalar en horas valle y la Vía 40 en horas pico y valle pueden encontrarse en el Anexo 13, Anexo 14 y Anexo 15.

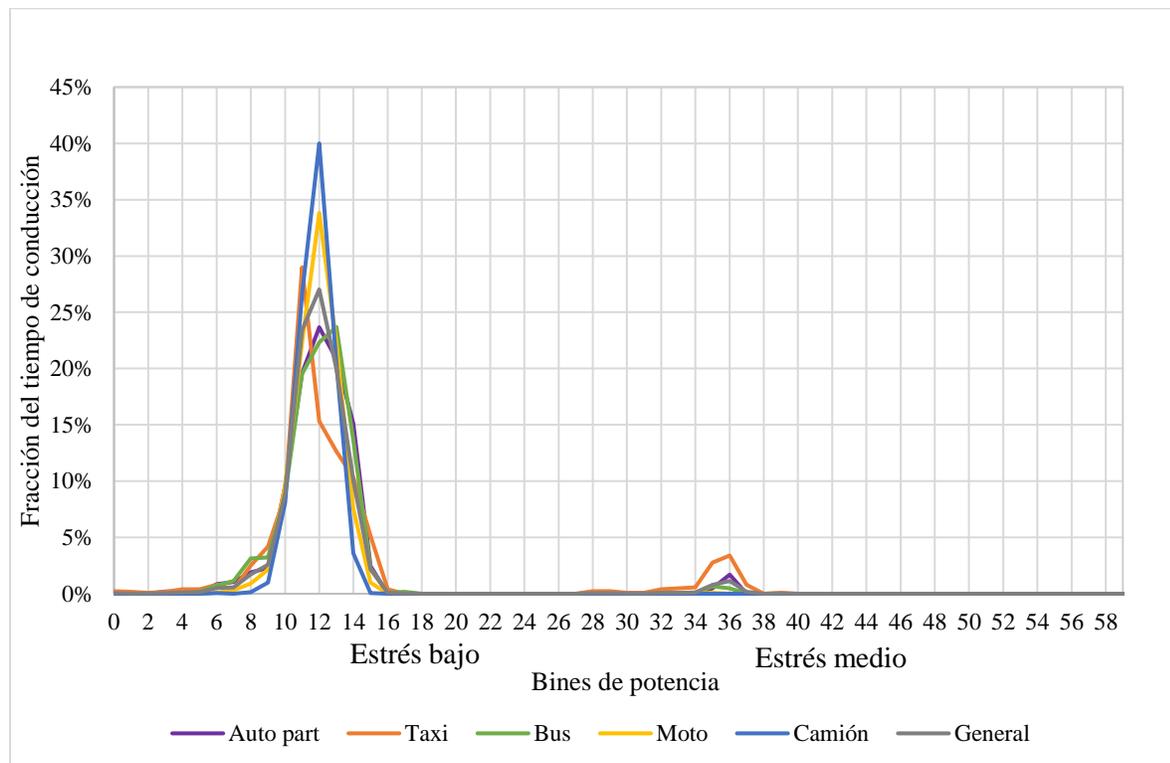


Figura 24. Distribución de los patrones de conducción en los diferentes bins de potencia para la Av. Circunvalar en horario valle.

Nota: Elaboración propia,

Se pudo observar en la distribución de los patrones de conducción en los bins de potencia que, en la mayoría del tiempo de viaje por las avenidas estudiadas, los vehículos se encuentran en un estado de potencia positiva, que está asociada a momentos en los que el vehículo acelera o sube cuestas. Como se muestra en la Figura 25, la Av. Circunvalar durante las horas valle presenta el mayor porcentaje de potencia positiva gracias a que la avenida es por si sola una vía de alta velocidad y en las horas valles la menor afluencia de vehículos permite que los automotores que circulan por esta puedan acelerar con más frecuencia para mantener

velocidades altas. Ese porcentaje disminuye en las horas pico y aumenta el porcentaje de tiempo de viaje en el que los vehículos se encuentran en condiciones de baja potencia o detenidos, pues el incremento en el número de vehículos que transitan a la vez hace que estos se vean obligados a circular a una menor velocidad o a detenerse con mayor frecuencia. El mismo comportamiento se observa en la Vía 40 durante las horas pico y horas valle. Los recorridos con menor tiempo en estado de potencia positiva y con mayor tiempo en estado de potencia baja (bines 11, 31 y 51) los presenta la Vía 40 en las horas pico, pues la combinación de la alta concurrencia vehicular y las menores dimensiones de la vía hace que los viajes en estas horas presenten bajas velocidades y paradas constantes.

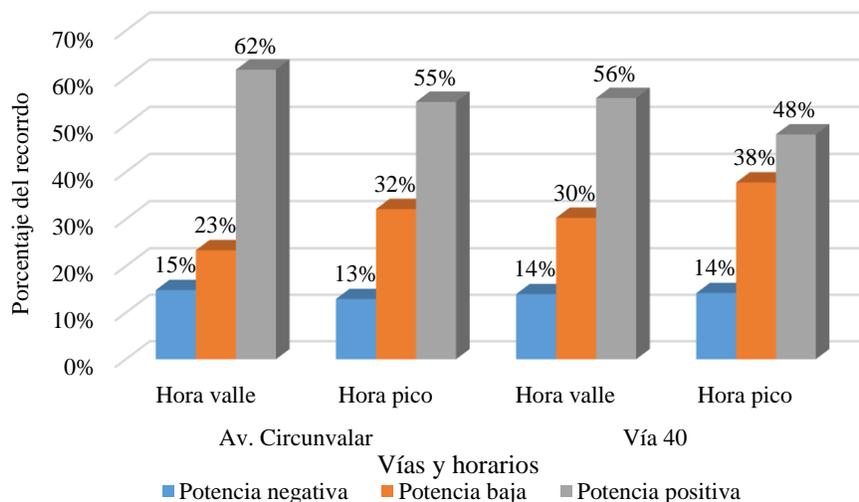


Figura 25. Distribución del tiempo de conducción en las categorías de potencia vehicular.

Nota: elaboración propia.

También se encontró que en los horarios picos el patrón de conducción general se acumula principalmente en el bin 11, mientras que en las horas valles, lo hace en el bin 12. La diferencia entre las horas valles y horas pico también se muestra en el trabajo de Caballero (2011) para la ciudad de Santiago de Chile, donde se encontró que en los horarios de mayor

afluencia vehicular, los patrones de conducción tienden a acumularse en el bin 11, por la baja velocidad o tiempo detenidos; así como la menor concentración en el bin 11 y aparición del estrés medio en vías de alta velocidad. González (2017) también encontró que, en la ciudad de Santiago de Cali, los patrones en las horas valle presentan un aumento de los bins de potencia que representan condiciones de aceleración y altas velocidades.

El porcentaje de los viajes en estado de potencia negativa, que representa desaceleraciones y pendientes negativas, se mantuvo relativamente constante durante las horas valle y horas pico en ambas vías.

Respecto a las condiciones de estrés del motor, se encontró que, de forma general, la Av. Circunvalar en las horas pico presenta el mayor porcentaje de estrés del motor medio con un 2,5% del trayecto, seguido por el patrón de conducción general en la misma vía en horas pico con el 1,6% del trayecto. En la Vía 40, se presentaron porcentajes de estrés del motor medios muy cercanos a 0. El estrés medio en el motor en la Av. Circunvalar puede relacionarse al mayor tiempo de aceleración de los vehículos que se presenta en la vía.

8.4. Emisión de Material Particulado

Realizada la estimación de las emisiones se encontró que, en un día hábil, en la Vía 40 se producen 142 kg/día de material particulado y en la Av. Circunvalar 338 kg/día de este. Mientras en los días no hábiles en la Vía 40 se producen 62 kg/día y en la Av. Circunvalar 266 kg/día. En la Av. Circunvalar el promedio de emisión por hora es de 28 kg, con aumentos hasta 30, 31 y 32 kg/h en las horas pico 7, 8 y 17, mientras que en la Vía 40 se emiten en promedio 12 kg/h con picos de generación en las horas 7, 8, 12 y 17, como se muestra en la Figura 26 y en la Figura 27. En la Vía 40, se encontró que durante las 5 horas picos se produjo el 48% de la emisión

diaria en esta vía, mientras en la Av. Circunvarar en esas horas, se produjo el 44% de la emisión total diaria de la vía.

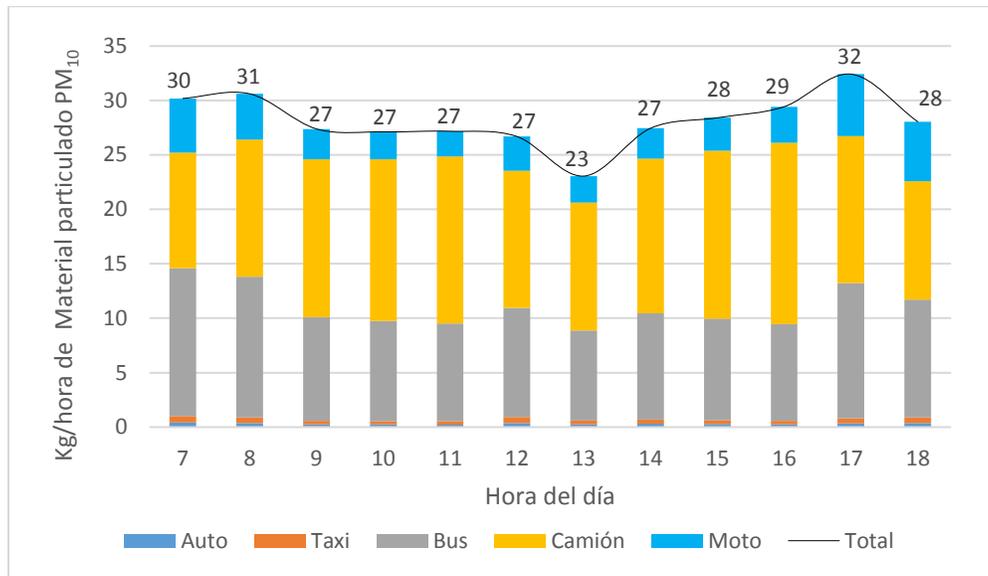


Figura 26. Emisión de PM₁₀ en la Av. Circunvarar durante las horas estudiadas.

Nota: elaboración propia.

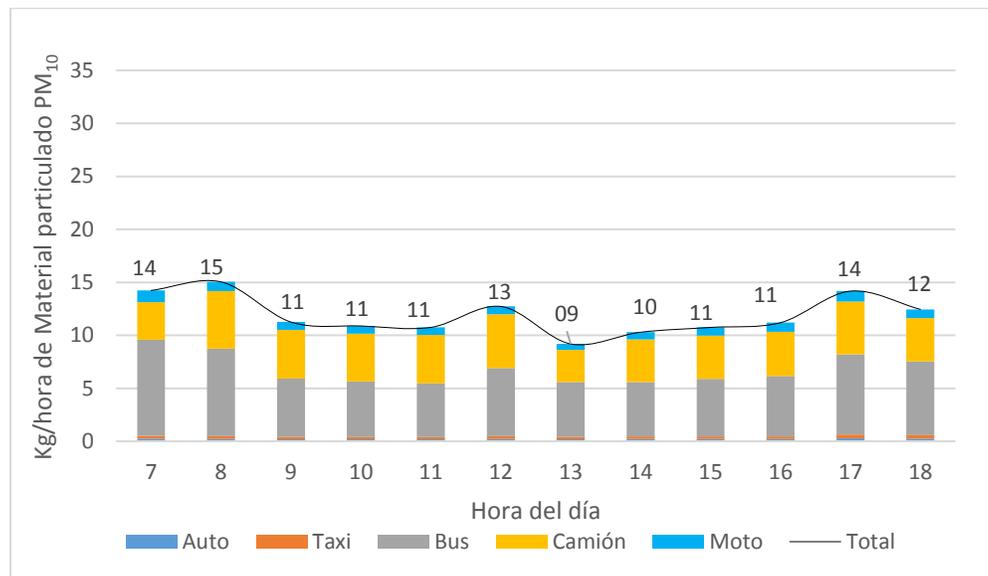


Figura 27. Emisión de PM₁₀ en la Vía 40 durante las horas estudiadas.

Nota: elaboración propia.

Respecto a la emisión anual, se consideraron el número de días hábiles y no hábiles del año 2013, que fueron 296 y 69. Así, la emisión total anual del material particulado para ese año en la Vía 40 fue de 46,6 T y de 118,5 T para la Av. Circunvalar, para un total de 165 T en el corredor conformado por las dos vías. La distribución de la emisión por categoría vehicular se muestra en la Figura 28, donde se observa que la emisión está dominada por los buses y camiones con el 37% y 48% en la Av. Circunvalar y con el 53% y 36% en la Vía 40, la mayor participación de los buses en la Vía 40 se debe a que por esta el porcentaje de buses que circulan es mayor que en la Circunvalar, como se aprecia en lo explicado anteriormente (Figura 16. y Figura 18.)

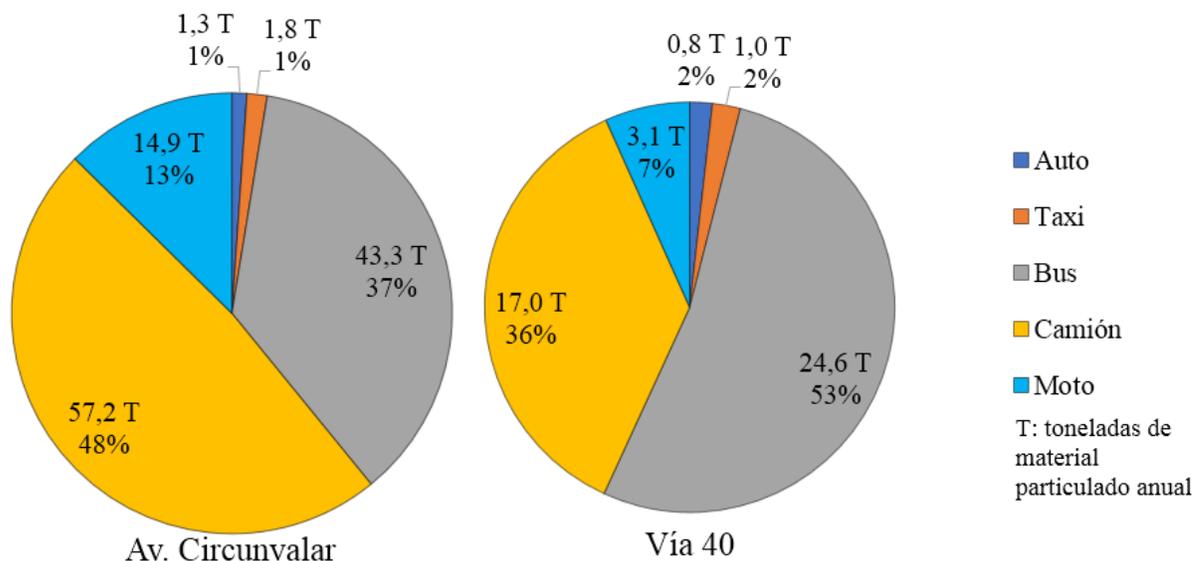


Figura 28. Distribución de la emisión por categoría vehicular en la Av. Circunvalar y la Vía 40.

Nota: elaboración propia.

Estos valores a pesar de que, los camiones y buses son sólo el 8,6% y el 6,4% de los vehículos registrados en todo el corredor; así el 86% de la emisión de material particulado en el corredor, sería generada por el 15% de los automotores que transitan por este, como se observa en la Figura 29. Además de los buses y camiones, las motocicletas que son el 19% de la flota utilizada para la estimación, generan una fracción considerable del 11% del material particulado.

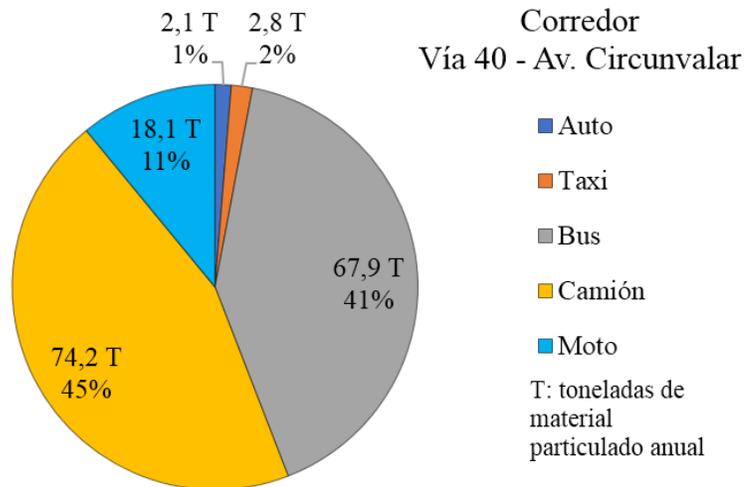


Figura 29. Distribución de la emisión por categoría vehicular en todo el corredor.

Nota: elaboración propia.

De manera similar, en el estudio de Rojas (2015) en la jurisdicción de la CAR Cundinamarca y en el de Toro et al. (2013) en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá obtuvieron estimaciones donde la categoría que domina la generación de material particulado es la de camiones con el 45% y 53% en respectivos estudios, sin embargo la segunda categoría de mayor aporte en ambos estudios fue la de motocicletas con el 28% en el Área de Jurisdicción de la CAR Cundinamarca y con el 27% en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Por otro lado, el estudio en la ciudad de Manizales en el año 2013 se encontró que la participación en la emisión de material particulado en el año base 2014 fue de 47% para los buses, seguido de los camiones con el 25% y de las motos con el 24% (Aristizabal, González, Cuesta, Gómez, & Li, 2016).

La emisión del MP puede estar dominada por los camiones y buses debido al alto uso de diésel en estas categorías. En la Figura 30, puede observarse la distribución de la emisión por tipo de combustible en cada categoría vehicular. En los camiones y los buses, el uso de diésel es del 72% y 73% respectivamente, pero los vehículos que operan con este combustible generan el

99% de las emisiones en ambas categorías. También en la categoría de los taxis se puede observar que el mayor porcentaje de emisión (67%) proviene de los taxis a diésel, a pesar de que estos sólo son el 3,8% de este grupo de vehículos, mientras los taxis a gas natural vehicular (85% de la categoría) emiten sólo un tercio del contaminante.

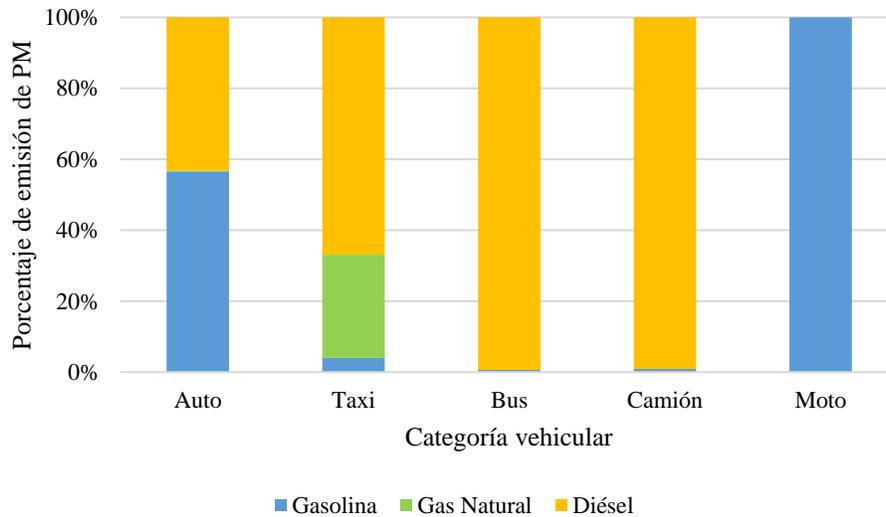


Figura 30. Porcentaje de aporte por tipo de combustible en cada categoría vehicular.

Nota: elaboración propia.

La mayor generación de material particulado en los vehículos a diésel se debe en parte a que estos poseen motores donde predomina la quema de combustible por llama de difusión (Glassman, Yetter, & Glumac, 2014), que consiste en un tipo de quema donde la combustión se da a medida que los reactivos se encuentran (diésel y el aire) (Sánchez, 2011). Este tipo de llama en conjunto con las altas temperaturas necesarias para quemar el diésel, y los momentos de insuficiente concentración de oxígeno en algunas zonas de la cámara de combustión permite que en el motor se presente el proceso de pirólisis de los compuestos orgánicos del diésel, formando especies químicas precursoras del material particulado (Mohankumar & Senthilkumar, 2017). Como se observa en la Figura 31, los vehículos a diésel (que son el 14% de la flota estudiada)

emiten el 87% de las emisiones del material particulado en el corredor de la Vía 40 – Av. Circunvalar, mientras el 12% y el 1% vienen de vehículos que utilizan gasolina y gas natural.

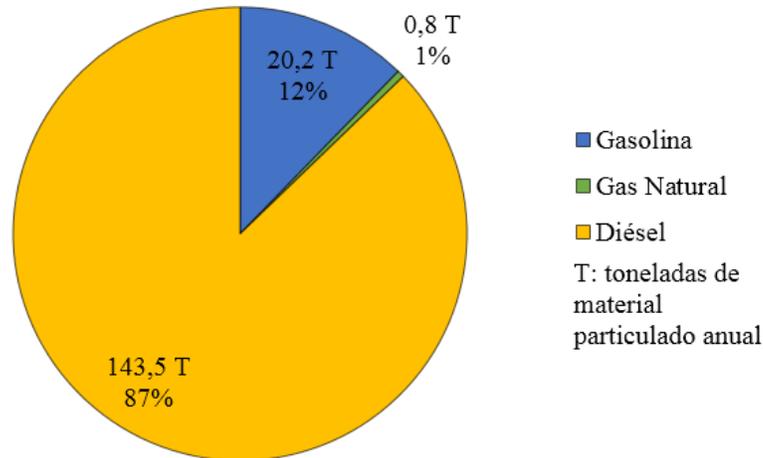


Figura 31. Aporte total por tipo de combustible.

Nota: elaboración propia.

En el Área Metropolitana del Valle de Aburrá se encontró que los vehículos diésel emiten el 70% del material particulado y la gasolina el 29% (Toro et al., 2013), resultados similares se registraron en Bogotá en el año 2007, donde la emisión de material particulado por vehículos diésel representa el 72% y la emisión de gasolina el 28% del total (Herrera, 2007) y en Manizales en el año base 2014, donde el diésel contribuyó con el 75% de la emisión y la gasolina con el 25% (Aristizabal et al., 2016).

Además de la estimación del material particulado generado anualmente en las dos vías, se obtuvieron los factores de emisión de material particulado por kilómetro para las diferentes categorías vehiculares como se muestra en la Tabla 23, en esta se puede observar, que los buses, camiones y motocicletas, generan mayor cantidad de material particulado por km recorrido, siendo los de menor generación los vehículos particulares.

Tabla 23.

Factor de emisión de PM₁₀ por categoría en cada vía.

Categoría	Circunvalar (g/km)	Vía 40 (g/km)	Aumento en Vía 40
Auto	0,0124	0,0172	39%
Taxi	0,0268	0,0321	20%
Bus	2,6281	3,5136	34%
Camión	2,0629	2,3218	13%
Moto	0,2141	0,2212	3%

Nota: elaboración propia.

En la tabla también se destaca el aumento del factor de emisión en la Vía 40 respecto a la Av. Circunvalar en todas las categorías vehiculares. Al momento de la estimación ambas vías compartieron la mayoría de las características de localidad como la distribución tecnológica de las categorías vehiculares, las condiciones ambientales y propiedades de los combustibles, a excepción de la distribución de los patrones de conducción, que mostraron marcadas diferencias como se mostró en la Figura 25, así las contrastes entre los factores de emisión podría ser atribuidos a este último elemento. De igual forma pueden apreciarse estas diferencias en la misma vía al comparar la generación en g/km durante las horas pico y las horas valle en la Tabla 24. Todas las categorías mostraron un aumento en la generación de material particulado por kilómetro en ambas vías durante horas pico, a excepción de la categoría de camiones en la Av. Circunvalar.

Tabla 24.

Cambio de factores de emisión en horas pico y horas valle.

Vía	Categoría	Hora valle		Hora pico		Diferencia	
		Factor de emisión g/km	Velocidad promedio km/h	Factor de emisión g/km	Velocidad promedio km/h	Aumento de factor en hora pico	Disminución de Velocidad
Circunvalar	Auto	0,0107	56,3	0,0123	53,4	15%	-5%
	Taxi	0,0225	47,2	0,0275	32,1	22%	-32%
	Bus	2.2518	41,0	2,6292	32,0	17%	-22%
	Camión	1.9752	41,9	1,7732	53,4	-10%	27%
	Moto	0.1832	45,4	0,2146	32,0	17%	-30%
Vía 40	Auto	0,0152	35,9	0,0166	31,9	9%	-11%
	Taxi	0,0287	29,3	0,0305	27,7	6%	-5%
	Bus	2,9329	29,9	3,6237	22,2	24%	-26%
	Camión	1,8489	36,2	2,5195	31,9	36%	-12%
	Moto	0,1964	37,7	0,2116	32,8	8%	-13%

Nota: elaboración propia.

Este comportamiento mencionado puede apreciarse de forma de tallada en la Figura 32 y la Figura 33. En estas se puede observar que, en la mayoría de los casos, la disminución en la velocidad promedio del recorrido del vehículo está acompañado con aumento en el factor de emisión de material particulado. A pesar que la condiciones de estrés medio y de potencia específica vehicular (que son proporcionales a la velocidad) que aparecen en los patrones de conducción que mantiene velocidades altas son un factor de aumento de la emisión de material particulado (Nicol Davis & Tolvet, 2003a), en general, el incremento en la velocidad promedio conlleva una disminución en la emisión de contaminantes atmosféricos entre estos el material particulado (Faiz et al., 1996); (Setyawan, Kusdiantoro, & Syafi'i, 2015), de esa forma durante las horas de mayor congestión vehicular, la emisión por km, tiende a aumentar (Smit, Brown, & Chan, 2008); (Shah, Cocker, Miller, & Norbeck, 2004).

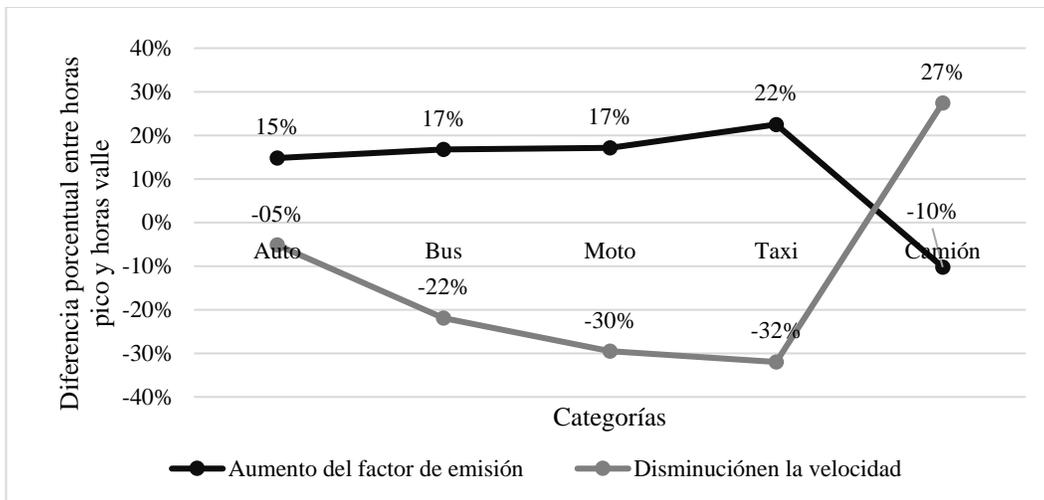


Figura 32. Cambio en factor de emisión y velocidad en horas pico respecto a horas valle en la Av. Circunvalar.

Nota: en la serie “aumento en el factor de emisión” se muestra el porcentaje de elevación del factor de emisión en las horas pico al comparar los factores de cada categoría, con los factores de las horas valle. Elaboración propia.

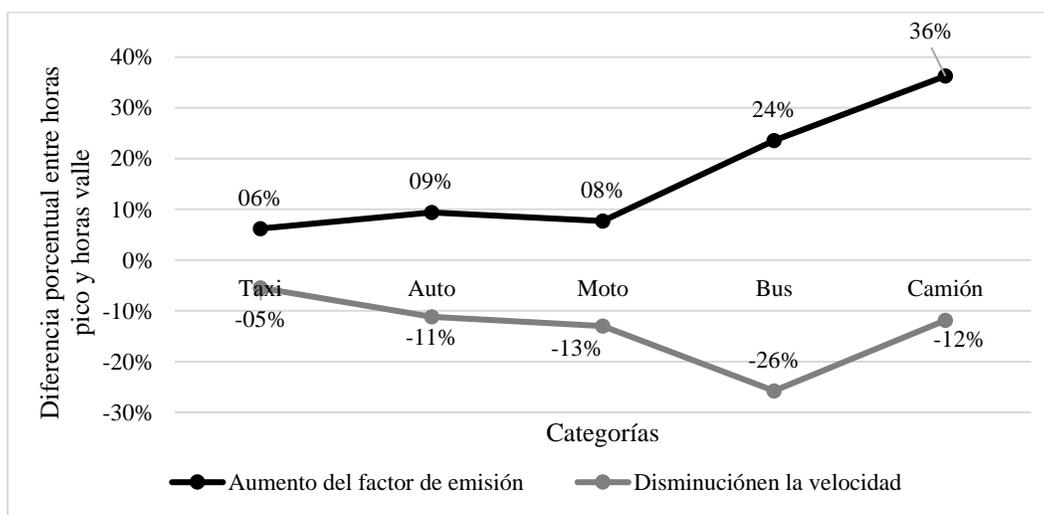


Figura 33. Cambio en factor de emisión y velocidad en horas pico respecto a horas valle en la Vía 40.

Nota: en la serie “aumento en el factor de emisión” se muestra el porcentaje de elevación del factor de emisión en las horas pico al comparar los factores de cada categoría, con los factores de las horas valle. Elaboración propia.

Se puede observar que la única categoría que no continúa la tendencia es la de camiones en la Av. Circunvalar. Como se ve en la Tabla 24, la velocidad presentó un aumento en las horas picos respecto a las horas valle, ya que la grabación del recorrido se hizo en un camión pesado que

mantuvo una velocidad más baja que la del auto en horas pico, que se asignó también como recorrido de camión en hora pico.

Esta situación pudo haberse presentado también si por ejemplo se hubiese hecho la grabación del recorrido de un camión de dimensiones pequeñas durante la hora pico pues, aunque en general las velocidades promedio disminuyen durante estas horas, otros factores como las dimensiones del vehículo, su tecnología y la actitud del conductor también inciden en la velocidad, es por esto que en estudios de estimación que comprometen áreas más grandes como ciudades enteras, se registran más horas de recorrido, de diferentes vehículos y con diferentes conductores en cada categoría, como lo indica el Anexo D de “Recolección de información de Campo” del Modelo IVE (Nicol Davis & Tolvet, 2003b).

Por último, se obtuvieron factores de emisión de gramos material particulado por km recorrido para cada categoría según su uso de combustible para todo el corredor de la Vía 40 – Av.

Circunvalar y se muestran en la Tabla 25, donde también se muestran los factores de emisión en 3 localidades colombianas y una localidad internacional a modo de comparación de los factores de emisión estimados en este trabajo.

Como se observa la categoría que presenta la mayor emisión por kilómetro es la de buses diésel con 3,81 g/km, seguida por los camiones de tecnología también diésel con 2,76 g/km. La categoría que presenta la menor emisión por kilómetro es la de buses a gas natural, seguida de los autos a gasolina, y los taxis a gas natural.

Tabla 25.

Factores de emisión de otros estudios.

Localidad	Categoría	Gasolina (g/Km)	Gas (g/Km)	Diesel (g/Km)
Barranquilla Vía 40 - Av. Circunvalar	Auto	0,0078	0,0150	0,1332
	Taxi	0,0111	0,0087	0,4790
	Bus	0,1007	0,0051	3,8138
	Camión	0,0582	--	2,7671
V. de Aburrá	Auto	0,00300	0,00200	0,06000
	Taxi	0,00300	0,00200	0,06000
	Bus	0,03200	0,00200	0,08300
	Camión	0,03200	0,00200	0,08300
	Moto	0,09600	--	--
Car Cundinam.	Auto	0,00170	0,00003	0,00098
	Taxi	0,00100	0,00006	--
	Bus	0,00008	0,00015	0,15300
	Camión	0,00310	0,00014	0,21500
	Moto	0,11200	--	--
Bogotá	Auto	0,00260	--	0,07250
	Taxi	0,01000	--	0,01000
	Bus	0,07000	--	0,33333
	Camión	0,04800	--	0,23400
Quito (Ec)	Moto	0,03500	--	--
	Auto	0,11333	--	--
	Taxi	0,03000	--	--
	Bus	--	--	1,77000
	Camión	--	--	3,00000
	Moto	0,40000	--	--

Nota: elaboración propia a partir de Herrera (2007), Toro et al. (2013), Rojas (2015), Guadalupe (2016).

Con todas las localidades mostradas se coincide en que en estas los factores de mayor emisión por kilómetro son los de los camiones, buses y motocicletas, pero hay una diferencia bastante amplia en el valor general de los factores, pues mientras en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, en la Jurisdicción de la CAR Cundinamarca y en Bogotá los mayores factores de emisión están en el orden de las décimas y centésimas de gramo por kilómetro, los factores encontrados en el corredor alcanzan los 3,8 g/km como en el caso de los buses a combustible diésel. Por otro lado, en el caso de la ciudad de Quito, se encuentra mayor similitud pues los factores de emisión de buses y camiones también se encuentran en el orden de los gramos, aunque son menores. Sobre esta comparación con otros estudios debe tenerse en cuenta que mientras el presente trabajo se realizó en un corredor específico de la ciudad, en las otras investigaciones la estimación se elaboró para ciudades enteras, que cubren más tipos de vías con comportamientos de flujo vehicular y de conducción mucho más variados, por lo que sería necesaria una estimación de la emisión de material particulado y los factores de emisión en todo el Distrito de Barranquilla para establecer una comparación más precisa respecto a otras ciudades.

9. Conclusiones

Con la realización de este estudio, la primera conclusión que se obtiene es que el Modelo IVE puede ser aplicado para la estimación de emisiones vehiculares en la ciudad de Barranquilla, pues se pudieron obtener los suministros necesarios para la estimación de las emisiones con el modelo, teniendo en cuenta que algunos fueron aproximación y estimaciones con base en información local y nacional.

Aunque es difícil encontrar publicaciones oficiales o investigaciones sobre las características tecnológicas del parque automotor de la ciudad, se logró hacer un análisis de este por medio de los registros de matrícula y el calendario de introducción de tecnología vehiculares a Colombia, generado por la autoridad ambiental del Área Metropolitana del Valle de Aburrá y el Ministerio de Transporte, y con reportes de las características del parque automotor de todo el país, con lo que se lograron preciar un total 178 tecnologías vehiculares divididas en las 5 categorías estudiadas (autos, taxis, buses, camiones y motos). Así se estableció que en los autos particulares predominan las tecnologías de inyección multipunto con control de escape tipo catalizador de tres vías, en los taxis la de carburador debido al alto uso reportado de gas natural vehicular, en los buses y camiones las tecnologías de inyección directa y en las motocicletas los motores de 4 tiempos.

Respecto a los patrones de conducción, se halló que en el corredor formado por la Av. Circunvalar y la Vía 40 la mayor parte del tiempo de conducción se mantiene en estado de estrés bajo del motor y potencia positiva, asociada a momentos de aceleración sostenida. El estado de estrés medio se manifiesta en la Av. Circunvalar durante horas pico y valle y en la Vía 40 sólo en horas valle, esto debido a la posibilidad de alcanzar mayores velocidades en las vías, aunque el porcentaje de tiempo en estrés medio es bastante bajo (máximo 2,5%). Se encontró que la

diferencia más significativa entre los patrones de conducción en la Av. Circunvalar y la Vía 40 es el porcentaje de tiempo en que los vehículos están en estado de potencia positiva, y potencia baja o nula (relacionada con momentos de detención o de velocidad mínima). En la Av. Circunvalar la potencia positiva y la potencia nula representan el 62% y el 23% en horas valle respectivamente, mientras en estas mismas horas en la Vía 40 la potencia positiva y nula son el 56% y 32% del tiempo de conducción. En las horas pico, el porcentaje de viaje en potencia positiva disminuye y el de potencia nula aumenta en ambas vías, mostrando que la congestión vehicular tiene un impacto significativo en los patrones de conducción.

En cuanto a las emisiones vehiculares, encontró que, durante días hábiles, en todo el corredor conformado por las dos vías, se generarían 481 kg/día de material particulado, de los cuales 338 kg vienen de Av. Circunvalar. La emisión promedio entre de las 7 a.m. a 6 p.m. es de 28 kg/h para la Av. Circunvalar y de 12 kg/h en la Vía 40, con aumentos de 2 a 3 kg en las horas pico en ambas vías.

Durante los días no hábiles, la emisión en todo el corredor se reduce a 329 kg/día. Por lo que anualmente se generarían 165/ toneladas/año de material particulado en todo el corredor. De este, el 41% proviene de buses, el 45% de camiones y el 11% de motocicletas. Además, se concluyó que generan mayor cantidad de material particulado serían aquellos de combustible diésel que, aunque representan un porcentaje bajo de la flota vehicular estudiada (14%), generarían el 87% de la emisión, seguida de los vehículos a gasolina con el 12%.

Por último, los factores de emisión de material particulado por cada categoría vehicular en las dos vías y en horas pico y horas valle dejaron conclusiones importantes. Además de confirmar que los buses, camiones y motocicletas son los mayores generadores de material particulado en las vías, se encontró también que los factores en la Vía 40 presentan aumentos significativos

cuando se compara con los de la Av. Circunvalar. Sabiendo que ambas localidades comparten la mayoría de sus características a excepción de los patrones de conducción, se concluyó que el aumento en el factor de emisión es atribuible a las diferencias en la distribución de los patrones y las velocidades de conducción entre las dos vías, Igualmente se observan aumentos de emisión por kilómetro en las horas pico al compararlos con los factores de emisión en las horas valle en ambas vías. Estas diferencias podrían deberse a las diferencias entre la Av. Circunvalar y la Vía 40, pues la primera es de alta velocidad y la segunda no; y a las diferentes dinámicas que se presentan en horas pico (menor velocidad y más tiempo momentáneamente detenidos) y las horas valle (mayor aceleración y velocidad). Por esto se concluye que los patrones de conducción tienen una alta incidencia en la generación de material particulado, por lo que en futuras investigaciones deben ser objeto de detallado estudio.

10. Recomendaciones

Aunque este estudio se realizó sólo para la Av. Circunvalar y la Vía 40, el distrito cuenta con información detallada sobre la clasificación y longitud de toda su red vial. Lo que facilitaría un posible estudio completo de la generación de material particulado y/u otras emisiones en toda la ciudad. Aun así, para esto sería necesaria información más precisa de la distribución tecnológica del parque automotor de la ciudad, que requeriría toma de esta información en campo.

Como se comentó, los patrones de conducción mostraron ser un factor determinante en la cantidad del material particulado emitido en ambas vías, por lo que se recomienda que para futuros estudios se realice un estudio más extenso de los mismos, con el fin de determinar patrones de conducción que sean lo más posiblemente representativos de la forma de en qué manejan los conductores del Distrito de Barranquilla.

En caso tal que la administración del Distrito de Barranquilla decidiera adoptar acciones para reducir la contaminación vehicular por material particulado, se recomienda, basándose en los resultados de este estudio, enfocar estas en los vehículos de tipo camión y bus accionados por combustible diésel y en las motocicletas.

También se recomendaría a la administración, mantener un registro de información más detallado sobre las características del parque automotor de la ciudad, que incluya tecnologías utilizadas en el control de aire/combustible, de gases de escape y de emisiones evaporativas.

Por último, se recomienda que, además de futuras estimaciones de emisiones vehiculares, se realicen campañas de medición de gases de escape a bordo de vehículos en funcionamiento para verificar los factores de emisión estimados en las investigaciones realizadas y por realizar.

11. Bibliografía

- ACEA. (2017). Differences between diesel and petrol. Retrieved June 14, 2018, from <http://www.acea.be/news/article/differences-between-diesel-and-petrol>
- ADB. (2015). *Movilidad*. Barranquilla. Retrieved from http://www.barranquilla.gov.co/normatividad/leyes-y-acuerdos/doc_download/4242-movilidad
- Aguilar, J., Echániz, G., Franco, P., Garibay, V., Iniestra, R., Rogers, J., & Tejada, D. (2007). Guía metodológica para la estimación de emisiones vehiculares en ciudades mexicanas. México D.F: Instituto Nacional de Ecología. Retrieved from http://www.inecc.gob.mx/descargas/calaire/2007_guia_moviles.pdf
- Aristizabal, H., González, C., Cuesta, A., Gómez, C., & Li, J. (2016). *Apoyo y fortalecimiento de la Red de Monitoreo de Calidad del aire en la ciudad de Manizales y cuantificación de emisiones atmosféricas por fuentes móviles*. Universidad Nacional. Retrieved from <http://www.corpocaldas.gov.co/publicaciones/543/Inventario Fuentes Moviles 2014.pdf>
- Avila, J. P., & Lora, G. R. (2015). Metodología para realizar inventarios de fuentes móviles de contaminación atmosférica en la ciudad de Cartagena, 1–94. Retrieved from <http://190.242.62.234:8080/jspui/handle/11227/1542?mode=full>
- BBC. (2016). El impactante hallazgo sobre la contaminación en cerebros de personas que vivieron y murieron en Ciudad de México. BBC Mundo. Retrieved from <http://www.bbc.com/mundo/noticias-37286480>
- Behrentz, E., Rojas, N., Osorio, D., & Uscátegui, N. (2016). Concentraciones de material particulado respirable suspendido en el aire en inmediaciones de una vía de transporte

- público colectivo. Bogotá: Cámara de Comercio de Bogotá, Secretaría Distrital de Ambiente, Corporación Ambiental Empresarial, Programa Acercar Transporte. Retrieved from <http://unicesar.ambientalex.info/infoCT/Materialparticuladosda.pdf>
- Behrentz, E., & Sánchez, N. (2009). Plan decenal de descontaminación de Bogotá, Parte 2: Inventario de emisiones provenientes de fuentes fijas y móviles. Bogotá: Alcaldía Mayor de Bogotá.
- Bosch, R. (2005). *Manual de la técnica del automóvil*. R. Bosch. Retrieved from https://www.ecured.cu/Motor_de_combustión_interna
- CaARB. (1975). California evaporative emission standards and test procedures for 1978-2000 model motor vehicles. California Air Resource Board. Retrieved from <https://www.arb.ca.gov/msprog/evap/evaptp98.pdf>
- Caballero, M. (2011). *Análisis de emisiones de vehículos livianos según ciclos de conducción específicos para la región metropolitana. Universidad de Chile facultad de ciencias físicas. UNIVERSIDAD DE CHILE FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS*. Retrieved from http://www.tesis.uchile.cl/tesis/uchile/2011/cf-caballero_mm/html/index.html
- Camner, P. et al. (1988). Health effects of diesel exhaust emissions.
- Caro, D., & Uribe, L. (2008). *Evaluación de la concentración de metales contenidos en material particulado respirable y su incidencia sobre ambientes intra-extra murales en dos localidades de Bogotá y otras ciudades del país con antecedentes de contaminación atmosférica*. Universidad de la Salle. Retrieved from <http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/14621/T41.08C22e.pdf;jsessionid=ABDAFA35A257091DAAAC6E053D750DFA?sequence=1>
- Castillo, E. (2016). Ecopetrol: Investigación y Desarrollo en Calidad de Combustibles.

- Ministerio de Transporte de Colombia. Retrieved from
<https://www.mintransporte.gov.co/descargar.php?id=5345>
- Castro, M. (2002). *Gestión electrónica de la inyección diesel : equipos Bosch VE y VP, equipos Lucas DPC-FT : regulación, control y averías*. CEAC.
- Castro, P., & Escobar, L. (2006). *Estimacion de las emisiones contaminantes por fuentes móviles a nivel nacional y formulacion de lineamientos técnicos para el ajuste de las normas de emisión*. Universidad de la Salle. Retrieved from
<http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/14781/00798220.pdf?sequence=1>
- CEDE. (2011). *Contribución de la motocicleta y su evolución en la economía nacional*. Comité de Ensambladoras Japonesas de Motos. Retrieved from
<http://www.prinntech.com/archivosSubidos/32813a3aeea340a54cda0429797986c5/Primer Informe Motocicletas V 2011.doc>
- Chacón, M. (2005). *Educación física para niños con necesidades educativas especiales*. San José: EUNED. Retrieved from
<https://books.google.com.co/books?id=qqsJX3lyN5IC&pg=PA65&dq=sistema+vestibular&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwiegMWcnu7WAhWFdSYKHfRxBykQ6AEISTAH#v=onepage&q=sistema+vestibular&f=true>
- Cheung, K. L., Polidori, A., Ntziachristos, L., Tzamkiozis, T., Samaras, Z., Cassee, F. R., ... Sioutas, C. (2009). Chemical characteristics and oxidative potential of particulate matter emissions from gasoline, diesel, and biodiesel cars. *Environmental Science & Technology*, 43(16), 6334–6340. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19746734>
- Chow, J., & Watson, J. (1998). *Guideline on speciated particulate monitoring*. Book Guideline

- On Speciated Particulate Monitoring*. Reno: Desert Research Institute. Retrieved from <https://www3.epa.gov/ttnamti1/files/ambient/pm25/spec/drispec.pdf>
- Compton, P., Devuyst, D., Hens, L., & Nath, B. (2013). *Environmental management in practice: compartments, stressors and sectors*. Routledge. Retrieved from <https://www.routledge.com/Environmental-Management-in-Practice-Vol-2-Compartments-Stressors-and/Compton-Devuyst-Hens-Nath/p/book/9780415149075>
- Correa, H., González, L., Vanegas, M., Lugo, L., Ávila, G., Lozano, Y., ... Jurado, B. (2013). Caracterización del transporte terrestre automotor de carga por carretera en Colombia 2010-2012. Bogotá: Ministerio de Transporte de Colombia. Retrieved from <https://www.mintransporte.gov.co/descargar.php?idFile=11450>
- Costa, P., Saldarriaga, G., Lozano, R., & Suárez, R. (2007). *Informe anual sobre el estado del medio ambiente y los recursos naturales renovables en Colombia: calidad del aire*. (P. Costa, G. Saldarriaga, R. Lozano, & R. Suárez, Eds.). Bogotá: IDEAM. Retrieved from http://www.sisaire.gov.co:8080/faces/docs/25-0-2017-10-12-6-578-1-01._Informe_anual_sobre_el_estado_del_M.A_y_R.N_Calidad_del_aire.compressed.pdf
- Cotrufo, M. F., De Santo, A. V., Alfani, A., Bartoli, G., & De Cristofaro, A. (1995). Effects of urban heavy metal pollution on organic matter decomposition in *Quercus ilex* L. Woods. *Environmental Pollution*, 89(1), 81–87. [https://doi.org/10.1016/0269-7491\(94\)00041-B](https://doi.org/10.1016/0269-7491(94)00041-B)
- Davis, N., Lents, J., Osses, M., Nikkila, N., & Barth, M. (2005). Developing countries: development and application of an international vehicle emissions model. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1939, 155–165. <https://doi.org/10.3141/1939-18>
- Davis, N., & Tolvet, S. (2003a). Attachment C: Characterizing emission variations due to driving

behavior from on-road vehicles. International Sustainable Systems Research Center.

Retrieved from <http://www.issrc.org/ive/>

Davis, N., & Tolvet, S. (2003b). Attachment D: Field data collection activities. International Sustainable Systems Research Center.

Davis, N., & Tolvet, S. (2003c). Development of the correction factors. International Sustainable Systems Research Center. Retrieved from <http://www.issrc.org/ive/>

Davis, N., & Tolvet, S. (2008). IVE Model: manual de usuario version 2.0. International Sustainable Systems Research Center. Retrieved from

<http://www.issrc.org/ive/downloads/manuals/UsersManual%28sp%29.pdf>

Dennis, R., Caraballo, L., García, E., Caballero, A., Aristizabal, G., Córdoba, H., ... Cala, L. L.

(2004). Asthma and other allergic conditions in Colombia: a study in 6 cities. *Annals of Allergy, Asthma & Immunology*, 93(6), 568–574. [https://doi.org/10.1016/S1081-1206\(10\)61265-3](https://doi.org/10.1016/S1081-1206(10)61265-3)

Dennis, R. J., Caraballo, L., García, E., Rojas, M. X., Rondon, M. A., Pérez, A., ... Jimenez, S.

(2012). Prevalence of asthma and other allergic conditions in Colombia 2009-2010: a cross-sectional study. *BMC Pulmonary Medicine*, 12(1), 17. <https://doi.org/10.1186/1471-2466-12-17>

EC. (2017). Standards: Air Quality. Retrieved July 8, 2018, from

<http://ec.europa.eu/environment/air/quality/standards.htm>

Eionet. (2017). Atmospheric emission. Retrieved June 15, 2018, from

<http://www.eionet.europa.eu/gemet/en/concept/625>

EMEP. (1984). Protocol to the 1979 convention on long-range transboundary air pollution on long-term financing of the cooperative programme for monitoring and evaluation of the

- long range transmission of air pollutants in Europe (EMEP). Ginebra: EMEP. Retrieved from https://www.unece.org/fileadmin/DAM/env/lrtap/full_text/1984.EMEP.e.pdf
- EPA. (1999). Handbook for criteria pollutant inventory development: a beginner's guide for point and area sources. Office of Air Quality Planning and Standards. Retrieved from <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P1000MVP.PDF?Dockey=P1000MVP.PDF>
- EPA. (2009). Development of evaporative emissions calculations for the motor vehicle emissions simulator. United States Environmental Protection Agency. Retrieved from https://cfpub.epa.gov/si/si_public_file_download.cfm?p_download_id=499535
- EPA. (2015). National Ambient Air Quality Standards (NAAQS). Retrieved from <http://www3.epa.gov/ttn/naaqs/criteria.html>
- Evelson, P., Marchini, T., Garces, M., Cáceres, L., Magnani, N., & Alvarez, S. (2016). Inhaled particulate matter leads to myocardial dysfunction. In *Biochemistry of Oxidative Stress* (pp. 275–285). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-45865-6_18
- Faiz, A., Weaver, C. S., & Walsh, M. P. (1996). *Air pollution from motor vehicles: standards and technologies for controlling emissions*. World Bank. Retrieved from https://books.google.com.co/books/about/Air_Pollution_from_Motor_Vehicles.html?id=Hqsyv_KD0lgC&redir_esc=y
- Falcon, C. I., Osornio, A. R., Sada, I., & Segura, P. (2016). Aeroparticles, Composition, and Lung Diseases. *Frontiers in Immunology*, 7, 3. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2016.00003>
- Flagan, R. C., & Seinfeld, J. H. (2012). *Fundamentals of air pollution engineering*. Dover. Retrieved from https://books.google.com.co/books/about/Fundamentals_of_Air_Pollution_Engineering.html

?id=-YZHbjUo9lAC&source=kp_cover&redir_esc=y

Franco, J. F., Yesid Rojas, N., Sarmiento, O. L., Hernández, L. J., Zapata, E., Maldonado, A., ...

Behrent, E. (2009). Niveles de material particulado en colegios distritales ubicados en vías con alto tráfico vehicular en la ciudad de Bogotá: estudio piloto. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 101–111. Retrieved from

http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-62302009000300010&nrm=iso

Gaitán, M., & Paula, C. (2017). Guía para la elaboración de inventarios de emisiones

atmosféricas. Bogotá: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia.

Retrieved from

http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/emisiones_atmosfericas_contaminantes/documentos_relacionados/GUIA_PARA_LA_ELABORACION_DE_INVENTARIOS_DE_EMISIONES_ATMOSFERICAS.pdf

Galeotti, M. (2003). Economic development and environmental protection. *Social Science*

Research. <https://doi.org/10.2139/ssrn.465200>

Garreaud, R., Rutllant, J., Merino, M., Gallardo, L., Leiva, M., Morales, L., ... Raúl, M. (2006).

Contaminación atmosférica urbana: Episodios críticos de contaminación ambiental en la ciudad de Santiago. (R. Morales & G. Claudio, Eds.). Santiago de Chile: Editorial

Universitaria, S.A. Retrieved from

https://books.google.com.co/books/about/Contaminación_atmosférica_urbana.html?id=HdeX6SWHBW8C&redir_esc=y

Girardo, L. (2005). *Estimación del inventario de emisiones de fuentes móviles para la ciudad de*

Bogotá e identificación de variables pertinentes. Universidad de los Andes. Retrieved from

<http://oab2.ambientebogota.gov.co/apc-aa->

files/57c59a889ca266ee6533c26f970cb14a/Inventarioemisiones_fuentesm%F3viles.pdf

Glassman, I., Yetter, R. A., & Glumac, N. (2014). *Combustion*.

González, D. (2017). *Estimación de patrones de conducción en una vía del sur de Cali para el cálculo de las emisiones atmosféricas con el Modelo IVE*. Universidad Autónoma de Occidente. Retrieved from <https://red.uao.edu.co/bitstream/10614/10003/5/T07666.pdf>

Granada, D. (2009). Investigación de mercados de Risaralda motos S.A. Risaralda. Retrieved from <http://repositorio.ucp.edu.co:8080/jspui/bitstream/10785/2683/1/CDPEAE257.pdf>

Granier, C., Artaxo Netto, P. E., & Reeves, C. E. (2004). *Emissions of atmospheric trace compounds*. Kluwer Academic Publishers.

Grantz, D. ., Garner, J. H. ., & Johnson, D. . (2003). Ecological effects of particulate matter. *Environment International*, 29(2–3), 213–239. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(02\)00181-2](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(02)00181-2)

Guadalupe, J. (2016). *Modelación de emisiones contaminantes de fuentes móviles terrestres en Quito, Ecuador*. Universidad Técnica Federico Santa María. Retrieved from <http://repositorio.educacionsuperior.gob.ec/handle/28000/2454>

Han, C., Lim, Y.-H., Jung, K., & Hong, Y.-C. (2017). Association between ambient particulate matter and disorders of vestibular function. *Environmental Research*, 155, 242–248. <https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2017.02.013>

Harrison, R. M., Hester, R. E., & Querol, X. (2016). Airborne particulate matter sources, atmospheric processes and health. Retrieved from https://books.google.com.co/books/about/Airborne_Particiulate_Matter.html?id=z2zmDAAAQBAJ&source=kp_cover&redir_esc=y

- Herrera, D. (2007). *Modelo de emisiones vehiculares para Bogotá*. Universidad de los Andes. Retrieved from http://oab2.ambientebogota.gov.co/apc-aa-files/57c59a889ca266ee6533c26f970cb14a/Emisionesvehiculares_Bogot%E1.pdf
- ICONTEC. (2006). Norma Técnica Colombiana 5375. Bogotá: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. Retrieved from <http://guiatramitesyservicios.bogota.gov.co/wp-content/uploads/2017/11/Norma-Técnica-Colombiana-5375.pdf>
- IDEAM. (2015). Valores medios multianuales de temperatura media en °C. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Retrieved from http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/temperaturamedia_tabla.pdf
- Ine-Sermanat. (2005). *Guía de elaboración y usos de inventarios de emisiones*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología. Retrieved from https://books.google.com.co/books/about/Guía_de_elaboración_y_usos_de_inventar.html?id=GSvPwtLiGOcC&redir_esc=y
- Jaramillo, M., Núñez, M., Ocampo, W., Pérez, D., & Portilla, G. (2004). Inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos convencionales en la zona Cali-Yumbo. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (31), 38–48.
- Jiménez, J. L. (1999). Understanding and quantifying motor vehicle emissions with vehicle specific power and tildas remote sensing. Boston: Massachusetts Institute of Technology. Retrieved from <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/44505>
- Karagulian, F., Belis, C. A., Dora, C. F. C., Prüss-Ustün, A. M., Bonjour, S., Adair-Rohani, H., & Amann, M. (2015, November 1). Contributions to cities' ambient particulate matter (PM): A systematic review of local source contributions at global level. *Atmospheric Environment*. Pergamon. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.08.087>

- Kates, E. J., & Luck, W. E. (1982). *Motores diesel y de gas de alta compresión*. Reverté.
Retrieved from <https://books.google.com/books?id=UjtKi-fjkrYC&pgis=1>
- Khare, M. (2007). 6 application of ANN based vehicular pollution. In *Artificial Neural Networks in Vehicular Pollution Modelling* (Vol. 156, pp. 121–156). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-37418-3>
- Kim, E., Park, H., Park, E. A., Hong, Y.-C., Ha, M., Kim, H.-C., & Ha, E.-H. (2016). Particulate matter and early childhood body weight. *Environment International*, *94*, 591–599.
<https://doi.org/10.1016/J.ENVINT.2016.06.021>
- Lents, J., Walsh, M., He, K., Davis, N., Osses, M., Tolvett, S., & Liu, H. (2012). Handbook of air quality management. Retrieved June 14, 2018, from <http://www.aqbook.org/>
- Losa, M., & Papagiannakis, A. T. (2014). *Sustainability, eco-efficiency, and conservation in transportation infrastructure asset management*.
- Lynch, H. N., Loftus, C. T., Cohen, J. M., Kerper, L. E., Kennedy, E. M., & Goodman, J. E. (2016). Weight-of-evidence evaluation of associations between particulate matter exposure and biomarkers of lung cancer. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, *82*, 53–93.
<https://doi.org/10.1016/J.YRTPH.2016.10.006>
- Maher, B. A., Ahmed, I. A. M., Karloukovski, V., MacLaren, D. A., Foulds, P. G., Allsop, D., ... Calderon-Garciduenas, L. (2016). Magnetite pollution nanoparticles in the human brain. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *113*(39), 10797–10801. <https://doi.org/10.1073/pnas.1605941113>
- Makra, L. (2015). Anthropogenic Air Pollution in Ancient Times. In *History of Toxicology and Environmental Health* (pp. 21–41). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801506-3.00003-0>

MAVDT. (2010). *Política de prevención y control de la contaminación del aire*. Bogotá:

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Retrieved from

http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/Políticas_de_la_Dirección/Política_de_PrevenCIÓN_y_Control_de_la_Contaminación_del_Aire.pdf

MEJ. (2007). What is an emission inventory? Tokio: Ministry of the Environment, Japan.

Retrieved from <http://www.acap.asia/publication/pdf/emissioneng.pdf>

MEJ. (2012). Guidelines for developing emission inventory in east asia. Tokio: Ministry of the Environment, Japan. Retrieved from

http://www.acap.asia/publication/pdf/em_inventory/em_guideline.pdf

Mellios, G., Smit, R., & Ntziachristos, L. (2013). Evaporative emissions: developing australian emission algorithms. Retrieved from

https://www.researchgate.net/publication/320554395_EVAPORATIVE_EMISSIONS_DEVELOPING_AUSTRALIAN_EMISSION_ALGORITHMS

Merkisz, J., & Pielecha, J. (2015). *Nanoparticle emissions from combustion engines* (Vol. 8).

Cham: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-15928-7>

Miller, B. G. (2011). *Clean coal engineering technology*. Butterworth-Heinemann.

Minambiente. (2017). Resolución 2254 del 2017. Ministerio de Ambiente y Desarrollo

Sostenible de Colombia. Retrieved from

http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/96-res_2254_de_2017.pdf

Mintransporte. (2005). Caracterización del transporte en Colombia diagnóstico y proyectos de

transporte e infraestructura. Bogotá: Ministerio de Transporte de Colombia. Retrieved from

<https://www.mintransporte.gov.co/descargar.php?id=455>

- Mintransporte. (2009a). Resolución 1782 del 2009. Bogotá: Ministerio de Transporte de Colombia. Retrieved from <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=36620>
- Mintransporte. (2009b). Series de datos de vehículos matriculados en las diferentes ciudades, clasificados por clase. Ministerio de Transporte de Colombia. Retrieved from <https://revistas.unal.edu.co/index.php/bitacora/article/downloadSuppFile/52029/14670>
- Mintransporte. (2015). Transporte en cifras: Estadísticas 2014. Bogotá: Ministerio de Transporte de Colombia. Retrieved from <https://www.mintransporte.gov.co/descargar.php?idFile=12621>
- Mohankumar, S., & Senthilkumar, P. (2017, December 1). Particulate matter formation and its control methodologies for diesel engine: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Pergamon. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.133>
- Mukherjee, A., & Agrawal, M. (2017). World air particulate matter: sources, distribution and health effects. *Environmental Chemistry Letters*, *15*(2), 283–309. <https://doi.org/10.1007/s10311-017-0611-9>
- NCHEu. (2017). Diferencia entre el combustible diesel y gasolina para motores. Retrieved June 6, 2018, from <https://www.ncheurope.com/es/resolution/motores-y-engranajes/65-diferencia-entre-el-combustible-diesel-y-gasolina-para-motores>
- NCHEurope. (2016). Diferencia entre el combustible diesel y gasolina para motores. Retrieved July 8, 2018, from <https://www.ncheurope.com/es/resolution/motores-y-engranajes/65-diferencia-entre-el-combustible-diesel-y-gasolina-para-motores>
- Orozco, R., & Romaña, J. (2017). *Estimación de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos criterio: MP10, SO2, CO, COVs, NOX emitidos por las fuentes móviles en las*

- principales vías de la ciudad de Barranquilla*. Universidad de la Costa.
- Pfafflin, J. R. (James R. ., & Ziegler, E. N. (Edward N. . (2006). *Encyclopedia of environmental science and engineering*. Taylor & Francis.
- Phalen, R. F., & Phalen, R. N. (2013). *Introduction to air pollution science : a public health perspective*. Jones & Bartlett Learning.
- PNUMA. (2014). Decisiones de XIX reunión del Foro de Ministros de Medio Ambiente de América Latina y el Caribe. Los Cabos: PNUMA. Retrieved from <http://www.pnuma.org/forodeminstros/19-mexico/documentos.htm>
- Pulido, A., Turriago, J., Jiménez, R., Torres, C., Rojas, A., Chaparro, N., ... López, A. (2016). *Inventario nacional y departamental de gases efecto invernadero - Colombia*. Bogotá: .PuntoAparte bookvertising. Retrieved from <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023634/INGEI.pdf>
- Querol, X., Alastuey, A., Ruiz, C. R., Artiñano, B., Hansson, H. C., Harrison, R. M., ... Schneider, J. (2004). Speciation and origin of PM₁₀ and PM_{2.5} in selected European cities. *Atmospheric Environment*, 38(38), 6547–6555. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSENV.2004.08.037>
- Rai, P. K. (2016). Impacts of particulate matter pollution on plants: Implications for environmental biomonitoring. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 129, 120–136. <https://doi.org/10.1016/J.ECOENV.2016.03.012>
- Restrepo, Á., Izquierdo, S., & López, R. (2007). Estimación de Factores que inciden sore la contaminación ambiental generada por fuentes móviles en Pereira. *Scientia et Technica*, 1(37), 267–272. <https://doi.org/10.22517/23447214.4053>
- Rodríguez, R., & Núñez, Y. (2016). *Nivel de exposición personal a material particulado*

- inhalable PM 2.5 proveniente de vías de alto tráfico vehicular de la ciudad de Barranquilla*. Universidad de la Costa. Retrieved from [http://repositorio.cuc.edu.co/xmlui/bitstream/handle/11323/931/1045717701 - 1140868213.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.cuc.edu.co/xmlui/bitstream/handle/11323/931/1045717701-1140868213.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Rojas, A. (2015). *Estimación de emisiones de contaminantes provenientes de fuentes móviles en la jurisdicción car*. Universidad Nacional de Colombia. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/52666/>
- RUNT. (2017). Parque Automotor registrado en el RUNT. Retrieved November 27, 2017, from <http://www.runt.com.co/node/53607>
- Salvatore, M. (2014). Panorama de las emisiones remociones y planes de mitigación en la región. San José: Food and Agriculture Organization of the United Nations. Retrieved from http://www.fao.org/fileadmin/templates/ess/documents/meetings_and_workshops/costarica2014/Salvatore_FAO.pdf
- Sánchez, C. (2011). *Teoría de la combustión*. Madrid. Retrieved from <https://books.google.com.co/books?id=tq45oq-Ui0QC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>
- SDTSV. (2013). Aforos vehiculares y peatonales. Retrieved July 4, 2018, from http://www.barranquilla.gov.co/transito/index.php?option=com_content&view=article&id=11359:aforos-vehiculares-y-peatonales&catid=8:semaforizacion
- SDTSV. (2017). Parque automotor 2017. Retrieved November 27, 2017, from http://www.barranquilla.gov.co/transito/index.php?option=com_content&view=article&id=1686&Itemid=38#
- Setyawan, A., Kusdiantoro, I., & Syafi'i. (2015). The effect of pavement condition on vehicle

speeds and motor vehicles emissions. *Procedia Engineering*, 125, 424–430.

<https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2015.11.111>

Shah, S. D., Cocker, D. R., Miller, J. W., & Norbeck, J. M. (2004). Emission rates of particulate matter and elemental and organic carbon from in-use diesel engines. *Environmental Science and Technology*, 38(9), 2544–2550. <https://doi.org/10.1021/es0350583>

Shaughnessy, W. J., Venigalla, M. M., & Trump, D. (2015). Health effects of ambient levels of respirable particulate matter (PM) on healthy, young-adult population. *Atmospheric Environment*, 123, 102–111. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSENV.2015.10.039>

Smit, R., Brown, A. L., & Chan, Y. C. (2008). Do air pollution emissions and fuel consumption models for roadways include the effects of congestion in the roadway traffic flow? *Environmental Modelling and Software*, 23(10–11), 1262–1270.

<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2008.03.001>

Sourdis, C. (2013). Empresarios del taxismo atribuyen el caos al Distrito. Retrieved July 4, 2018, from <https://www.elheraldo.co/local/empresarios-del-taxismo-atribuyen-el-caos-al-distrito-126942>

Sustentables, S. (2012). Análisis de emisiones del parque de camiones de Colombia. Santiago de Chile: Asociación Colombiana de Vehículos Automotores. Retrieved from <http://www.andemos.org/wp-content/uploads/2016/07/Estudio-Emisiones-Parque-Camiones-Colombia.pdf>

Téllez, J., Hernández, M., Lannes, M., Suárez, C., Angulo, P., & Franco, M. (2013). Situación automotriz: Colombia año 2012. Bogotá: BBVA Research Colombia. Retrieved from https://www.bbvaresearch.com/KETD/fbin/mult/1301_SitAutomotriz_Colombia_Ene13_tcm346-364303.pdf

Terzaghi, E., Wild, E., Zacchello, G., Cerabolini, B. E. L., Jones, K. C., & Di Guardo, A. (2013).

Forest filter effect: role of leaves in capturing/releasing air particulate matter and its associated PAHs. *Atmospheric Environment*, 74, 378–384.

<https://doi.org/10.1016/J.ATMOSENV.2013.04.013>

Thorpe, A., & Harrison, R. M. (2008). Sources and properties of non-exhaust particulate matter from road traffic: A review. *Science of The Total Environment*, 400(1–3), 270–282.

<https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2008.06.007>

Tolvét, S. (2009). Análisis de emisiones en ruta de vehículos diesel en Ciudad de México, Santiago y Sao Paulo. Retrieved from <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/102234>

Toro, M., Molina, E., Quiceno, D., Ospina, F., Acevedo, L., Jaramillo, M., ... Arteaga, D.

(2013). Inventario de emisiones atmosféricas del Valle de Aburrá, año base 2013. Medellín: Área Metropolitana del Valle de Aurrá, Universidad Pontificia Bolivariana. Retrieved from [http://www.metropol.gov.co/CalidadAire/InventariodeEmisiones/Inventario de emisiones atmosféricas 2013.pdf](http://www.metropol.gov.co/CalidadAire/InventariodeEmisiones/Inventario%20de%20emisiones%20atmosféricas%202013.pdf)

TPD, & Eypypsa. (2012). Informe diagnóstico: Formulación del plan maestro de movilidad del distrito de barranquilla. Barranquilla: Alcaldía de Barranquilla.

Velásquez, C. (2012). Quemadas sin control y calidad del aire en Barranquilla. Retrieved March 5, 2018, from <https://www.uninorte.edu.co/web/cvelasquez/blogs/-/blogs/quemas-sin-control-y-calidad-del-aire-en-barranquilla>

Watson, H. (1978). Vehicle driving patterns and measurement methods for energy and emissions assessment. Canberra: Australian Government Publishing Service. Retrieved from

https://bitre.gov.au/publications/1978/files/op_030.pdf

WHO. (2005). Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el

dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. Organización Mundial de la Salud. Retrieved from

http://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/69478/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf;jsessionid=F3F222B1029531ACB2E8B4F5273897C3?sequence=1

WHO. (2018). Air pollution. *WHO*. Retrieved from http://www.who.int/topics/air_pollution/en/

Yao, Z., Liu, H., & Li, Z. (2013). Statistical vehicle specific power profiling for urban freeways.

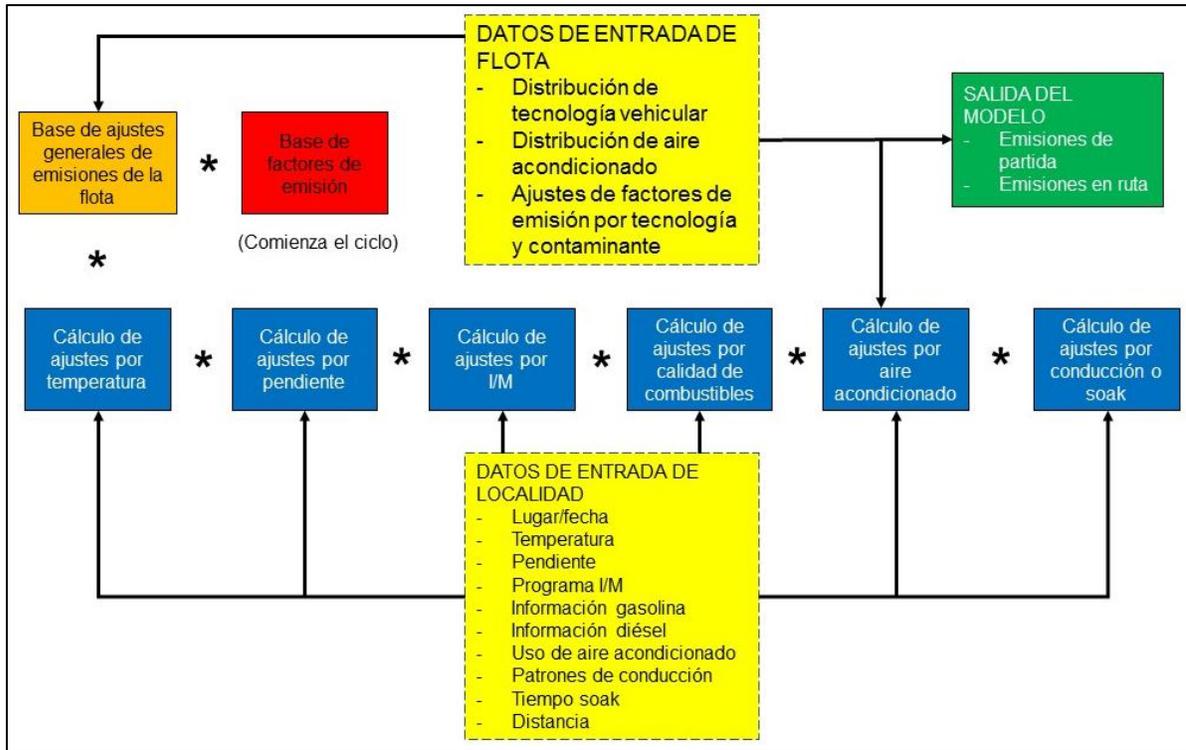
Procedia - Social and Behavioral Sciences, 96, 2927–2938.

<https://doi.org/10.1016/J.SBSPRO.2013.08.324>

Zereini, F., & Wiseman, C. L. S. (2010). *Urban airborne particulate matter : origin, chemistry, fate and health impacts*. Springer Verlag.

12. Anexos

Anexo 1 Arquitectura del Modelo IVE.



Nota: Recuperado de Nicol Davis & Tolvet (2008)

Anexo 2 . Corrección de la base de emisión

$$Q[t] = B[t] \times K_{(1)}[t] \times K_{(2)}[t] \times \dots K_{(x)}[t]$$

Variables locales	Variables de Calidad de Combustible K(Fuel)[t]	Variables de Potencia y Conducción K[dt]
Temperatura Ambiente K(Tmp)[t]	Gasolina Total	Potencia Especifica Vehicular (VSP)
Humedad Ambiente K(Hmd)[t]	Gasolina Azufre	Pendiente
Altitud K(Alt)[t]	Gasolina Plomo	Uso Aire Acondicionado
Programas de Inspección/Mantenición K(IM)[t]	Gasolina Benceno	Distribución de Partida en frío
Base de Factores de Corrección K(Cntry)[t]	Gasolina Oxigenados	
	Diesel Total	
	Diesel Azufre	

Nota: adaptado de Nicol Davis & Tolvet (2003)

Anexo 3. Cambios en las propiedades físicas del material particulado durante su formación.

Efecto físico	Parámetro cambiante	Lugar	Esquema
Nucleación	número de partículas	cámara de combustión del motor	
Aglomeración - coagulación	área superficial de las partículas	sistema de escape del motor	
Difusión - penetración	cambio de la masa	sistema de escape del motor	
Adsorción - condensación	aumento masa	túnel de dilución	

Nota: adaptado de Merkisz & Pielecha (2015).

Anexo 4. Porcentajes de camiones según su tamaño, registrados a nivel nacional

Modelo	Tamaño		
	Lt	Med	Hvy
1900-1992	29%	55%	17%
1993-1997	43%	35%	23%
1998-1999	51%	30%	19%
2000-2003	59%	29%	12%
2004-2011	62%	25%	13%
2004-2011	63%	23%	14%
2004-2011	63%	22%	15%
2012	64%	21%	15%

Nota: adaptado de Sistemas Sustentables (2012) y Mintransporte (2005)

Anexo 5. Significado de los diferentes bins de potencia.

Bins de potencia	Situación
0-10, 20-30 y 40-50	Representan el caso de potencia negativa. Ejemplo: cuando el vehículo desacelera o está en una calle en descenso.
11, 31 y 51	Representan una situación de potencia nula, o muy baja. Ejemplo: estar pausado momentáneamente en un semáforo.
12-19, 32-29 y 52-59	Representan la situación en la cual el vehículo tiene una potencia positiva. Ejemplo: Conducir a velocidad uniforme, acelerar, estar ascendiendo en una calle.

Nota: adaptado de Jiménez (1999) y Aristizabal et al. (2016)

Anexo 6. Significado de los diferentes estados de estrés del motor.

Estrés bajo	se asocia a condiciones en las cuales el vehículo transitaba con velocidades bajas, aceleración baja y una velocidad angular del motor baja (rpm del motor) durante los últimos 20 segundos de funcionamiento. Esta se presenta en los bins entre 0 y 19.
Estrés medio	ocurre con condiciones intermedias entre las descritas para carga baja y carga alta. Esta carga se observa con condiciones de bins entre 20 y 39.
Estrés alto	se presenta cuando los vehículos transitan con velocidades altas, aceleraciones y velocidad angular del motor alta (rpm del motor) durante los últimos 20 segundos de funcionamiento. Esta se asocia con el rango de bins comprendido entre 40 y 59.

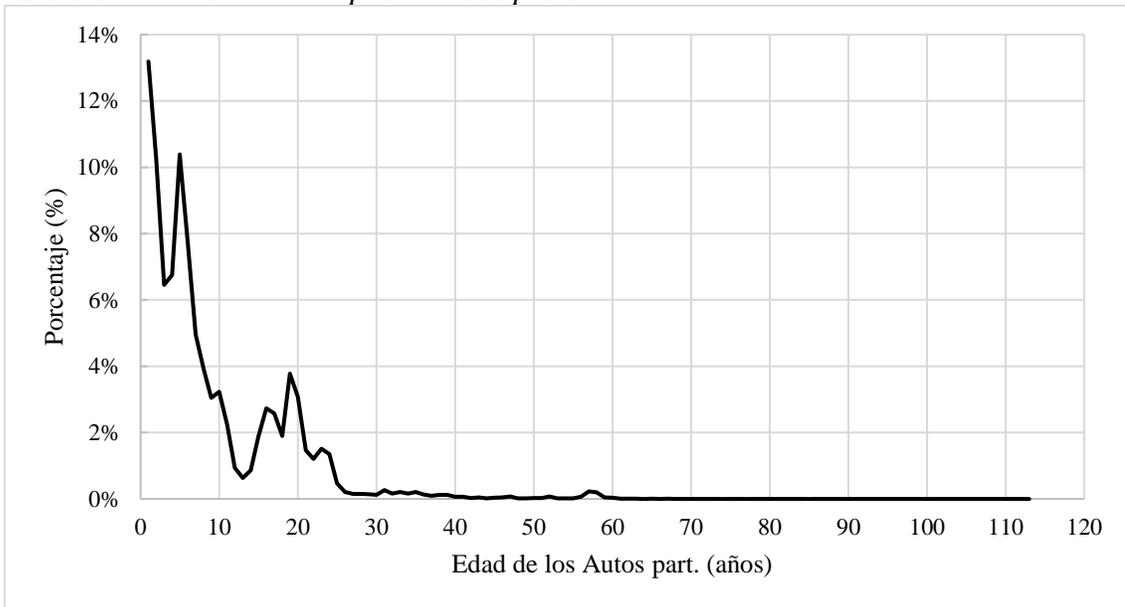
Nota: adaptado de Jiménez (1999) y Aristizabal et al. (2016)

Anexo 7. Clasificaciones de bins por potencia específica vehicular y estrés del motor.

IVE Bin Number			IVE VSP Range (kw/ tonne)
Low Stress	Medium Stress	High Stress	
0	20	40	-80.0 to -44.0
1	21	41	-44.1 to -39.9
2	22	42	-39.8 to -35.8
3	23	43	-35.7 to -31.7
4	24	44	-31.6 to -27.6
5	25	45	-27.5 to -23.4
6	26	46	-23.3 to -19.3
7	27	47	-19.2 to -15.2
8	28	48	-15.1 to -11.1
9	29	49	-11.0 to -7.0
10	30	50	-6.9 to -2.9
11	31	51	-2.8 to 1.2
12	32	52	1.3 to 5.3
13	33	53	5.4 to 9.4
14	34	54	9.5 to 13.6
15	35	55	13.7 to 17.7
16	36	56	17.8 to 21.8
17	37	57	21.9 to 25.9
18	38	58	26.0 to 30.0
19	49	59	>30.0

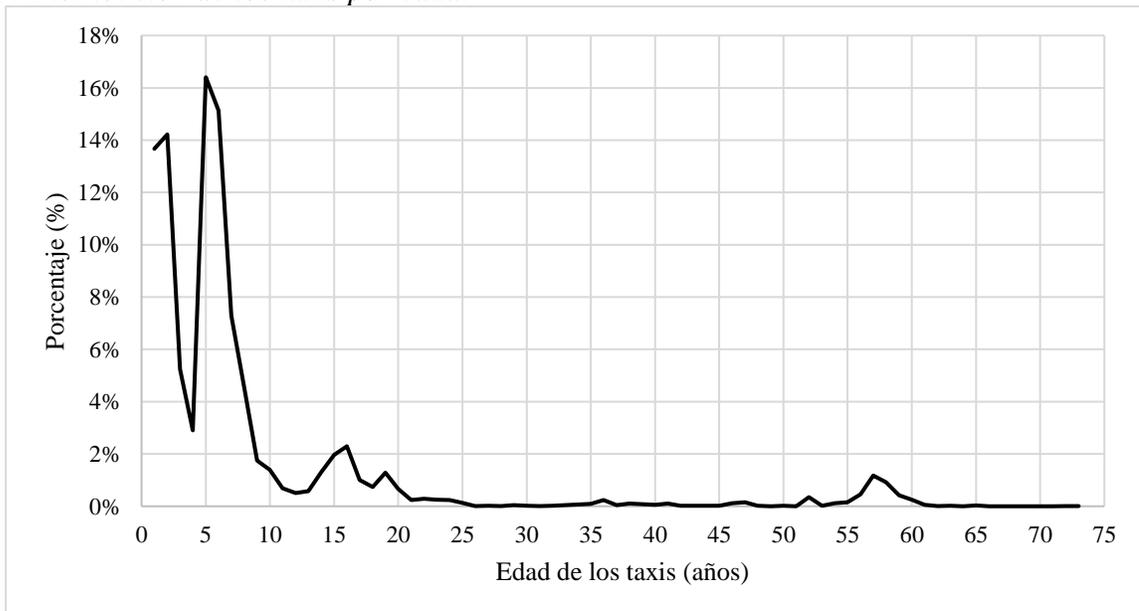
Nota: tomado de Lents et al. (2012)

Anexo 8. Distribución de los autos particulares por edad.



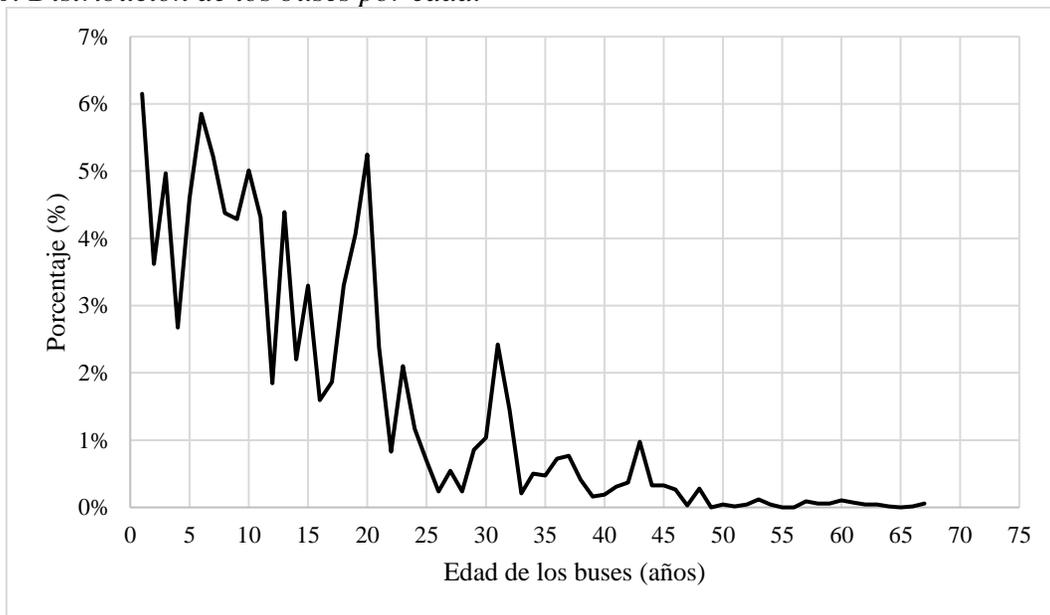
Nota: Elaboración propia.

Anexo 9. Distribución de los taxis por edad.



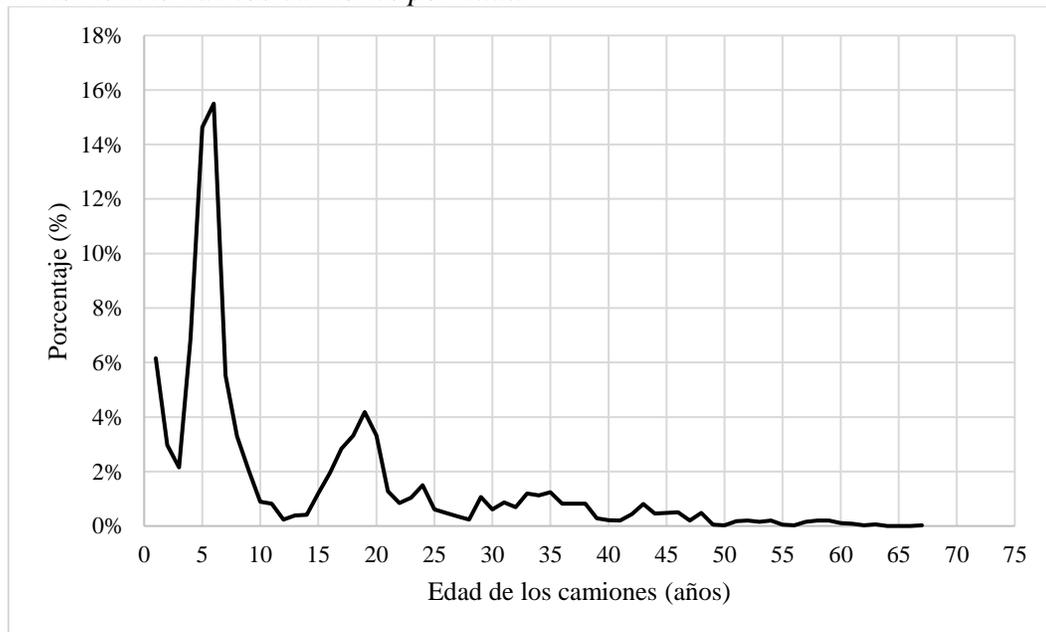
Nota: elaboración propia.

Anexo 10. Distribución de los buses por edad.



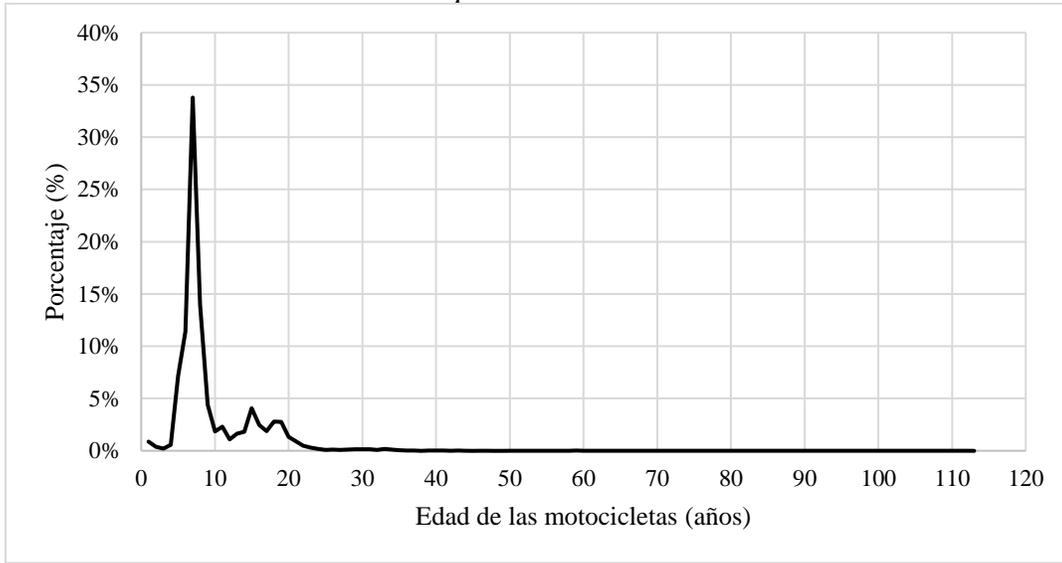
Nota: Elaboración propia.

Anexo 11. Distribución de los camiones por edad.



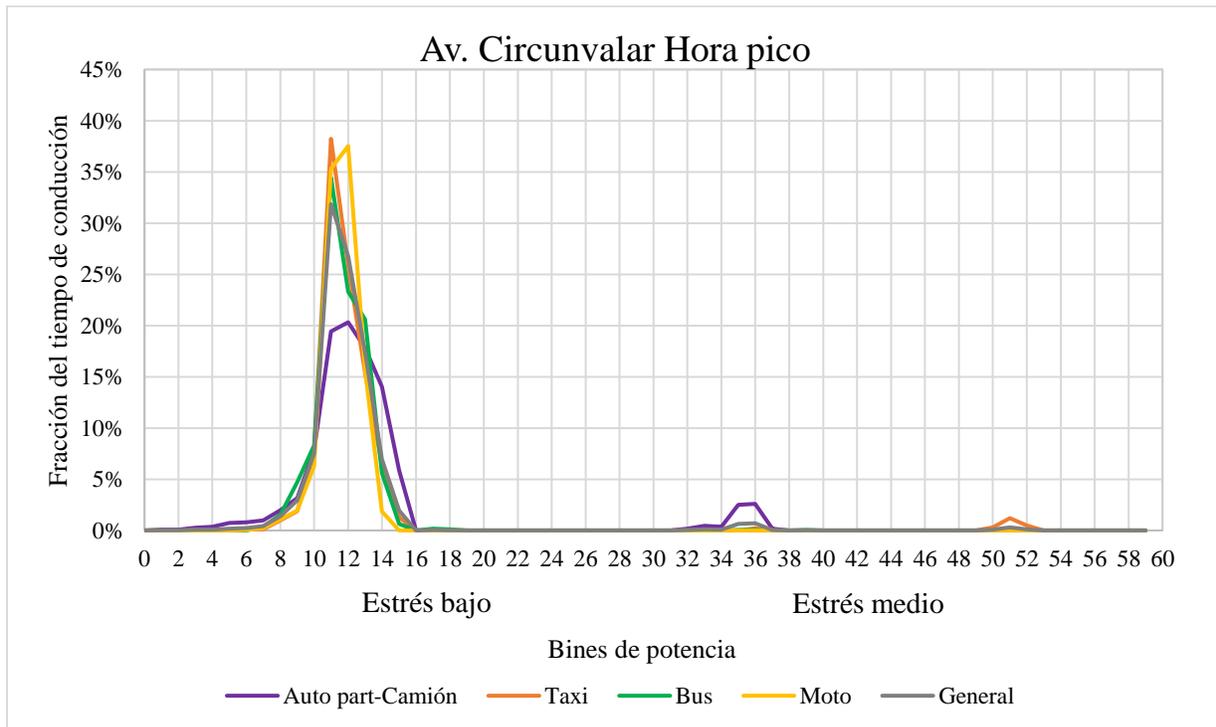
Nota: Elaboración propia.

Anexo 12. Distribución de las motocicletas por edad.



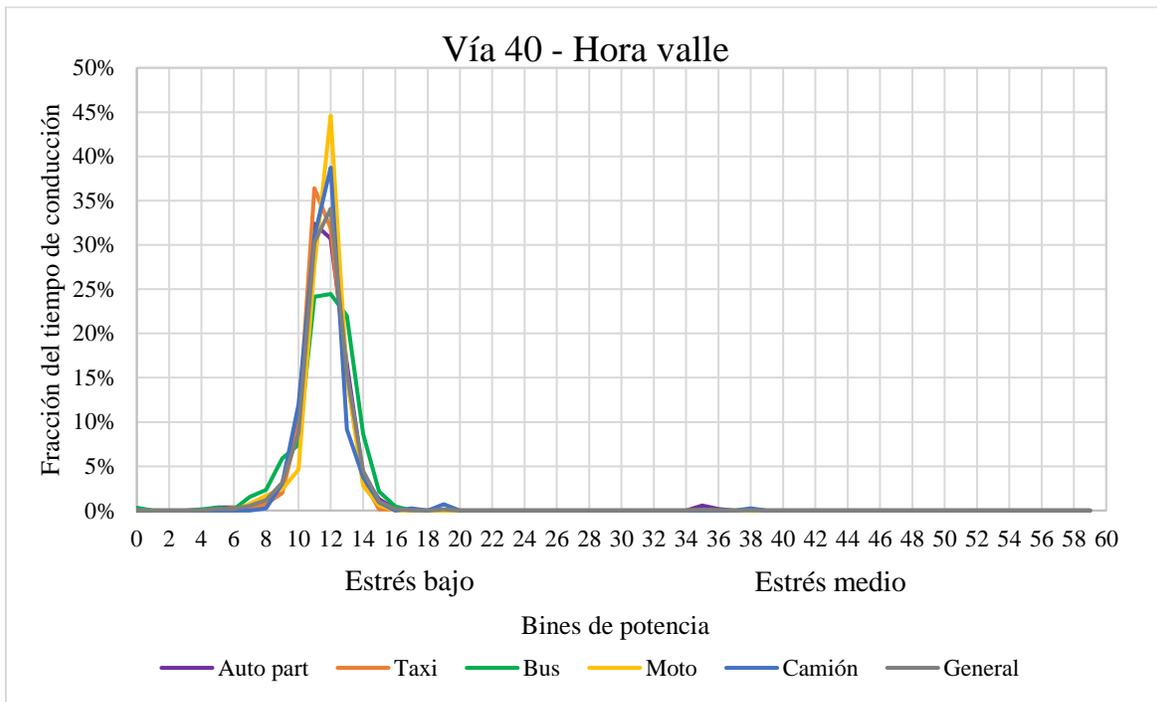
Nota: Elaboración propia.

Anexo 13. Patrones de conducción en la Av. Circunvalar - Hora pico.



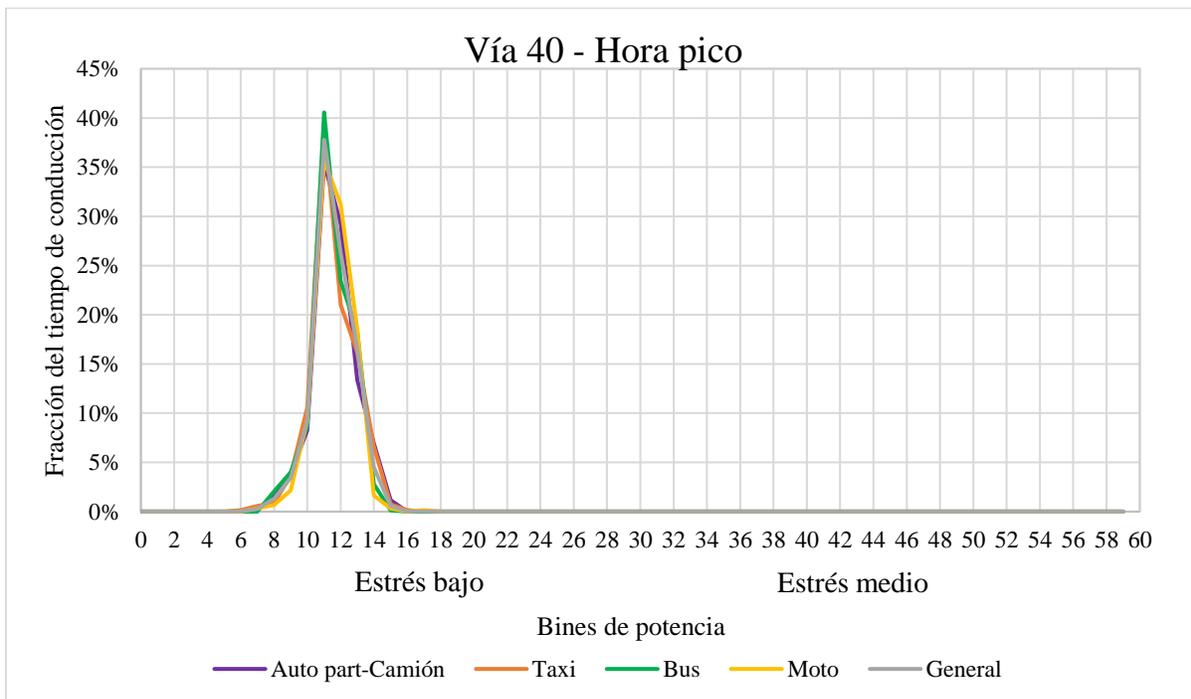
Nota: elaboración propia.

Anexo 14. Patrones de conducción en la Vía 40 - Hora valle.



Nota: elaboración propia.

Anexo 15. Patrones de conducción en la Vía 40 - Hora pico.



Nota: elaboración propia.