

**APROXIMACIÓN A UN INVENTARIO DE EMISIONES PARA BUSES DE
TRANSPORTE PÚBLICO URBANO EN LA CIUDAD DE CARTAGENA,
COLOMBIA.**

CATERINE ESTER AGUILAR VÉLEZ

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLIVAR
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERIA AMBIENTAL
CARTAGENA – BOLIVAR
2016**

**APROXIMACIÓN A UN INVENTARIO DE EMISIONES PARA BUSES DE
TRANSPORTE PÚBLICO URBANO EN LA CIUDAD DE CARTAGENA,
COLOMBIA.**

CATERINE ESTER AGUILAR VÉLEZ

Proyecto de Grado

Directora:

María Elena Huertas Bolaños Ph.D

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLIVAR
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERIA AMBIENTAL
CARTAGENA – BOLIVAR
2016**

AGRADECIMIENTOS.

En primer lugar, agradezco a **Dios** por darme la oportunidad de culminar esta maravillosa experiencia. Por llenarme de paciencia, fortaleza, amor hacia este proyecto con el cual pude adquirir numerosos conocimientos. Pero, sobre todo le agradezco por escuchar mi oración y permitirme encontrar este camino hacia la culminación de mi carrera de la mejor manera.

Agradezco a mis **Padres y Hermanos** por infundirme ánimo cuando mis fuerzas flaqueaban. Por aquellas insistencias, jalones de oreja e incluso regaños que terminaban en ratos amargos, pero que me incitaron a continuar cuando estaba a punto de rendirme. Gracias a ello, en especial a sus consejos, estoy aquí.

Agradezco a mi **Asesora**, María Huertas, por compartir conmigo su experiencia e insuperable paciencia frente a mis continuos retrasos y equivocaciones. Sin duda fue una gran ayuda y fuente de ánimo para continuar durante las complicaciones en el desarrollo de este proyecto. Gracias por su apoyo.

No menos importante, agradezco a mis preciados **amigos**. Por esos momentos divertidos que me hacían distraer a ratos, su compañía durante mis repetidos trasnochos y sobre todo, por recordarme siempre que puedo contar con ellos ante cualquier dificultad. Al leer esto ellos sabrán a quiénes me refiero.

Caterine Aguilar Vélez.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	9
2. MARCO TEÓRICO	11
2.1 Inventarios de emisiones	11
2.1.1 Inventarios de fuentes móviles.....	12
2.2 Control de emisiones fuentes móviles	13
2.2.1 Convertidores Catalíticos.....	14
2.2.2 Filtro de partículas.....	15
2.2.3 Válvula recirculación de gases de escape (EGR).....	15
2.2.4 Sistema de ventilación positiva del Carter (PCV).....	16
2.2.5 Canister.....	17
2.3 Calculo de emisiones.....	18
2.3.1 Factores de emisión.....	18
2.3.2 Mediciones directas.....	19
2.3.3 Mediciones indirectas.....	19
2.4 Ciclos de conducción	20
2.4.1 Construcción ciclo de conducción.....	20
2.4.2 Diferentes ciclos de conducción.....	21
2.4.3 Ciclo de conducción US FTP 75.....	22
3. ESTADO DEL ARTE	24
3.1 Ciclos de conducción	24
3.2 Modelos de estimación de emisiones	26
3.2.1 Inventario de emisiones Bogotá.....	27
3.2.2 Inventarios de emisiones Antioquia.....	28
3.2.3 Inventario de emisiones Córdoba.....	29
3.2.4 Inventario de emisiones Cartagena.....	29

4. OBJETIVOS.....	31
4.1 Objetivo general.....	31
4.2 Objetivos específicos.....	31
5. METODOLOGÍA.....	32
5.1 Determinación ciclo de conducción.....	32
5.1.1 Lugar de toma de datos.....	34
5.1.2 Selección del instrumento.....	35
5.1.3 Identificación de variables.....	36
5.1.4 Recolección de datos.....	37
5.1.5 Organización de datos.....	37
5.1.6 Método de las mínimas diferencias.....	37
5.1.7 Definición de parámetros.....	38
5.1.8 Escogencia del recorrido más próximo a la media.....	40
5.1.9 Validación.....	40
5.2 Calculo de emisiones ive.....	41
5.2.1 Modelo IVE.....	41
5.2.2 Ejecución del modelo.....	50
6. RESULTADOS.....	56
6.1 Verificación del instrumento.....	57
6.2 Ciclo de conducción buses.....	58
6.3 Resultados modelo ive.....	62
6.3.1 Emisiones con Válvula de Recirculación de Gases de Escape.....	63
6.3.2 Emisiones sin Válvula de Recirculación de Gases de Escape.....	66
6.3.3 Emisiones Fin de Semana.....	68
6.4 Comparación resultados semana y fin de semana.....	72
6.5 Factores de emisión.....	73
6.6 Efecto de las variables ambientales en las emisiones.....	74
7. CONCLUSIONES.....	75

8. TRABAJO FUTURO.....77

9. REFERENCIAS.....78

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Emisiones evaporativas vehículos	13
Figura 2. Funcionamiento Válvula EGR	16
Figura 3. Esquema funcionamiento Canister	17
Figura 4. Ciclos de conducción Federal Test Procedure (FTP)	22
Figura 5. Diagrama proceso de construcción ciclo de conducción	33
Figura 6. Ruta de medición de datos para construcción ciclo de conducción.....	34
Figura 7. Diagrama metodología escogencia de ruta estudio	35
Figura 8. Ventana localidad modelo IVE	51
Figura 9. Ventana Flota modelo IVE	53
Figura 10. Ventana factores de emisión modelo IVE	55
Figura 11. Verificación instrumento de medición (Dispositivo móvil – GPS).....	57
Figura 12. Ciclo de Conducción Buses Avenida Pedro de Heredia.	58
Figura 13. Lugares donde se presentan mayor disminución de velocidad y paradas	60
Figura 14. Emisiones contaminantes criterio utilizando EGR como sistema de control de emisiones	64
Figura 15. Emisiones contaminantes criterio Ciclo de Conducción sin utilizar EGR como sistema de control de emisiones	67
Figura 16. Gráfica emisiones contaminantes criterio día Domingo	69
Figura 17. Gráfica emisiones contaminantes criterio día sábado.....	71
Figura 18. Emisión óxidos de azufre (SOx) Fin de semana	72
Figura 19. Emisión porcentual semana y fin de semana contaminantes criterio ...	73

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Pasos construcción inventario de emisiones	11
Tabla 2. Sistemas de control de emisión comunes.....	14
Tabla 3. Tipos de medición de datos en ciclos reconocidos	21
Tabla 4. Parámetros de estudio ciclos de conducción FTP 72 y FTP 75.....	23
Tabla 5. Ventajas y desventajas GPS - dispositivos móviles.....	36
Tabla 6. Parámetros más conocidos en los ciclos de conducción	39
Tabla 7. Parámetros seleccionados para la construcción del ciclo de conducción	40
Tabla 8. Información contenida en el modelo IVE.....	42
Tabla 9. Distribución Bin, VSP y estrés del motor (ES)	45
Tabla 10. Rango Bines Potencia Específica Vehicular (VSP).....	48
Tabla 11. Significado Bines Potencia Específica Vehicular (VSP).....	49
Tabla 12. Divisor de velocidad calculo Estrés del Motor (ES).....	50
Tabla 13. Bines Estrés del motor (ES).....	50
Tabla 14. Características Bus de transporte Urbano empleado	54
Tabla 15. Valores representativos de los parámetros del Ciclo de conducción	59
Tabla 16. Velocidad promedio ciclos de conducción buses en ciudades del mundo.	60
Tabla 17. Velocidad promedio de lugares donde se presentan mayor disminución de velocidad y paradas en los periodos de mayor flujo vehicular	61
Tabla 18. Niveles de servicio para vías urbanas.....	62
Tabla 19. Emisiones resultantes Ciclo de Conducción utilizando EGR	63
Tabla 20. Emisiones resultantes Ciclo de Conducción sin EGR.....	66
Tabla 21. Emisiones contaminantes criterio Buses día Domingo	69
Tabla 22. Emisiones contaminantes criterio Buses día Sábado	70
Tabla 23. Comparación factores de emisión calculados y pertenecientes al modelo IVE	74

1. INTRODUCCIÓN

La liberación de contaminantes por parte de las fuentes móviles es una realidad que ya no puede ser catalogada como propia de los países desarrollados. Hoy en día diversas ciudades pertenecientes a países en vía de desarrollo poseen altas emisiones de contaminantes sin incluir la porción correspondiente a las fuentes fijas que en ellas se ubican. El avance tecnológico y la facilidad de adquisición de vehículos en la actualidad han contribuido notablemente al crecimiento de esta problemática que en un principio puede no ser vista como una situación de mayor preocupación, pero que puede proporcionar a largo plazo un gran impacto en la salud de los ciudadanos.

De acuerdo a investigaciones recientes se revela que el transporte automovilístico contribuye en la contaminación del aire en las ciudades importantes y asentamientos cerca del 80% en emisiones totales (Bespalov, Gurova, & Samarskaya, 2016). Dichas emisiones son consideradas unas de las promotoras de las enfermedades cardiovasculares y respiratorias presentes en las ciudades (Shendell, 2014). La ciudad de Cartagena, ciudad en la cual se realiza el presente proyecto, tampoco es ajena a esta situación. La calidad del aire también ha sido afectada hasta el punto de perjudicar la salud de sus habitantes durante estos últimos años. La infección respiratoria aguda (IRA) constituye el principal problema de salud pública, aumentando la morbilidad y mortalidad en niños menores de cinco años (EPA Cartagena, 2009; Cartagena Cómo Vamos, 2015). Debido a que el impacto que tienen los contaminantes en el aire en la salud pública es ampliamente reconocido, y aunque actualmente no se conoce exactamente su efecto en la población colombiana (Sánchez et al., 2013), en el transcurso de los años se ha procedido a implementar diferentes técnicas de medición de emisiones con el propósito de identificar los principales agentes contaminantes.

Por medio de técnicas de medición indirecta como la utilización de modelos de estimación de emisiones, se ha logrado determinar la cantidad de contaminantes liberados en la operación diaria de los automóviles en ciudades o regiones en específico. Anteriormente estos modelos eran creados con el propósito de ser utilizados solo en países desarrollados, puesto que su cálculo interno estaba diseñado solo para cumplir con las características geográficas, tecnológicas, y culturales de los mismos. Esto representaba un problema para las localidades que no poseían las características de estas regiones, debido a que las emisiones contaminantes se ven afectadas directamente por los factores externos del lugar en el cual son producidas. Por tal razón, con el paso del tiempo se abrió camino a la creación de modelos especializados en cálculos de emisiones ajustables a todo tipo de condiciones como tales el modelo IVE.

Modelos como el modelo internacional de emisiones vehiculares (IVE), son especialmente diseñados para tener la flexibilidad necesaria para obtener las emisiones provenientes de fuentes móviles en países en vía de desarrollo, además de poder ser utilizado también en países desarrollados. De manera particular, el modelo IVE posee la ventaja de tomar en cuenta las diferentes tecnologías y condiciones que existen en la mayoría de los países (Guo et al., 2007).

Hasta el momento Colombia ha utilizado diferentes modelos de estimación de emisiones para fuentes móviles, entre los cuales se encuentra el modelo IVE. Ciudades principales como Bogotá y departamentos como Córdoba y Antioquia, han constituido inventarios de emisiones a partir de cálculos realizados con el modelo IVE, concentrándose principalmente en la medición de contaminantes criterio en vías principales. Sin embargo, se ha trabajado con la flota total vehicular sin dedicarse a un tipo de vehículo en particular como los buses de transporte público Urbano.

La misma problemática abarca a los estudios realizados en la ciudad de Cartagena. Pocos son los proyectos que incluyen la participación del modelo IVE en la construcción de inventarios de emisiones o las emisiones producto de los buses siendo estos grandes contribuyentes a la contaminación atmosférica en las ciudades.

Frente a este panorama, el presente proyecto se enfocará en dar a conocer la contribución contaminante que los buses de transporte público urbano generan en una de las principales vías de la ciudad de Cartagena, por medio de la ejecución del modelo IVE. Adicionalmente, con el propósito de complementar los estudios realizados con anterioridad, se describirá la metodología aplicada para la construcción del ciclo de conducción como punto de partida para el cálculo de emisiones.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 INVENTARIOS DE EMISIONES

Un inventario de emisiones es una herramienta cuantitativa que representa las emisiones contaminantes producidas en un área delimitada. Son empleados durante el proceso de planeación y la gestión de la calidad del aire del lugar de estudio, dado que, proporciona una visión general de posibles causas de no cumplimiento con las normas de calidad del aire e información clave para los modelos de calidad aire (Instituto Nacional de Ecología, 2005). Para su construcción cuentan con una serie de pasos establecidos en la tabla 1 (Radian International LLC, 1997).

Tabla 1. Pasos construcción inventario de emisiones

PASOS	DEFINICIÓN
1. Propósito	Se refiere al fin con el cual se crea el inventario. Debe responder a la pregunta ¿Para qué se realiza?
2. Características	Tipo de fuente, año base, tipos de contaminantes, proyecciones y características de tiempo que se tienen en cuenta para la construcción del inventario.
3. Determinación de fuente	Sea fuente puntual, móviles, área o natural.
4. Recopilación de datos	Recolección de datos a través de métodos definidos por el tipo de fuente o a través de investigaciones realizadas por terceras personas.
5. Calculo estimación emisiones	Estimación de emisiones de acuerdo a la metodología escogida: puede ser manual o electrónica.
6. Modelado	Se realiza el cálculo de emisiones por medio de softwares diseñados especialmente para la estimación de emisiones.
7. Evaluar incertidumbre de los datos	Comparar los resultados obtenidos con los de inventarios similares para examinar la incertidumbre.
8. Documentar los resultados	Guardar la evidencia del inventario que se construyó.

Fuente: adaptado de Radian Internacional LLC, 1997.

Aunque posean la misma metodología de construcción, en su contenido, los inventarios varían entre sí, debido a que cada inventario de emisiones posee diferentes características que describen su naturaleza fundamental, como lo son el tipo de fuente, año base, tipos de contaminantes (Radian International LLC, 1997). Un ejemplo de ello son los inventarios de fuentes móviles, área o fuentes puntuales. Dependiendo el tipo de fuente cada inventario describirá un comportamiento distinto para la emisión de los contaminantes al cual fue construido.

2.1.1 Inventarios de fuentes móviles.

El desarrollo de un inventario de emisiones para fuentes móviles tiene el objetivo de cuantificar las emisiones generadas por una gran flota vehicular con diversas características de emisión (Radian International LLC, 1997). Para su cálculo se debe tener en cuenta las características generales como específicas del parque automotor; así como topografía, condiciones ambientales del lugar de estudio, tipo de combustible utilizado y patrones de conducción.

La metodología de construcción de un inventario de fuentes móviles cuenta con la misma estructura enunciada para la construcción de un inventario de emisiones (tabla 1), omitiendo el tercer paso y variando significativamente en el modelado ya que se deben utilizar softwares especializados en cálculo de emisiones de provenientes de procesos de combustión y evaporación.

En general, los inventarios de emisiones puede poseer tantos contaminantes como se deseen calcular, no obstante, el propósito establecido para el inventario va a determinar cuáles contaminantes deben ser incluidos (Instituto Nacional de Ecología, 2005). Refiriéndonos a los inventarios de fuentes móviles se concentran en las emisiones producto de los procesos de combustión. Se ha detectado que en la mayor parte de las áreas urbanas los vehículos automotores contribuyen en gran medida a las emisiones de gases orgánicos (GOT), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NOx), óxidos de azufre (SOx), material particulado, compuestos tóxicos y especies que reducen la calidad del aire y la visibilidad del panorama urbano (Instituto Nacional de Ecología, 2005). Dichos contaminantes son resultado de procesos diferentes, siendo las emisiones más comúnmente consideradas las del escape, que resultan de la combustión y se emiten por el tubo de escape del vehículo (Radian International LLC, 1997).

Aparte de las emisiones del tubo de escape, también se generan emisiones provenientes de procesos evaporativos. Este tipo de emisiones pueden presentarse sin tener en cuenta si el vehículo se encuentra o no en operación. Entre las emisiones evaporativas se incluyen:

- Emisiones del vehículo recién apagado con el motor caliente.
- Emisiones del vehículo en reposo con el motor frío.
- Emisiones en operación.
- Emisiones durante la recarga de combustible.
- Emisiones diurnas.

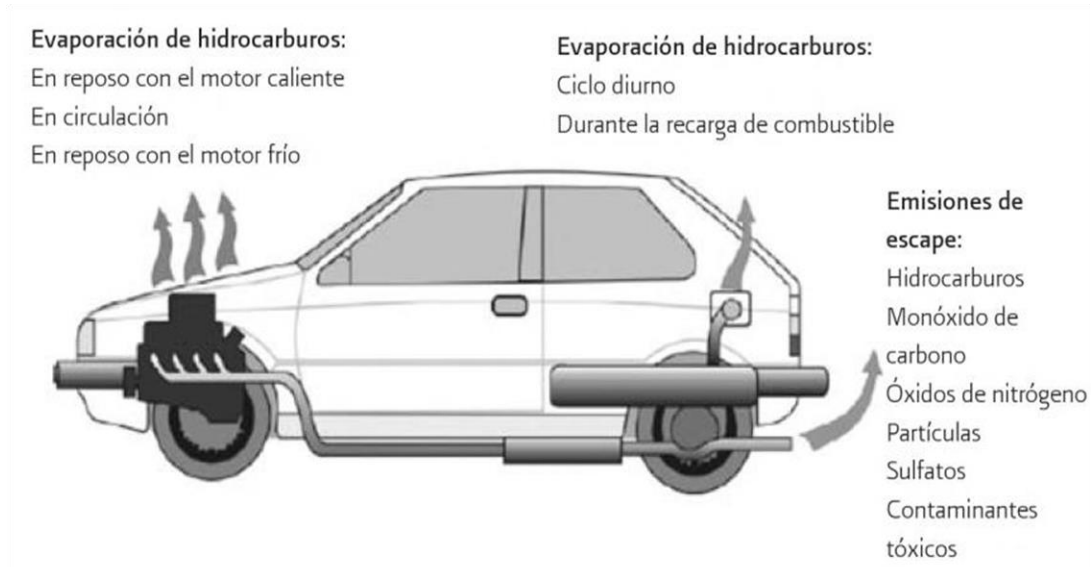


Figura 1. Emisiones evaporativas vehículos
Fuente: tomado de Instituto Nacional de Ecología, 2009.

2.2 CONTROL DE EMISIONES FUENTES MÓVILES

Los sistemas de control de emisiones o también conocidos como tecnologías de control de emisión son equipos especializados en el control de emisiones en fuentes móviles. Son diseñados para adaptarse dependiendo al tipo, año, modelo del vehículo; y cada uno cuenta con la función de reducir uno o varios contaminantes dependiendo de la función y ubicación en la cual se encuentre dentro del vehículo.

Existe una gran variedad de sistemas de control de emisión, no obstante, a continuación se referirá a los sistemas más comunes utilizados en países en vía de desarrollo.

Tabla 2. Sistemas de control de emisión comunes

Sistema	Contaminantes reducidos	Ubicación en el vehículo
Catalizador dos vías	Hidrocarburos (HC) Monóxido de carbono (CO)	Tubo de escape
Catalizador tres vías	Hidrocarburos (HC) Monóxido de carbono (CO) Óxidos de nitrógeno (NO _x)	Tubo de escape
Filtro de partículas	Material particulado (PM)	Tubo de escape
Válvula recirculación de gases de escape (EGR)	Óxidos de nitrógeno (NO _x)	Motor
Sistema de ventilación positiva del Carter (PCV)	Hidrocarburos (HC)	Motor
Canister	Hidrocarburos (HC)	Tanque de combustible

2.2.1 Convertidores Catalíticos.

La función principal de un convertidor catalítico radica en la reducción de contaminantes de los gases de escape provenientes del motor, mediante una reacción catalítica. Consiste en un reactor metálico situado en el tubo de escape que posee en su interior una estructura cerámica en forma de panel recubierta por los materiales catalizadores.

La sustancia catalizadora se encuentra conformada por una mezcla de Paladio (Pd), Platino (Pt) y Rodio (Rh). Durante el proceso de conversión de los contaminantes, los materiales reaccionan en combinación de calor oxidando los gases expedidos para convertirlos en gases menos contaminantes. Se les atribuye la desventaja que solo son eficientes con gasolina sin plomo, puesto que el plomo recubre la superficie catalizadora inhibiendo su función. La presencia de plomo es tan grave que un solo tanque de gasolina con plomo utilizado reduce casi al 50% la eficiencia del catalizador (Martínez, 2014).

Existen tres tipos de catalizadores, clasificados dependiendo la cantidad de contaminantes que cataliza o número de vías; no obstante, nos concentraremos en dos tipos: catalizador de dos vías y tres vías.

2.2.1.1 Catalizador de dos vías.

El nombre del convertidor catalítico reside en el número de contaminantes que cataliza. En el caso del catalizador de dos vías, se refiere a que únicamente se encarga de la transformación de dos contaminantes: el monóxido de carbono (CO) y los hidrocarburos no combustionados (HC). Para su correcto funcionamiento, el catalizador debe trabajar bajo condiciones de exceso de oxígeno de manera que cuando lo atraviesen los gases provenientes de la combustión, sean expedidos al exterior transformados en dióxido de carbono (CO₂) y agua.

2.2.1.2 Catalizador de Tres vías.

El catalizador de tres vías funciona bajo las mismas condiciones que un catalizador de dos vías. Su diferencia al primero se debe a que aparte del monóxido de carbono (CO) y los hidrocarburos no combustionados (HC), también transforma los óxidos de nitrógeno (NO_x), en gases más inofensivos: nitrógeno (N₂), dióxido de carbono (CO₂) y agua (H₂O). A diferencia de los anteriores, este catalizador no funciona en motores Diesel debido a que estos tienen una proporción de combustible y de aire diferente de los motores a gasolina (UNEP, 2009).

2.2.2 Filtro de partículas.

La función principal del filtro de partículas es capturar y oxidar el material particulado presente en el flujo de gases de escape. Por lo general, se encuentra ubicado después del catalizador de manera que el filtro recoge aquellas partículas no catalizadas, constituidas en su mayoría por carbono e Hidrocarburos no combustionados para su posterior quema. Para llevar a cabo el proceso de combustión dentro del filtro de partículas se requiere la presencia de exceso de oxígeno y altas temperaturas.

2.2.3 Válvula recirculación de gases de escape (EGR).

Tal como su nombre lo indica, la válvula EGR cumple con la función de recircular los gases producto de la combustión al colector de admisión. Cuando la temperatura aumenta durante el proceso de combustión la producción de monóxido de carbono (CO) y los hidrocarburos no combustionados (HC) se reduce, no obstante la producción de los óxidos de nitrógeno (NO_x) aumenta. Debido a esto la válvula dirige

nuevamente los gases a la cámara de combustión y así disminuye la temperatura junto con la generación de óxidos de nitrógeno (NO_x).

La cantidad de gas enviada a través del motor varía de acuerdo con las condiciones de funcionamiento. Una de las ventajas de aplicar la válvula EGR es mejorar la combustión dado que se produce a bajas temperaturas (Guevara, 2010). Las válvulas pueden ser de dos tipos: manuales y electrónicas.

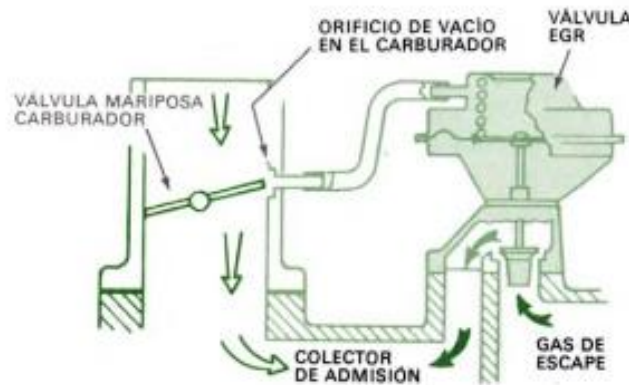


Figura 2. Funcionamiento Válvula EGR
Fuente: tomado de Crouse, 1993.

2.2.4 Sistema de ventilación positiva del Carter (PCV).

Este sistema de control de emisión posee la función de evitar que los vapores nocivos expedidos por el aceite en el Carter (Motor) y la producción de gases en la gasolina sean expulsados a la atmosfera. Durante su funcionamiento el aire fluye a través del Carter hasta el colector de admisión, recogiendo los vapores del Carter e hidrocarburos no quemados (HC) o parcialmente quemados para ser devueltos a la cámara de combustión donde son quemados nuevamente. Puede ser: sistemas abiertos o cerrados.

2.2.4.1 Sistemas abiertos.

En los sistemas abiertos el aire fluye a través de un tapón relleno de aceite para captar los vapores y conducirlos al colector de inmisión. Sin embargo, cuando el Carter presenta un alto volumen de vapores, los mismos tienden a devolverse por

medio del tapón hacia la atmósfera. Esta desventaja lo convierte en un sistema de control de emisiones no eficiente.

2.2.4.2 Sistemas cerrados.

A diferencia de los sistemas abiertos el flujo de aire proviene del alojamiento del filtro de aire, por lo tanto sin importar el volumen de vapores estos no son expedidos a la atmosfera. La ventaja de los sistemas cerrados consiste en que no permiten el escape de los vapores lo cual los convierte en un sistema de control de emisiones eficiente.

2.2.5 Canister.

Es un sistema de control de emisiones que se encarga de retener las emisiones evaporativas producidas en los depósitos de combustible de los automóviles. Dado que los combustibles como la gasolina tienden a evaporarse fácilmente, el Canister absorbe estos vapores por medio de un sistema de filtros de carbón activado para después conducirlos a la cámara de combustión para su posterior quema.

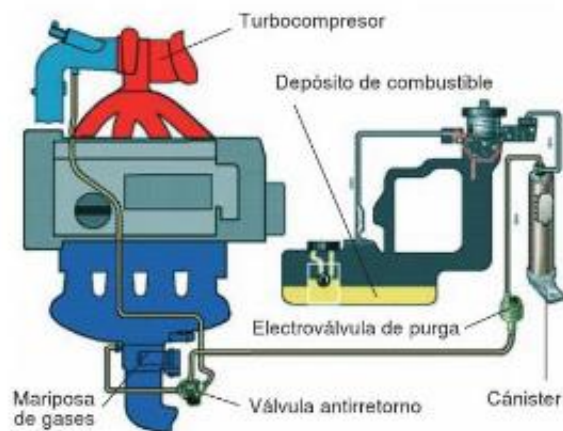


Figura 3. Esquema funcionamiento Canister
Fuente: tomado de Pérez, 2011.

2.3 CÁLCULO DE EMISIONES

Existen diferentes metodologías para el cálculo de emisiones, a continuación se describirán brevemente cada una de ellas:

2.3.1 Factores de emisión.

Un factor de emisión es un valor representativo que relaciona la cantidad de un contaminante emitido a la atmósfera con una actividad asociada a la liberación de ese contaminante. Estos factores se expresan normalmente como la masa del contaminante dividido por una unidad de masa, volumen, distancia, o duración de la actividad de emisión de contaminante (U.S EPA, 1995), dependiendo del tipo de fuente a la cual se esté analizando; en el caso de las fuentes móviles se expresa en unidad de masa por unidad de distancia (kg/km).

El cálculo de factores de emisión facilita la estimación de las emisiones procedentes de diversas fuentes de contaminación del aire. La ecuación general para la estimación de emisiones definida en AP 42 (U.S EPA, 1995) es:

$$E = A * FE * (1 - RE/100) \quad (1)$$

Donde,

E: Emisión (kg/día).

A: Actividad (km/día).

FE: Factor de emisión (kg/km).

RE: Eficiencia de reducción de emisiones, %.

Por lo general, los factores de emisión son obtenidos a través de una muestra de mediciones directas o indirectas (Clean Air Institute, 2013; Instituto Nacional de Ecología, 2009). Sin embargo, su obtención acarrea incertidumbre, de acuerdo a Clean Air Institute (2013), debido a:

- Variaciones, a veces sustanciales de emisiones entre vehículos similares debido a condiciones mecánicas diferentes.
- Incertidumbres propias de las mediciones.
- Diferencias entre las condiciones locales y las condiciones consideradas en las diferentes pruebas.

2.3.2 Mediciones directas.

Son pruebas controladas en las cuales se miden las emisiones producidas por el vehículo durante un tiempo determinado y bajo condiciones específicas. El proceso requiere la utilización de equipo para la identificación de contaminantes y medida de concentraciones. No obstante, en ocasiones este resulta poco viable para los países que no cuentan con los recursos financieros suficientes para realizar estas pruebas. Entre los métodos directos más populares se encuentran: mediciones a bordo, pruebas en dinamómetros y sensor remoto (Clean Air Institute, 2013).

2.3.3 Mediciones indirectas.

Las mediciones indirectas consisten en el cálculo de emisiones por medio de softwares especializados. Para ello se hace uso de los modelos de estimación de emisiones establecidos internacionalmente que utilizan la información adquirida a través de los métodos directos ajustada a las condiciones teóricas de cada modelo (Clean Air Institute, 2013). Entre los modelos más reconocidos internacionalmente se encuentran: Motor Vehicle Emission Simulator (MOVES) y Computer Programme to Calculate Emissions from Road Transport (COPERT).

A parte de lo descrito anteriormente, existen otros métodos indirectos que no se basan en la aplicación de elementos tecnológicos para su desarrollo, entre los cuales se enuncia el método de balance de masas, siendo este un método usado generalmente en los casos que no existen datos de muestreos en la fuente (métodos directos), factores de emisión u otros métodos desarrollados (Radian International LLC, 1997).

2.3.3.1 Método de balance de masas.

El método de balance de masas, también conocido como método de balance de materiales, es un procedimiento que se desarrolla obedeciendo las leyes de la conservación de la materia y la energía. A través de este se representan las entradas y salidas de un sistema con el fin de estimar indirectamente las emisiones

contaminantes (MAVDT, 2010). El método destaca en que pueden ser utilizado para cualquier tipo de fuente generadora de contaminantes (Radian International LLC, 1997) y es apropiado para situaciones donde se pierde determinada cantidad de material por liberación a la atmósfera (MAVDT, 2010).

2.4 CICLOS DE CONDUCCIÓN

Los ciclos de conducción son gráficas en función del tiempo y la velocidad, que representan las características o patrones típicos de manejo de una ciudad o bien sea en un área definida. Por medio de su determinación se pueden obtener parámetros como velocidad, tiempo del recorrido, velocidad promedio, aceleración e incluso se tienen en cuenta características geográficas (pendiente) que modifican los anteriormente mencionados. No obstante, la velocidad y el tiempo son definidos como los parámetros que definen el ciclo de conducción, puesto que los siguientes, a excepción de la pendiente que es un dato externo, pueden ser obtenidos a partir de los primeros.

El enfoque principal de los ciclos de conducción se ha centrado en aplicaciones relacionadas con la reducción del consumo de combustible, emisiones de contaminantes (Cedillo, 2013) y evaluación del impacto del tráfico vehicular (Achour & Olabi, 2016). A su vez, son un importante concepto en los modelos de estimación de emisiones (Zhang , Zhao, & Shen , 2012), por medio de los cuales se lleva a cabo a construcción de inventarios de emisiones para fuentes móviles.

2.4.1 Construcción ciclo de conducción.

Para su creación se procede a la obtención de datos de actividad segundo a segundo, normalmente recolectados utilizando dispositivos GPS en diferentes tipos de vías, clases de vehículos (Zhang , Zhao, & Shen , 2012), tipo de ruta, periodo de tiempo y nivel de velocidad (Hung et al., 2007). A través de tres métodos: Chase-car, mediciones a bordo e híbrido: de chase-car y mediciones a bordo. El método Chase-car implica que un carro equipado siga un vehículo escogido aleatoriamente, imitando sus patrones de conducción. En el método de medición a bordo, el vehículo de interés es equipado con instrumentos para recolectar la información de viaje y el método híbrido, es la combinación del método chase-car y mediciones a bordo por el cual se registra la velocidad del vehículo (Adak, Sahu, & Elumalai, 2016).

Tabla 3. Tipos de medición de datos en ciclos reconocidos

Ciclo de conducción	Método
FTP 72/75	Mediciones a bordo
ARTEMIS Cycle	
Improved European Cycle	
LA92/Unified Cycle	Mediciones Chasing Car
LA01	
Edinburgh Cycle	
Sydney Cycle	
Melbourne Peak Cycle	
Perth Cycle	

Fuente: Adaptado de Hung, Tong, Ha, Lee, & Pao, 2007.

Tal como se puede observar en la tabla 3, varios ciclos de conducción reconocidos obtuvieron la información hoy representada en gráficas por medio de la aplicación de uno de los tres tipos de mediciones. De acuerdo a investigaciones para la recolección de datos puede elegirse cualquiera de los tres métodos, dado que ninguno posee ventaja sobre otro; no obstante, en su selección se debe tener en cuenta los requisitos de los estudios individuales y prestar atención a las limitaciones correspondientes (Tong & Hung, 2010).

2.4.2 Diferentes ciclos de conducción.

Muchos investigadores han coincidido que las características de manejo de cada ciudad es única a causa de su diferente composición en la flota vehicular, comportamiento de manejo y topografía del terreno (Hung, Tong, Ha, Lee, & Pao, 2007). Por consiguiente, diversos de estudios se han llevado a cabo en el desarrollo de los ciclos de conducción, resultando en numerosos ciclos de conducción de diferentes países y regiones. Dentro de los ejemplos de ciclos de conducción existentes se incluyen los ciclos FTP-72/75, ciclos CARB unified (LA92), ciclo LA01, Ciclos Europeos, Ciclo de conducción de Atenas, ciclo de conducción de Perth (Australia), ciclo de conducción Melbourne Peak (Australia), ciclo de conducción de Sydney (Australia), ciclo de conducción INRETS comercial vehicles (France), y ciclos de conducción compuestos para New York, Bangkok (Thailand), Pune (India), Beijing, Hong Kong (Zhang , Zhao, & Shen , 2012), nuevo ciclo japonés JC08 y el nuevo ciclo europeo (NEDC), siendo estos últimos junto con el US FTP-75 los más conocidos (Seers, Nachin, & Glaus, 2015).

2.4.3 Ciclo de conducción US FTP 75

El U.S Federal Test Procedure (FTP-75) mostrado en la figura 4, fue creado en USA, California en 1975, tomando como base el recorrido promedio del hogar al lugar de trabajo de una persona residente de la ciudad de Los Ángeles, Estados Unidos (Cedillo, 2013). Consta de cuatro etapas: la primera la fase de partida en frío (*Cold Start*), la segunda de circulación estabilizada (*transient*), seguido por una etapa de inactividad durante 10 minutos para finalizar con una etapa de partida en caliente (*Hot Start*). Durante cada una de las etapas de circulación, hay períodos en los cuales el vehículo se está acelerando, otros en los que se va a velocidad constante, otros frenando y otros en los que permanece en neutro (Castro & Escobar, 2006). La obtención de información para su construcción se llevó a cabo a través de la selección de datos de los perfiles de velocidad contra tiempo determinados en los recorridos, en base al tiempo de inactividad, velocidad media, velocidad máxima y número de paradas por viaje (Hung et al., 2007).

El ciclo de conducción FTP 75 es una versión más completa del anterior ciclo de conducción FTP 72 o mejor conocido como LA4 o *Urban Dynamometer driving Schedule* (figura 4). Al inicio del ciclo, ambos presentan el mismo comportamiento hasta los 1370 s de recorrido; sin embargo difieren uno del otro en la presencia de la sección partida en caliente (Crolla, 2015).

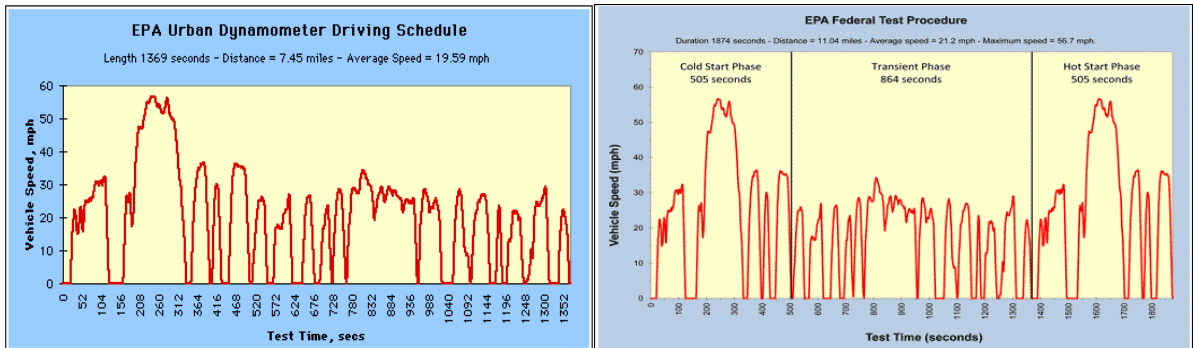


Figura 4. Ciclos de conducción Federal Test Procedure (FTP). **Lado izquierdo:** ciclo de conducción FTP 72 - **Lado derecho:** ciclo de conducción FTP 75.

Fuente: U.S EPA

Tabla 4. Parámetros de estudio ciclos de conducción FTP 72 y FTP 75

Características generales		
PARAMETROS	FTP 72	FTP 75
Duración	1369 s	1874 s
Distancia recorrida	7.45 mi (12.07 km)	11.04 mi (17.77 km)
Velocidad promedio	19.59 mph (31.5 km/h)	21.2 mph (34.12 km/h)
Velocidad máxima	56.7 mph (91.2 km/h)	56.7 mph (91.25 km/h)

Fuente: U.S EPA

3. ESTADO DEL ARTE

3.1 CICLOS DE CONDUCCIÓN

Internacionalmente existe gran variedad de ciclos de conducción. Cada uno es construido basándose en información particular dependiendo del país o ciudad que es desarrollado. Características como velocidad, aceleración, tiempo de recorrido, son parámetros que los definen y los convierten en herramientas para identificación de información de comportamientos de manejo propios de una región, aunque su base de construcción sea la misma. Actualmente los ciclos de conducción se clasifican en dos tipos: modales y transitorios.

Los ciclos de conducción modales o poligonales son aquellos compuestos por lapsos de velocidad constante durante un tiempo prolongado y por lo general son formados artificialmente (Cedillo, 2013). Mientras que, los ciclos transitorios son conocidos por ser compuesto por un perfil de velocidad contra tiempo variando segundo a segundo. Referente a su efectividad para estudios de patrones de manejo, investigaciones previas consideran que los ciclos modales no representan las condiciones reales de manejo (Tong & Hung, 2010; Cedillo, 2013), al contrario de los ciclos de conducción transitorios representan mejor las condiciones reales de manejo en carretera.

Entre los ciclos de conducción modales que hoy en día son reconocidos de manera internacional se encuentran el *ECE Cycle* de Europa y los ciclos Japoneses; asimismo, el U.S FTP 72/75 y el *Melbourne Peak Cycle* son reconocidos como ciclos transitorios (Tong & Hung, 2010). Comúnmente son provenientes de ciudades pertenecientes a países desarrollados y representan condiciones de manejo presentes en carreteras de alto tráfico vehicular, pero en distancias que pueden ser recorridas en menos de una hora.

Por lo general, los ciclos de conducción previos son tomados como base de construcción por países que no poseen uno propio para la estimación de emisiones en fuentes móviles. Hasta el momento no existe una metodología establecida para la construcción de los ciclos de conducción. Sin embargo, en la literatura científica se pueden encontrar gran variedad de métodos desarrollados para su construcción, hasta el punto que diversos ciclos se han creado a nivel universal con técnicas diferentes. Aparte de lo anteriormente dicho, existe un común denominador que predomina en los diferentes ciclos de conducción representativos el cual es concentrarse solo en el estudio de emisiones pertenecientes a los automóviles, o en otro caso para toda la flota vehicular en general que transita la vía de estudio.

Ciclos de conducción como *Modem-Im Cycles*, *Modem-Hyzem Cycles*, *Artemis-Cycles* y *Inrets-Pvu* todos de origen Europeo, fueron desarrollados con el objetivo de representar las emisiones de acuerdo a condiciones de manejo más exactas posibles incluyendo tráfico congestionado y flujo libre urbano (González, 2005; Jiménez, Román, & López, 2013). No obstante, estos también se concentran en las condiciones de circulación y emisiones generadas por automóviles privados y recolectores de pasajeros.

En la actualidad son escasos los ciclos de conducción contruidos netamente para el análisis del comportamiento de manejo de los buses urbanos. Siendo estos la columna vertebral del transporte público urbano, además que a través de su estilo de manejo que consiste en bajas velocidades en conjunto de numerosas paradas (*stops*) que aumentan enormemente las emisiones en vía, ha provocado la creación de algunos ciclos de conducción como: la Composición de Ciclos de Manejo para las Emisiones Urbanas (*Composite Urban Emissions Drive Cycles*, CUEDC), el ciclo para buses del condado naranja (*Orange County Bus Cycle*) (González, 2005) y el *Braunschweig Cycle* (Jiménez, Román, & López, 2013). La Composición de Ciclos de Manejo para las Emisiones Urbanas (CUEDC) fue desarrollada a partir del liderazgo de la Agencia de Protección al Medio Ambiente de Nueva Gales del Sur (*New South Wales Environmental Protection Agency*, NSW EPA) y El Consejo Nacional de Protección del Medio Ambiente (NEPC) de Australia; consiste en un conjunto de ciclos transitorios que simulan los patrones de manejo agresivo y las velocidades típicas de las grandes ciudades Australianas. Mientras que, el *Orange County Bus Cycle* siendo también un ciclo transitorio fue desarrollado en Estados Unidos por la Universidad del Oeste de Virginia y muestra patrones de manejo de buses urbanos en Los Angeles (González, 2005). Ambos ciclos de conducción fueron desarrollados por medio del uso de dinamómetro de rodillos y chasis. De igual manera, el *Braunschweig Cycle* es un ciclo de conducción transitorio Alemán y se encarga de estudiar el funcionamiento de los buses bajo condiciones de paradas frecuentes (Jiménez, Román, & López, 2013).

Debido a la escasez de ciclos de conducción referentes a los buses urbanos, autores han establecido los problemas a enfrentar al momento trabajar con rutas de buses: (1) influencia de los factores externos como factores territoriales que incluyen infraestructura urbana y población; (2) características de las rutas de transporte involucradas en las rutas de estudio; (3) indicadores del servicio ofrecidos por los buses el cual comprende la influencia de los periodos de mayor flujo vehicular, tránsito y cantidad de pasajeros (Michel & André, 2004). Factores que contribuyen a la disminución de construcción de ciclos de conducción para buses.

3.2 MODELOS DE ESTIMACIÓN DE EMISIONES

En la actualidad los modelos de estimación de emisiones cumplen con un papel muy importante en la cuantificación y reducción al mínimo de las emisiones asociadas al tráfico vehicular (Adak, Sahu, & Elumalai, 2016). Los más utilizados alrededor del mundo son los modelos: Motor Vehicle Emission Simulator (MOVES) y Computer Programme to Calculate Emissions from Road Transport (COPERT) (Giraldo, 2005). Siendo el primero desarrollado por la agencia de protección ambiental (U.S EPA) y el segundo por la agencia de ambiente Europea (EEA). En general los modelos de emisiones pueden estimar las emisiones vehiculares a partir de los datos de velocidad promedio de viaje y el perfil de velocidad - tiempo segundo a segundo (Adak, Sahu, & Elumalai, 2016). La diferencia entre ellos radica en que los modelos son creados acorde a las características propias de una o varias regiones, lo cual influencia directamente los factores de emisión a manejar. Es decir, toda región distinta a la cual fue creado que utilice el modelo obtendrá como resultado de cálculo una aproximación a las emisiones que se producen en realidad (Instituto Nacional de Ecología, 2009).

Aparte de los ya mencionados, entre los modelos de estimación de emisiones más conocidos se encuentra: el modelo internacional de emisiones vehiculares (IVE) (Clean Air Institute, 2013). El modelo IVE fue desarrollado por la Universidad de California en Riverside (UCR) y la Agencia de Protección del Medioambiente de los Estados Unidos (U.S EPA). Su característica particular de calcular emisiones provenientes de las fuentes móviles especialmente para países en vía de desarrollo lo convierte en un modelo adaptable a todo tipo de contextos geográficos. Además de poder ser utilizado para predecir emisiones futuras dados los cambios en las flotas, el combustible, el flujo y la congestión vehicular (Zhang et al., 2008).

Diferentes países en vía de desarrollo como Perú, México, Chile, Brasil, Argentina y Estados Unidos han hecho uso del modelo IVE para estimación de emisiones y creación de inventarios de fuentes móviles (ISSRC, 2008). Asimismo, ha sido aplicado en muchas ciudades alrededor del mundo, incluyendo Beijing y Shanghái (Zhang et al., 2008). Diversos proyectos se han ejecutado en países desarrollados, a pesar que el modelo fue construido inicialmente para países en vía de desarrollo, como Pakistan, India, recalcando principalmente a China con gran cantidad de aportes.

A nivel internacional los proyectos se han destacado por la determinación de emisiones para fuentes móviles en ciudades de alto tráfico vehicular, concentrándose primeramente en el análisis de emisiones de la flota vehicular total que incluye: automóviles (taxis, carros particulares), camiones, buses y motocicletas. Estudios realizados en China revelan que se concentran en la estimación y proyección de emisiones de la flota vehicular total junto con la

determinación de propios factores de emisión para el desarrollo del modelo IVE. Entre los resultados emitidos por este país en diferentes ciudades, revela que los picos más altos de emisiones de contaminantes criterio se encuentran alrededor de las 8:00 AM, 3:00 PM y 5:00 PM (Huang et al., 2005); además, uno de los contaminantes criterio que más se emite es el monóxido de carbono (CO) siendo los principales productores los automóviles, seguido por la alta producción de óxidos de nitrógeno (NO_x) en la cual contribuyen los buses de transporte urbano y por último los camiones con alta generación de material particulado (PM) (Huang et al., 2005; Huan et al., 2005). Mientras que en países como India se destacan por realizar estimaciones de emisiones principalmente en motocicletas revelando que los picos más altos de emisiones de contaminantes criterio se encuentran entre 8:00 AM a 12:00 PM (University of California at Riverside, 2004; Goyal, Mishra & Kumar, 2013); además de presentar que las motocicletas son unas de las principales productoras de monóxido de carbono (CO) (Goyal, Mishra & Kumar, 2013; Nesamani, 2010) alcanzando porcentajes hasta de 64% respecto a los demás vehículos de la flota vehicular, seguido por los buses con una alta contribución hasta del 60% referente al óxidos de nitrógeno (NO_x) (Nesamani, 2010). De igual forma, los países pertenecientes a América han empleado el modelo IVE para el cálculo de emisiones no hallando mucha diferencia de los ya enunciados. Países como México y Brasil también muestran alto porcentaje en emisiones de Óxidos de Nitrógeno (NO_x), donde los principales contribuyentes son los buses urbano (Davis et al., 2004; Lents et al., 2004). Seguido por los automóviles, los principales responsables de la presencia de monóxido de carbono (CO) y compuestos orgánicos volátiles (VOC's) (Lents et al., 2004); además de los camiones, generadores de material particulado en la ciudad de México (Davis et al., 2004), y los buses como los mayores contribuyentes a la generación de los contaminantes criterio en la ciudad de Lima (Lents et al., 2004).

Referente a Colombia, pocos son los proyectos e investigaciones relacionados a la construcción de inventarios de emisiones. Ciudades como Bogotá, Cartagena y departamentos como Antioquia y Córdoba destacan como uno de los pocos lugares que, hasta el momento, se tiene evidencia acerca del uso de este modelo para la creación de inventarios en el país.

A continuación, por lugar de desarrollo, se definirá brevemente el proyecto realizado:

3.2.1 Inventario de emisiones Bogotá (Giraldo, 2005).

En el año 2005, en la ciudad de Bogotá se dio la creación de un inventario de emisiones para fuentes móviles, tomando como flota principal vehículos particulares, motos y los buses articulados: Transmilenio. El área de estudio fue

definida en tres tipos de vías: residenciales, arteriales y rápidas; pertenecientes a barrios de la zona Norte y Centro de la ciudad, más en específico, el barrio Santa Bibiana y Teusaquillo.

La metodología aplicada para la creación del inventario se resume en los siguientes puntos:

- Recolección de información: selección de rutas, aforos vehiculares utilizando cámaras de video, encuestas en parqueaderos, recolección de información utilizando sistemas de posicionamiento global (GPS) y sobre el número de veces que se encienden los vehículos particulares.
- Organización de datos para estimar las emisiones en las fuentes móviles.
- Determinación del factor de actividad para vehículos: a través de encuestas y con ayuda de la información recolectada por la secretaría de tránsito de transporte (STT) se obtuvo en promedio el kilometraje recorrido por un vehículo en el transcurso de un año.
- Definición de los patrones de conducción por tipo de vehículo.
- Ejecución modelo IVE y construcción del inventario de emisiones.

3.2.2 Inventarios de emisiones Antioquia.

A diferencia de otros lugares, en el departamento de Antioquia ha presentado mayor actividad respecto a IVE. Tanto en la Ciudad de Medellín, como en el municipio de Envigado se ha trabajado con el modelo IVE para la determinación de emisiones en fuentes móviles.

En Medellín se formuló un caso hipotético en la ciudad teniendo en cuenta las rutas de transporte público colectivo complementarias al sistema integrado de transporte en el Valle de Aburrá, convirtiendo algunas rutas radiales en rutas transversales (Echeverri, Valencia, & Acosta, 2012); a su vez, definiendo como área de estudio a partir de la carrera 43 a la carrera 50 de Medellín.

En Envigado se presentaron los resultados de estimación de las emisiones horarias y diarias de los contaminantes atmosféricos (CO, NO_x, SO₂, PM₁₀ y COV) provenientes de fuentes móviles en la zona urbana para el año 2010 (Londoño, Correa, & Palacio, 2011). El área de estudio consistió tanto en las vías principales como secundarias del municipio.

Ambos cuentan con metodologías similares para la construcción del inventario de emisiones para fuentes móviles, por lo tanto, se sintetizan en los siguientes tres puntos:

- Selección de la zona de estudio.
- Información base: recolección de datos de intensidad vehicular, actividad vehicular, variables ambientales.
- Estimación de emisiones contaminantes en la zona de estudio a través de la ejecución de IVE.

A excepción de los ajustes de emisiones, en el cual Envigado utilizó sus propios factores de emisiones en lugar de usar los predeterminados para el modelo IVE.

3.2.3 Inventario de emisiones Córdoba (ECHEVERRI, 2006).

Este inventario de emisiones fue presentado en el año 2006, pero los datos de estudio tuvieron lugar en el año 2005. A diferencia de los explicados con anterioridad, aparte de las provenientes de los vehículos automotores también incluye las emisiones de los rellenos sanitarios y las fuentes biogénicas. Aunque no se tuvieron en cuenta las fuentes puntuales por ser estas muy escasas en la zona de estudio y generar contaminantes diferentes a los gases de efecto invernadero.

Para la estimación de las emisiones en fuentes móviles, se utilizó el modelo IVE cumpliendo con la misma metodología expuesta en los anteriores proyectos, para la recolección de la información. Además, se tuvo en cuenta la flota vehicular en particular incluyendo camiones, taxis y Motocicletas.

3.2.4 Inventario de emisiones Cartagena (EPA Cartagena, 2010).

En el caso de la ciudad de Cartagena de Indias, las entidades ambientales no poseen suficiente información sobre el uso del modelo IVE. El actual inventario fue realizado para el desarrollo del sistema de vigilancia de la calidad del aire (SVCA) de la ciudad en el año 2010, y se construyó tanto para fuentes fijas como para fuentes móviles. Como área de estudio se tomaron las vías: Carrera 65 A y calle 30 B; Av. San Martín carrera 2; Transversal 33 y calle 30; Av. El Bosque.

Para la estimación de las emisiones en fuentes móviles se realizaron las siguientes actividades:

- Campañas de aforos vehiculares a través de los cuales se realizó el registro de la información de la flota vehicular y datos de tráfico.
- Se calcularon factores de emisión de acuerdo a los flujos vehiculares y velocidades promedio de las vías, además se utilizaron los datos de tecnologías de acuerdo a la composición de la flota vehicular presentada por el modelo IVE para la Ciudad de Bogotá.

- Se tomaron las velocidades promedio de la secretaría de Tránsito y Transporte de la ciudad de Cartagena y otros estudios de movilidad; la información fue complementada con datos de campo tomados en las campañas de aforos vehiculares en las principales vías de la ciudad.
- Las variables climatológicas como humedad relativa y temperatura fueron definidas de acuerdo a la información meteorológica recolectada para las fechas en que se realizaron los aforos vehiculares.

De acuerdo a los resultados hallados en las investigaciones realizadas en Colombia se ha demostrado que entre los vehículos que más generan contaminantes criterio se encuentran los buses de transporte urbano y las motocicletas; siendo los buses los principales contribuyentes a la producción de óxidos de nitrógeno (NO_x) y óxidos de azufre (SO_x), mientras que las motocicletas hacen un mayor aporte a las emisiones de monóxido de carbono (CO) (Giraldo, 2005; EPA Cartagena, 2010; Echeverri et al., 2012; Londoño et al., 2011) y VOC's (EPA Cartagena, 2010). Asimismo, los automóviles (taxis, vehículos particulares) también tienen una participación importante en las emisiones contaminantes (Echeverri, 2006; Giraldo, 2005). No obstante, los buses urbanos por generar mayor impacto a pesar de representar una cantidad pequeña a comparación de la flota vehicular total a estudiar, se considera que muestran resultados más críticos (Giraldo, 2005; Echeverri et al., 2012; Londoño et al., 2011). En términos generales, acorde a los resultados de las otras ciudades alrededor del mundo, el contaminante emitido en mayor proporción fue el monóxido de carbono (CO), seguido por los óxidos de nitrógeno (NO_x) (Giraldo, 2005; EPA Cartagena, 2010; Echeverri et al., 2012; Londoño et al., 2011).

4. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Estimar las emisiones de contaminantes criterio provenientes de los vehículos de transporte público urbano (buses) que circulan en la ciudad de Cartagena de Indias, mediante la utilización del modelo internacional de emisiones vehiculares (IVE).

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir el ciclo de conducción del transporte público urbano (buses) de la ciudad de Cartagena para estimar las emisiones de fuentes móviles.
- Identificar el efecto de las condiciones meteorológicas en las emisiones provenientes de fuentes móviles.
- Determinar el efecto de la implementación de sistemas de control de emisión en las emisiones de contaminantes criterio.
- Ejecutar el modelo IVE para la estimación de emisiones.

5. METODOLOGÍA

Con el objetivo de lograr una mayor comprensión, la metodología empleada para la construcción de la aproximación del inventario de emisiones para fuentes móviles se divide en dos partes:

- Determinación del ciclo de conducción.
- Calculo de emisiones IVE.

En esta parte se describe, primeramente, el procedimiento para la construcción del ciclo de conducción de una de las vías principales de la ciudad de Cartagena; seguido por los métodos de recolección de información utilizados para la construcción del ciclo de conducción y los datos geográficos, ambientales y vehiculares requeridos para la ejecución del modelo.

5.1 DETERMINACIÓN CICLO DE CONDUCCIÓN

Debido a que la ciudad de Cartagena no presenta evidencias sobre un ciclo de conducción previo, su construcción se llevó a cabo tomando como referencia las metodologías de ciclos de conducción desarrollados en la literatura científica. Para ello se establecieron comparaciones entre las características del área de estudio descrita y el área de estudio a la cual se planea emplear; y así seleccionar la metodología que mejor se adapte a sus condiciones tanto físicas como tecnológicas (Figura 5). A continuación, se describirán cada uno de los pasos realizados para la determinación del ciclo de conducción.

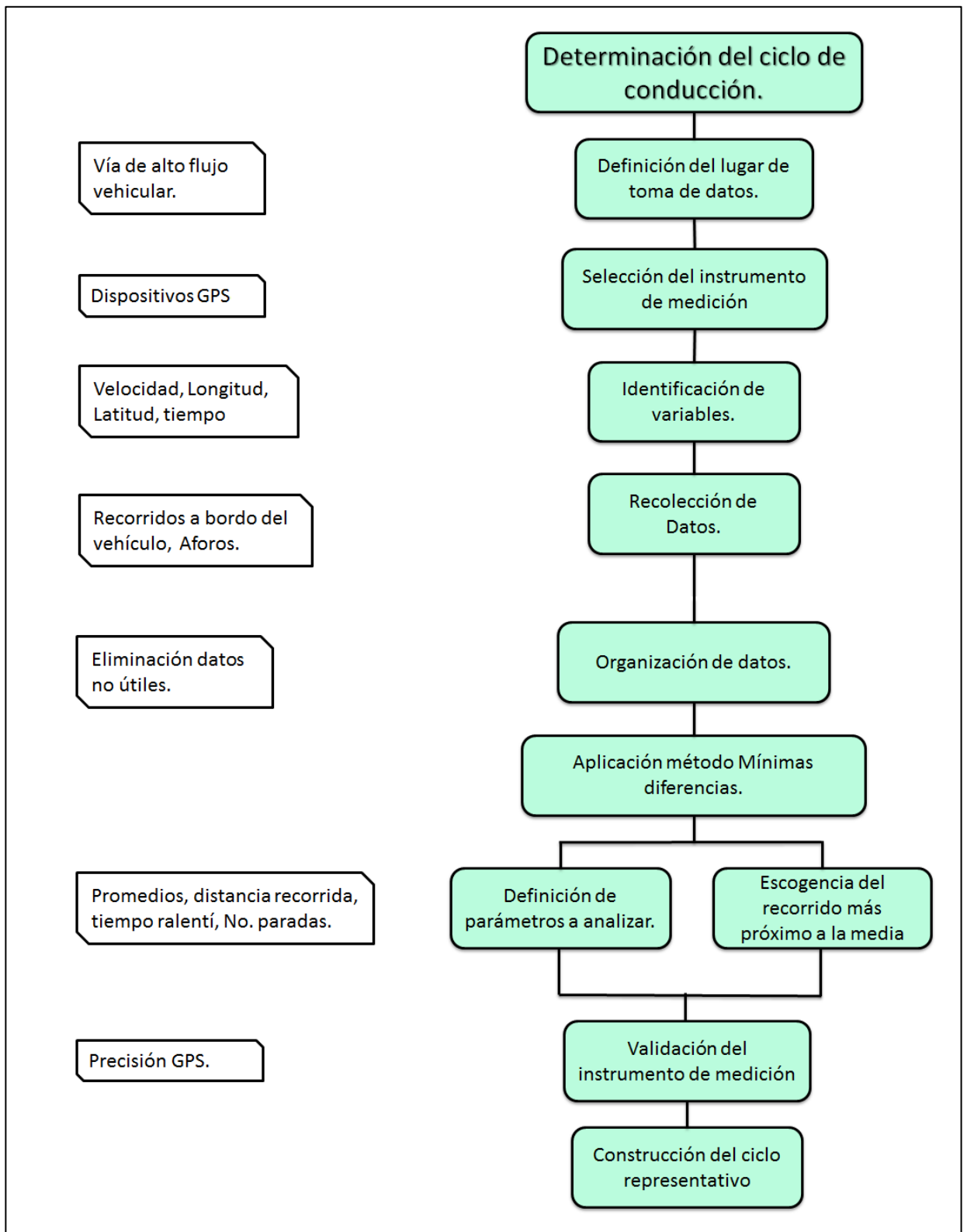


Figura 5. Diagrama proceso de construcción ciclo de conducción

5.1.1 Lugar de toma de datos.

Hasta la fecha, no se ha definido un método para la selección del mejor lugar de recolección de datos en la creación de un ciclo de conducción (Cedillo, 2013). Por tal razón, en la elección del lugar se escogió una ruta que, de acuerdo al punto de vista de las investigadoras, presenta los patrones típicos de manejo de la ciudad de Cartagena. Para su escogencia se procedió de acuerdo al diagrama mostrado en la figura 7.



Figura 6. Ruta de medición de datos para construcción ciclo de conducción.
Fuente: Google Maps, 2016.

La vía a estudiar es la ruta diaria del vehículo a analizar, abarcando en su totalidad a una de las principales vías de la ciudad (Figura 6). La Avenida Pedro de Heredia es considerada una vía arterial, alimentada por vías colectoras y principales, sobresaliente en su alto flujo y congestión en periodos de mayor flujo vehicular, que recoge y distribuye el transito proveniente de diferentes partes del país dentro de la

ciudad de Cartagena (Transcribe S.A, 2013); características que la convierte en una vía capaz de representar los modos de manejo de la flota vehicular en la ciudad.

Teniendo en cuenta la vía señalada en la figura 6, el recorrido se realizó en dos partes: mediciones en ida y mediciones en venida. La primera parte (ida) inicia desde el punto 1 correspondiendo a la Bomba del amparo, hasta el punto 2 el cual corresponde a la entrada del Centro Histórico. A su vez, la segunda parte del recorrido (venida) se repite iniciando, esta vez, desde el punto 2 hacia el punto 1. La recolección total de datos concierne a la repetición de ambas partes en cada hora del día, siguiendo la ruta de Buses de Socorro y Ternera – San José.

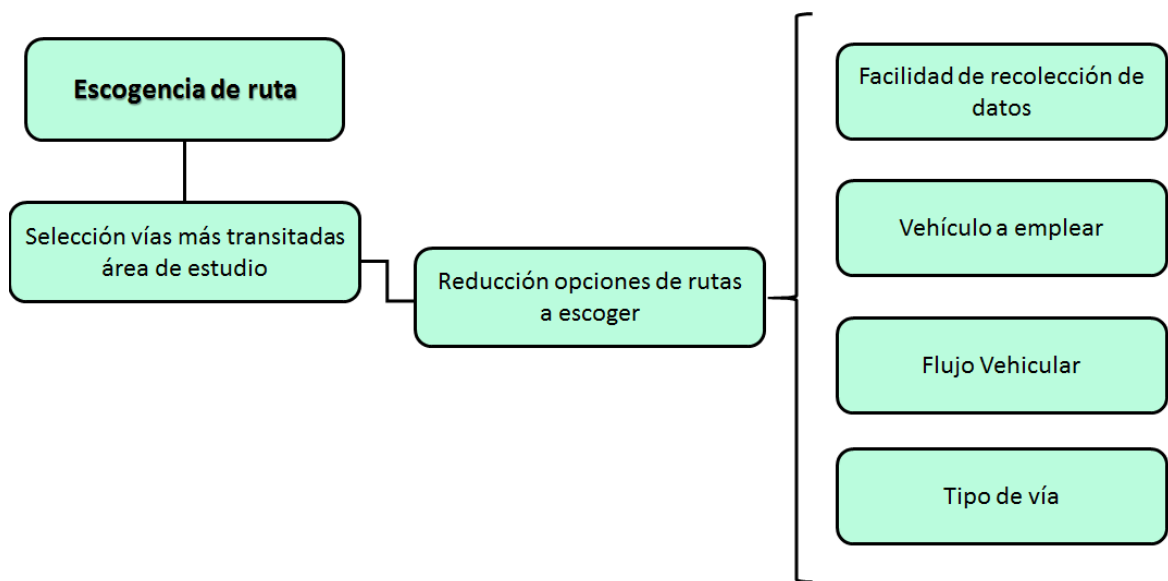


Figura 7. Diagrama metodología escogencia de ruta estudio

5.1.2 Selección del instrumento.

Es importante contar con un buen equipo GPS para realizar las mediciones de velocidad del vehículo escogido. También, se requiere que el instrumento seleccionado sea capaz de soportar las condiciones a las cuales se encuentra sujeto durante el recorrido, sea la variabilidad ambiental, alteración del tráfico, infraestructura urbana, entre otros.

El equipo utilizado en esta investigación, correspondió a un teléfono inteligente que contaba con la aplicación X-Tacómetro, la cual haciendo uso del GPS proveía información de velocidad, aceleración, altitud, longitud y latitud. No obstante, existen

instrumentos más apropiados, diseñados especialmente para este tipo de actividades. Seguidamente, se describirán las ventajas de utilizar diferentes dispositivos:

Tabla 5. Ventajas y desventajas GPS - dispositivos móviles

Instrumento	Ventajas	Desventajas
Dispositivo móvil	<ul style="list-style-type: none"> • Medición instantánea de las variables. • Manipulación rápida y sencilla sin necesidad de equipos de instalación. • Diversas alternativas de dispositivos de medición con mejores características. 	<ul style="list-style-type: none"> • Precisión no confiable. • Perdida de señal al atravesar edificios de gran altura.
GPS	<ul style="list-style-type: none"> • Precisión confiable. • Medición instantánea de las variables. • Manipulación rápida y sencilla sin necesidad de equipos de instalación. • Diversas alternativas de dispositivos de medición con mejores características. 	<ul style="list-style-type: none"> • Perdida de señal al atravesar edificios de gran altura, puentes o grandes vehículos.

5.1.3 Identificación de variables.

Aparte de los datos de velocidad los equipos GPS proveen una gran variedad de parámetros. Entre los más comunes se encuentran altitud, longitud, latitud y tiempo. Para la construcción del ciclo de conducción se escogen las variables a utilizar, del mismo modo, se seleccionan los parámetros que servirán para la verificación de la credibilidad del ciclo.

5.1.4 Recolección de datos.

Consiste en el procedimiento para realizar la recolección de datos por medio de los métodos ya descritos con anterioridad: mediciones a bordo del vehículo, Chasing Car o alternando ambos métodos (híbrido).

Aparte que las mediciones a bordo fue el método utilizado para el desarrollo del FTP 75, la obtención de la información para la construcción del ciclo de conducción se llevó a cabo mediante mediciones a bordo del vehículo, debido a la facilidad y confianza que proporciona al momento de recolectar los patrones de manejo directamente del vehículo.

Durante el procedimiento, en conjunto a la colaboración del conductor del bus urbano se procedió a la ubicación del dispositivo equipado con GPS, preferiblemente al lado de la ventana en la parte media del transporte; y la explicación del proceso a realizar junto a la aplicación de encuestas para obtener la información general del transporte al momento de iniciar el recorrido. El horario para recolectar los datos fue de 12 horas de lunes a viernes desde las 7:00 AM a 7:00 PM, incluyendo los periodos de mayor flujo vehicular: 7:00 AM a 8:00 AM; 12:00 PM a 2:00 PM y 5:00 PM a 7:00 PM; los cuales se llevaron a cabo en el año 2015 durante tres meses (mayo – julio), realizando una hora durante cada día de la semana.

De igual manera, el número total de buses circulando en la Avenida Pedro de Heredia durante las horas señaladas, se adquirió a través de aforos vehiculares en diferentes puntos de la vía de estudio, facilitados por el Departamento Administrativo de Transito y de Transporte de Cartagena (DATT).

5.1.5 Organización de datos.

Es la exclusión y depuración de la información obtenida en los recorridos por el dispositivo GPS. Se toman los datos correspondientes a las variables necesarias para la construcción del ciclo de conducción, mientras que los datos no utilizados son archivados para posterior análisis y verificación.

5.1.6 Método de las mínimas diferencias.

Una vez se ha definido el lugar y recolectado los datos se procede a seleccionar el ciclo de conducción representativo. Debido a que contar con la información de un

solo recorrido no es fiable para su construcción, se debe realizar diversos recorridos o repeticiones, bajo las mismas condiciones, que incrementen la posibilidad de obtener los patrones típicos de manejo. No obstante, a causa de factores externos (tipo de conductor, flujo vehicular, etc.) cada recorrido tenderá a variar en sus parámetros correspondientes, por lo tanto no se tiene certeza cuál recorrido es representativo.

Por tal razón, se utiliza el método de las mínimas diferencias. Siendo una metodología empleada para obtener uno de los ciclos más usados como lo es el FTP 75 (Cedillo, 2013), el método consiste en elegir el ciclo representativo a partir de los parámetros que se aproximen más a las medias del grupo de ciclos medidos (Ecuación 2).

$$CR = \min \sum_{i=1} (y_i - \bar{y}_i)^2 \quad (2)$$

Donde,

CR : Ciclo de conducción representativo.

y_i : Valor del parámetro i del ciclo de conducción.

\bar{y}_i : Promedio del parámetro i de los ciclos de conducción.

5.1.7 Definición de parámetros.

Es importante determinar los parámetros a evaluar en la aplicación del método de las mínimas diferencias, puesto que, permiten: (1) la extracción de las características de conducción del lugar; (2) la construcción de ciclos de conducción candidatos; (3) la determinación de la representatividad estadística de los ciclos de conducción candidatos; (Tong & Hung, 2010) y (4) la selección del mejor ciclo, constatando su veracidad.

Se ha encontrado que la mayoría de los parámetros seleccionados en diferentes metodologías son la velocidad, la aceleración, deceleración, velocidad cruceo y tiempo en ralentí (Zhang et al., 2012). Asimismo, varios ciclos de conducción que han tenido amplia trascendencia internacionalmente han tenido en cuenta los anteriores parámetros, para su construcción. A continuación, en la tabla 6 se presentan los parámetros utilizados por distintos ciclos de conducción.

Tabla 6. Parámetros más conocidos en los ciclos de conducción

	Velocidad promedio	Desaceleración promedio	Aceleración promedio	Promedio de cambios de aceleración/desaceleración	Promedio número de paradas	% Tiempo en ralentí	% Aceleración	% Velocidad crucero	% Desaceleración	PKE Energía cinética positiva	Distribución velocidad/aceleración	Velocidad máxima	Velocidad mínima	Potencia específica vehicular
FTP 72/75	x				x							x		
LA 92, Unified Cycle											x			
LA01	x										x	x	x	
HHDDT Cycle	x					x	x	X	x			x		
Arterial Cycles						x	x	X	x		x		x	x
Edinburgh Cycle											x			
ARTEMIS Cycle	x	x	x		x	x					x	x		
TRL Cycle	x		x									x	x	
Sydney Cycle	x					x					x			
Melbourne Peak Cycle	x					x				x	x			
CUEDC Cycle	x					x	x					x		
Perth Cycle	x				x	x					x			
China Cycles	x	x	x	x		x	x	X	x	x				
Beijing Cycles	x	x	x			x	x	X	x			x		x
Pune Cycle	x					x	x	X	x		x			
Metro Manila Cycle	x										x	x		
BDC Cycle	x	x	x		x	x	x	X	x	x				

Fuente: extraído de Tong & Hung, 2010.

El método para la selección de parámetros en el presente proyecto consistió en el criterio de las propias investigadoras. Basándose en los parámetros en común de los diferentes ciclos, además que se encuentren acordes a la información recopilada por el dispositivo GPS. Los parámetros seleccionados son los señalados en la tabla 7.

Tabla 7. Parámetros seleccionados para la construcción del ciclo de conducción

Parámetros
Velocidad promedio (km/h)
Aceleración promedio (m/s ²)
Tiempo en ralentí (s)
Distancia total
Velocidad máxima (km/h)
Aceleración máxima (m/s ²)
Total de paradas

5.1.8 Escogencia del recorrido más próximo a la media.

Una vez definidos los parámetros representativos del ciclo de conducción y la aplicación de la ecuación 2, se escogen los parámetros con la mínima diferencia respecto a la media del grupo de ciclos. El recorrido al cual le pertenecen estos parámetros será considerado el ciclo representativo.

5.1.9 Validación.

Dado el caso que las mediciones se hayan realizado con un equipo del cual se tenga incertidumbre acerca de sus resultados, se corrobora su confiabilidad por medio de un dispositivo que cumple con las funciones apropiadas de medición.

Para comprobar la veracidad de las mediciones realizadas con el dispositivo móvil se utilizó VBox Sport; un dispositivo GPS que cuenta con una precisión de 0.1 km/h en términos de la velocidad y ± 5 m de posición con una probabilidad del 95% CEP (Circulo Error más Probable) de escogencia de un valor certero. A diferencia del dispositivo móvil el cual solo presenta la información de posicionamiento, variando entre los 5 m a 7 m de posición.

El proceso de validación consistió en ambos instrumentos situados de manera paralela durante las mediciones a bordo, en el mismo vehículo y vía de estudio, en el transcurso de una hora de viaje. Concluido dicho proceso se procedió a la comparación de los datos de velocidad obtenido con el fin de comprobar la validación del instrumento de medición utilizado en el presente proyecto.

5.2 CALCULO DE EMISIONES IVE

De acuerdo con lo mencionado en el marco teórico respecto a las metodologías para estimación de emisiones en este trabajo se decidió aplicar el modelo IVE como método de mediciones indirectas para el cálculo de las emisiones.

5.2.1 Modelo IVE.

El modelo internacional de emisiones vehiculares (IVE), tal como su nombre lo indica, es un modelo computacional desarrollado por la Universidad de California en Riverside, bajo el fundamento y financiamiento de la Agencia de Protección del Medioambiente de los Estados Unidos (U.S EPA). Fue creado especialmente para ser utilizado en países en vía de desarrollo con el objetivo de estimar emisiones acordes a las características físicas, culturales y tecnológicas de la región de estudio. Dentro de los contaminantes que puede predecir se encuentran: los contaminantes criterio (monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x), óxidos de azufre (SO_x), material particulado (PM)), compuestos orgánicos volátiles (VOC's), los cuales también se tendrán en cuenta en esta investigación; gases tóxicos (Plomo, 1.3-Butadieno, Acetaldehídos, Formaldehídos, NH₃, Benceno) y responsables del efecto invernadero, por consiguiente, calentamiento global (dióxido de carbono (CO₂), óxido nitroso (N₂O), metano (CH₄)).

Para el cálculo de emisiones, IVE requiere información local clasificada en tres grandes campos: Actividad vehicular, Distribución de la flota vehicular y factores de emisión de vehículos.

- **Actividad vehicular:** se concentra en toda la información referente al funcionamiento del vehículo y factores externos que lo afectan, tal como se observa en la tabla 8.

Tabla 8. Información contenida en el modelo IVE

Datos generales	Características combustible	Información meteorológica	Información vehículos	Geografía
<ul style="list-style-type: none"> • Fecha. • Día de la semana. • Tipo de I/M. • Hora. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tipo de gasolina. • Nivel de azufre. • Nivel de plomo. • Nivel Benceno. • Nivel de Oxigenados. • Tipo de diésel. • Nivel de azufre diésel. 	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura. • Humedad relativa 	<ul style="list-style-type: none"> • Uso de aire acondicionado. • Partidas. • Distancia recorrida. • Bines de potencia. • Bines SOAK. • Velocidad promedio. 	<ul style="list-style-type: none"> • Altitud. • Pendiente del terreno.

Fuente: adaptado del manual IVE model 2.0.

- **Distribución de la flota vehicular:** se refiere a cómo se encuentra conformada la flota vehicular a estudiar, es decir, las características que poseen uno o varios de los vehículos que se tiene en cuenta para la estimación de las emisiones. Por ejemplo: tipo de sistema de control de emisión, combustible, mezcla aire/combustible e información general producto del tiempo en funcionamiento del vehículo (edad, peso).

Cada vehículo, ya sea, cuatro ruedas (carro, camión, bus) o dos-tres ruedas (motos) posee de forma individual las características anteriormente mencionadas. Por lo tanto, en la distribución de la flota vehicular se debe tener en cuenta también en clasificar por categoría cada vehículo a utilizar, en relación a la flota total a analizar.

- **Factores de emisión de vehículos:** se basa en la determinación y uso de factores de emisión para el cálculo de la cantidad de contaminantes producto de la actividad vehicular. El modelo IVE posee sus propios factores de emisión, los cuales son conocidos dentro de su funcionamiento como base de factor de emisión. Dichos factores son desarrollados a partir de las pruebas realizadas en el *U.S Federal Test Procedure (FTP-75)* y pueden ser ajustados en caso que la

localidad en la cual se lleve a cabo el proceso de estimación de emisiones tenga sus factores de emisión definidos.

La base de factores de emisión del modelo IVE cuenta con emisiones en partida y emisiones en ruta. En base a esto, el modelo calcula las emisiones multiplicando la base de factores de emisión de cada tipo de vehículo por cada uno de los factores de corrección (actividad vehicular) introducidos por el usuario (Ecuación 3); dando como resultado un nuevo factor de emisión ajustado a cada categoría vehicular de la flota. Asimismo, el nuevo factor se multiplicará por la distancia recorrida del vehículo por tecnología, los parámetros del ciclo de conducción introducido por el usuario y los del ciclo de conducción por defecto en IVE (Ecuación 4 y Ecuación 5) para obtener los valores de emisión.

$$Q_{[t]} = B_{[t]} * K_{(Alt)[t]} * K_{(IM)[t]} * K_{(Fuel)[t]} * K_{(Cntry)[t]} * K_{[dt]} \quad (3)$$

$$Q_{en\ partida} = \sum_t \{F_{[t]} * Q_{[t]} * \sum_d [F_{[dt]} * K_{[dt]}\} \quad (4)$$

$$Q_{En\ ruta} = U_{FTP} * D/U_C * \sum_t \{f_{[t]} * Q_{[t]} * \sum_d [f_{[dt]} * K_{[dt]}\} \quad (5)$$

Donde,

$B_{[t]}$: Base factor de emisión cada tecnología (g/km).

$K_{(Alt)[t]}$: Factor de corrección altitud.

$K_{(IM)[t]}$: Factor de corrección programas de inspección.

$K_{(Fuel)[t]}$: Factor de corrección calidad del combustible.

$K_{(Cntry)[t]}$: Factor de corrección lugar de estudio.

$K_{[dt]}$: Factor de corrección modo de conducción, potencia, uso aire acondicionado y pendiente.

$F_{[t]}$: Fracción de viaje para una tecnología específica.

$Q_{[t]}$: Factores de emisión ajustados para cada tecnología (g/km).

$F_{[dt]}$: Fracción de tiempo por cada tipo de conducción o fracción de tiempo SOAK para una tecnología específica.

U_{FTP} : Velocidad Promedio del ciclo de conducción LA4 (constante (kph)).

U_c : Velocidad Promedio del ciclo de conducción específico, valor ingresado por el usuario en el archivo Localidad (kph).

D : Distancia de viaje ingresada por el usuario (km)

La información vehicular a utilizar puede ser obtenida a través de investigación propia o por medio de información facilitada por terceros, sea entidades encargadas de controlar la movilidad de la localidad, proyectos previos o estudios de tráfico. Una fuente confiable es consultar el ciclo de conducción definido en la región a estudiar, en caso tal que no se posea, proceder a su debida construcción.

Por medio de los ciclos de conducción, el modelo IVE no solo conoce información de la actividad vehicular, sino que puede establecer también el comportamiento y emisiones generadas desde el punto de vista del funcionamiento interno del vehículo. La información obtenida da lugar a la creación de parámetros los cuales utilizados por IVE permiten analizar segundo a segundo el comportamiento vehicular para calcular la cantidad de contaminante. Estos parámetros son: Potencia específica vehicular (VSP), Bines de potencia, Estrés del motor.

5.2.1.1 Bines de potencia.

Un bin es un intervalo de valores que representa las variaciones de potencia y estrés del motor que un vehículo puede alcanzar en un segundo determinado. En IVE cumple la función de indicar al modelo a qué nivel de potencia específica vehicular (VSP) y estrés del motor se encuentra el vehículo de estudio en un segundo determinado, siendo esto representado a través de uno de los 60 bines existentes (tabla 9).

Tabla 9. Distribución Bin, VSP y estrés del motor (ES)

Bin	VSP (Kw/Ton)		Estrés del motor	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
0	-80.0	-44.0	-1.6	3.1
1	-44.0	-39.0	-1.6	3.1
2	-39.0	-35.8	-1.6	3.1
3	-35.8	-31.7	-1.6	3.1
4	-31.7	-27.6	-1.6	3.1
5	-27.6	-23.6	-1.6	3.1
6	-23.6	-19.3	-1.6	3.1
7	-19.3	-15.2	-1.6	3.1
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
19	30.0	1000.0	-1.6	3.1
20	-80.0	-44.0	3.1	7.8
21	-44.0	-39.0	3.1	7.8
22	-39.0	-35.8	3.1	7.8
23	-35.8	-31.7	3.1	7.8
24	-31.7	-27.6	3.1	7.8
25	-27.6	-23.6	3.1	7.8
26	-23.6	-19.3	3.1	7.8
27	-19.3	-15.2	3.1	7.8
28	-15.2	-11.1	3.1	7.8
29	-11.1	-7.0	3.1	7.8
30	-7.0	-2.9	3.1	7.8
31	-2.9	1.2	3.1	7.8
32	1.2	5.3	3.1	7.8
33	5.3	9.4	3.1	7.8
34	9.4	13.6	3.1	7.8
35	13.6	17.7	3.1	7.8

Bin	VSP (Kw/Ton)		Estrés del motor	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
36	17.7	21.8	3.1	7.8
37	21.8	25.9	3.1	7.8
38	25.9	30.0	3.1	7.8
39	30.0	1000.0	3.1	7.8
40	-80.0	-44.0	7.8	12.6
41	-44.0	-39.0	7.8	12.6
42	-39.0	-35.8	7.8	12.6
43	-35.8	-31.7	7.8	12.6
44	-31.7	-27.6	7.8	12.6
45	-27.6	-23.6	7.8	12.6
46	-23.6	-19.3	7.8	12.6
47	-19.3	-15.2	7.8	12.6
48	-15.2	-11.1	7.8	12.6
49	-11.1	-7.0	7.8	12.6
50	-7.0	-2.9	7.8	12.6
51	-2.9	1.2	7.8	12.6
52	1.2	5.3	7.8	12.6
53	5.3	9.4	7.8	12.6
54	9.4	13.6	7.8	12.6
55	13.6	17.7	7.8	12.6
56	17.7	21.8	7.8	12.6
57	21.8	25.9	7.8	12.6
58	25.9	30.0	7.8	12.6
59	30.0	1000.0	7.8	12.6

Fuente: adaptado del manual IVE model 2.0

Cada Bin es considerado por el modelo como una variación de emisión para cada tipo de vehículo o tecnología (ISSRC, 2008), y a su vez cada parámetro: VSP y estrés del motor posee sus propios Bines para la selección del Bin de potencia utilizado para el cálculo de emisiones.

5.2.1.2 Potencia Específica Vehicular.

La potencia específica vehicular, o como comúnmente se conoce en su abreviación VSP, es la potencia que se requiere para mover una unidad de masa del objeto de

estudio (kW/Ton). Es un parámetro que depende de forma directa del ciclo de conducción, dado que, la información a manejar (Velocidad) debe encontrarse segundo a segundo. Por otro lado, es considerado muy útil para analizar información obtenida en forma remota debido a que puede ser calculada sin tener que instalar instrumentación compleja en el automóvil (Araya, 2008).

El cálculo de la potencia requerida en general se centra en las fuerzas que un vehículo debe superar cuando se opera en el camino, incluyendo: la aceleración, la fuerza de gravedad debido a la pendiente positiva de la carretera, resistencia a la rodadura de los neumáticos y la resistencia aerodinámica (Koupal et al., 2002) (Ecuación 6).

$$VSP = v[1.1a + 9.81(\text{atan}(\text{sen}(\text{pendiente}))) + 0.132] + 0.000302v^3 \quad (6)$$

Donde,

v : Velocidad (m/s)

$pendiente$: $(h_{t=0} - h_{t=-1})/v_{(t=-1 \text{ a } 0 \text{ segundos})}$

a : Aceleración (m/s²)

h : Altitud (m)

Diversos estudios realizados han determinado que el parámetro más importante para la determinación de las emisiones es la potencia específica del vehículo (VSP), derivada de la velocidad instantánea y la aceleración (Koupal et al., 2002; Jimenez & Palacios, 1998). A través de su cálculo, el VSP expresa un valor en Kw/Ton que puede ser ubicado en un rango de valores desde -80.0 a 1000 Kw/Ton por el cual se va a precisar uno de los 19 Bines al cual se encuentra el vehículo en ese segundo (tabla 10).

Tabla 10. Rango Bines Potencia Específica Vehicular (VSP)

Bin	VSP (Kw/Ton)	
	Mínimo	máximo
0	-80.0	-44.0
1	-44.0	-39.0
2	-39.0	-35.8
3	-35.8	-31.7
4	-31.7	-27.6
5	-27.6	-23.6
6	-23.6	-19.3
7	-19.3	-15.2
8	-15.2	-11.1
9	-11.1	-7.0
10	-7.0	-2.9
11	-2.9	1.2
12	1.2	5.3
13	5.3	9.4
14	9.4	13.6
15	13.6	17.7
16	17.7	21.8
17	21.8	25.9
18	25.9	30.0
19	30.0	1000.0

Fuente: adaptado del manual IVE model 2.0

Dependiendo la ubicación que obtenga el dato calculado a comparación del rango de valores, poseerá un significado referente al comportamiento del automóvil de forma teórica (tabla 11). A su vez, ese Bin debe coincidir con el comportamiento que el vehículo obtuvo en la realidad.

Tabla 11. Significado Bines Potencia Específica Vehicular (VSP)
Fuente: adaptado de Araya, 2008.

Rango	potencia	Comportamiento
1-11	negativa	Desaceleración, pendientes negativas
12	0 ó baja	ralentí
13-20	positiva	Aceleración, pendientes positivas.

Fuente: adaptado del manual IVE model 2.0

5.2.1.3 Estrés del motor (ES).

Describe el comportamiento del motor durante los últimos 20 segundos de operación, tomando como referencia la potencia específica vehicular VSP y las RPM implícitas (Ecuación 6, tabla 12). Dependiendo del valor que representa al Estrés del motor se conocerá las condiciones a las cuales el vehículo se enfrentó durante el recorrido: un estrés bajo se refiere a las condiciones en las que el funcionamiento del vehículo ha encontrado baja velocidad y aceleraciones en los últimos 20 segundos de funcionamiento y las RPM del motor es relativamente baja; mientras que un estrés alto produce a gran velocidad y aceleraciones durante los 20 últimos segundos y las RPM del motor son altas (ISSRC, 2008).

$$ES = \text{índice RPM} + (0,08 \text{ ton/kw}) * \text{potencia prepromedio} \quad (7)$$

Donde,

$$\text{Potencia prepromedio} = \text{promedio} \left(VSP_{t=5 \text{ seg a } -25 \text{ seg}} \right) (\text{kw/ton})$$

$$\text{índice RPM} = \text{velocidad/divisor velocidad (tabla 12)}$$

$$\text{Mínimo índice RPM} = 0,9$$

Tabla 12. Divisor de velocidad calculo Estrés del Motor (ES)

Rango de velocidades		Rango potencia especifica		Coeficiente Velocidad
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	50.0	-20	16	13
12.5	50.0	16	400	5

Fuente: adaptado del manual IVE model 2.0

De la misma forma que los Bines de VSP, el ES también posee su propio rango de valores desde -1.6 a 12.6 por medio del cual se puede establecer el Bin a utilizar el modelo para la estimación de emisiones (tabla 13).

Tabla 13. Bines Estrés del motor (ES)

Carga	Estrés del motor		Significado
	Inferior	Superior	
Baja	-1.6	3.1	Poca pendiente, Baja velocidad
Media	3.1	7.8	Pendientes inclinadas, cambio brusco velocidad
alta	7.8	12.6	Velocidades elevadas, recorrido en alturas

Fuente: adaptado de Araya, 2008.

5.2.2 Ejecución del modelo.

El modelo IVE cuenta con tres ventanas principales, las cuales se subdividen dependiendo del tipo de información solicitada para realizar los cálculos individuales dentro del modelo.

5.2.2.1 Sección localidad.

Esta sección se encuentra relacionada con el comportamiento de manejo del vehículo a emplear y las características externas presentes en la ruta de estudio que pueden afectarlo.

Figura 8. Ventana localidad modelo IVE
Fuente: IVE model 2.0

La siguiente información (Figura 8) fue recolectada por los medios descritos a continuación.

- **Características Combustible.** La ventana localidad presenta dos opciones a escoger como tipo de combustible: gasolina y Diesel. De cada una se desprenden diversas características referentes a la composición de los mismos. Debido a que nuestro vehículo de estudio presenta un motor tipo Diesel, este fue el tipo de combustible a escoger.

Para obtener las características del combustible utilizado por el vehículo de estudio se consultó en la normatividad Colombiana. De acuerdo a Ley 1205 de 2008 el nivel de azufre correspondiente al Diesel es de 500 ppm; y es considerado un combustible limpio acorde a las opciones que proporciona el modelo IVE.

- **Geografía.** Los valores de altitud son proporcionados por el dispositivo GPS utilizado durante las mediciones en ruta, no obstante la ciudad de Cartagena se encuentra a la altura del nivel del mar, por lo tanto no se tiene en cuenta. Del mismo modo, para mayor facilidad de cálculos se asume que la pendiente en la vía de estudio corresponde a 0%.
- **Meteorología:** Se refiere a las condiciones de humedad relativa y temperatura a los cuales se encuentra sometido el desempeño del vehículo durante las mediciones a bordo. La información meteorológica pertenece al año 2015 y fue suministrada por el Aeropuerto Rafael Núñez de la ciudad de Cartagena, donde varía la humedad relativa entre 64% a 83% y la temperatura entre 28°C a 32°C.
- **Información vehicular:** En esta parte de la sección se hace uso de la información contenida en el ciclo de conducción determinado en la ciudad. Primeramente introduciendo los datos de velocidad para obtener el VSP, seguido del estrés del motor, y por último la obtención de los Bines segundo a segundo empleados durante el recorrido.

Al introducir los valores de actividad vehicular se identificó que los Bines de potencia que caracterizan a la flota de la ciudad de Cartagena oscila entre los Bines 11 y 12, siendo el Bin 11 el más frecuente. Dicho de otro modo, el comportamiento de los buses en circulación dentro de la ciudad tenderá a mantener continuas desaceleraciones y velocidades bajas, lo cual contribuye al aumento del número de paradas.

5.2.2.2 Sección Flota vehicular.

Se refiere a las características técnicas presentes en la flota vehicular seleccionada y la manera cómo afectan la producción de contaminantes atmosféricos.

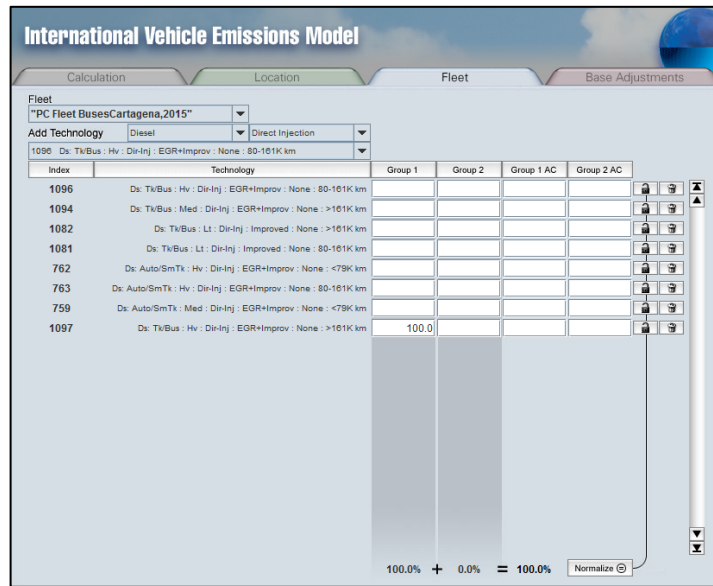


Figura 9. Ventana Flota modelo IVE
Fuente: IVE model 2.0

Para la obtención de información se consultó directamente con los conductores de los vehículos a través de encuestas en cada recorrido. En total fueron encuestados 35 conductores. Del mismo modo, con ayuda del Departamento Administrativo de Tránsito y Transporte (DATT) se obtuvieron aforos en relación con el número de vehículos que transitan en la vía durante diferentes horas de estudio.

El vehículo empleado en el modelo IVE para la estimación de emisiones consta de las siguientes características:

Tabla 14. Características Bus de transporte Urbano empleado

Características	Vehículo
<p>Tipo vehículo: Bus. Marca: Chevrolet NPR Reward Tecnología Isuzu. Año: 2007. Tipo de motor: Diesel. Tecnología control de emisión: EGR</p>	

5.2.2.3 Factores de emisión.

Se refiere a la implementación de factores de emisión determinados por el propio investigador o los definidos en la región de estudio con anterioridad. Dado que no se cuenta con factores de emisión para buses de transporte público en Cartagena, se asumieron los factores de emisión que vienen por defecto en el modelo.

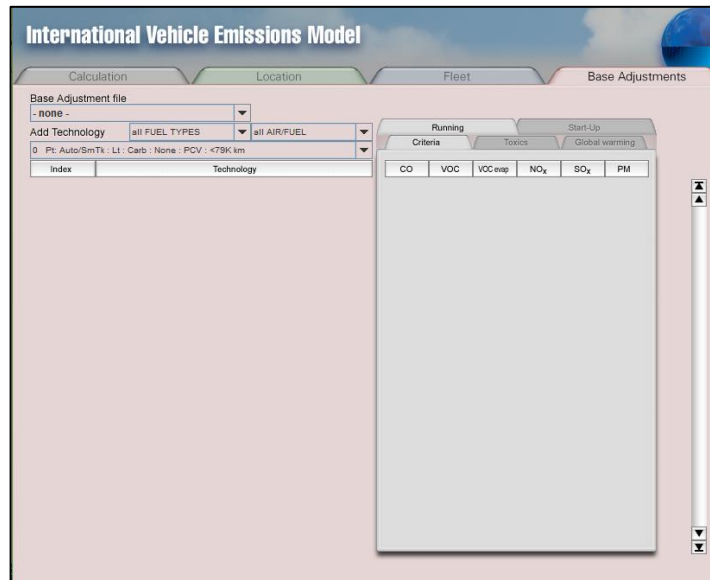


Figura 10. Ventana factores de emisión modelo IVE

Una vez ejecutado el modelo y obtenido los cálculos de las emisiones, se procede a la obtención de valores de emisión para cada contaminante atmosférico con el propósito de elaborar el inventario de emisiones para buses.

6. RESULTADOS

Durante esta sección se mostrarán los resultados obtenidos en la implementación del modelo IVE para la ciudad de Cartagena. De la misma forma que la sección metodología, los resultados se dividen en dos partes donde se incluyen primeramente el ciclo de conducción resultante, seguido de los contaminantes productos de la operación de los buses de transporte público urbano en la Avenida Pedro de Heredia.

Adicionalmente, se darán a conocer la verificación del instrumento, es decir el grado de confiabilidad del GPS utilizado, a la vez que otros resultados relacionados con el grado de movilidad presente en la ciudad de Cartagena.

Es importante tener en cuenta que cada uno de los resultados enunciados a continuación se encuentra sujeto a las características que presenta la vía de estudio; por lo tanto, cada cambio efectuado en la misma alterará los resultados obtenidos al realizar una nueva toma de datos. En el caso de la Avenida Pedro de Heredia, la cual es una de las vías principales de la ciudad de Cartagena, es una vía de doble sentido que posee seis carriles en total y se encuentra rodeada principalmente de edificios y locales que desempeñan actividades de tipo comercial. Dichas características, aunque en mayor grado la última mencionada, influyen los patrones de conducción de los conductores de la ciudad, por tanto las emisiones contaminantes de los buses, debido al alto número de paradas y bajas velocidades, predominan en estos lugares. De la misma manera, se debe destacar que la carencia de lugares de paradas estratégicas junto a la alta densidad vehicular y cultura ciudadana al momento de cruzar la vía, también aportan a la alteración de una buena conducta de manejo en la vía.

De acuerdo a lo anterior, los resultados obtenidos en la Avenida Pedro de Heredia se muestran a continuación.

6.1 VERIFICACIÓN DEL INSTRUMENTO

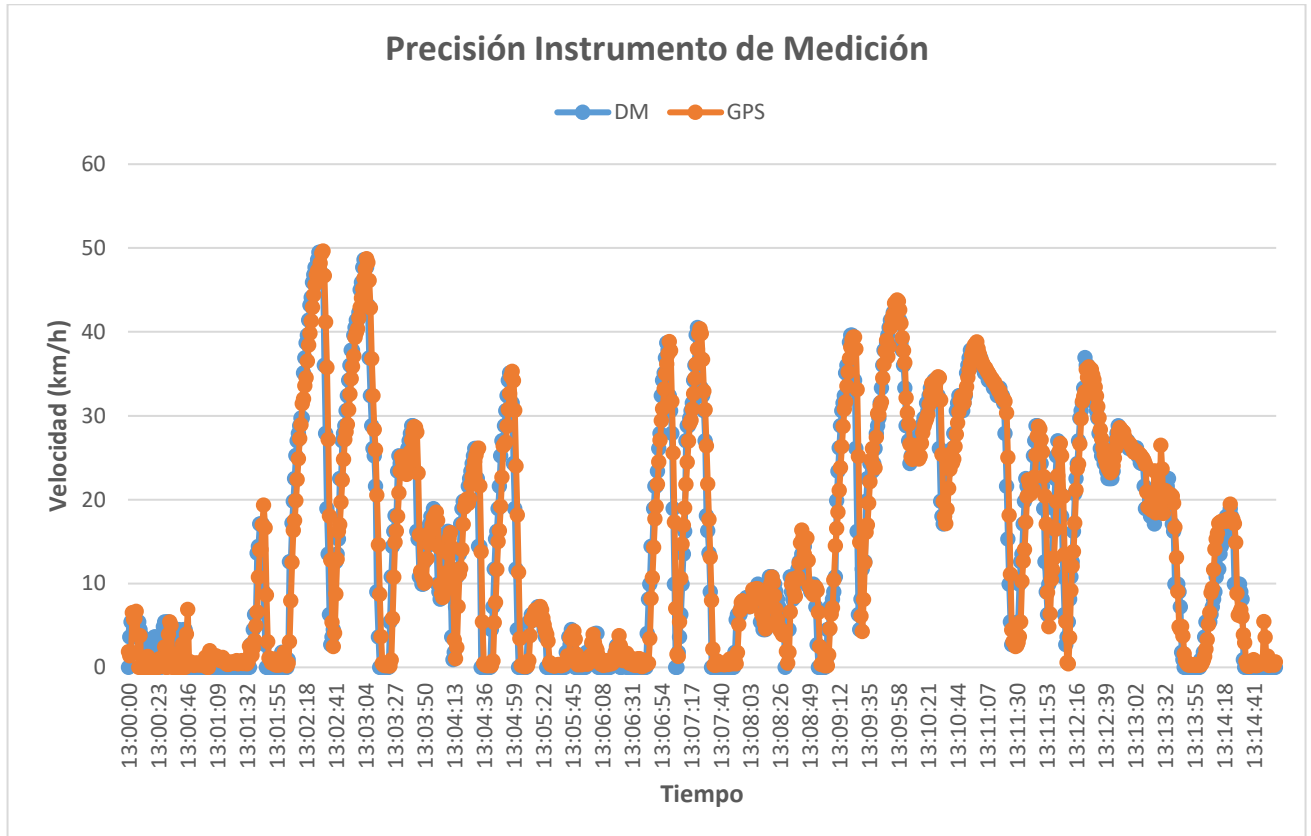


Figura 11. Verificación instrumento de medición (Dispositivo móvil – GPS)

La Figura 11 presenta la verificación de los datos reportados por el dispositivo móvil versus los datos reportados por un GPS de alta precisión (VBOX). Para ello se realizó un único recorrido desde la Bomba del Amparo hasta el Castillo de San Felipe, ubicando ambos dispositivos (GPS y el dispositivo móvil) cerca a la ventana del vehículo de transporte público y en el centro del mismo, lo anterior con el propósito de evitar interferencia de elementos del vehículo con la señal del satélite. Para este recorrido se encontró que el promedio de la diferencia entre ambas mediciones es de 2.55 ± 0.15 km/h, presentándose las mayores diferencias a velocidades inferiores a 10 km/h como se observa al inicio del recorrido en la Figura 11. Lo anterior valida la toma de datos realizada en el presente documento de tesis.

6.2 CICLO DE CONDUCCIÓN BUSES

La Figura 12 corresponde al ciclo de conducción representativo de los buses de la ciudad de Cartagena, cuya velocidad promedio corresponde a 11.56 ± 0.11 km/h con un nivel de confianza del 95%. La tabla 15 define los parámetros característicos de este ciclo.

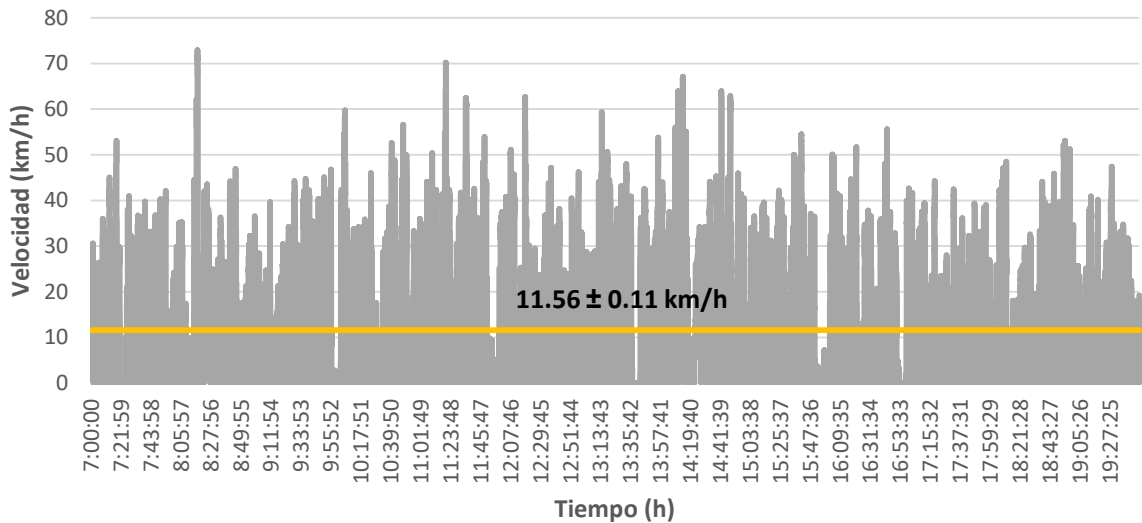


Figura 12. Ciclo de Conducción Buses Avenida Pedro de Heredia.

Los valores de velocidad representados en las figuras anteriores describen el comportamiento de un bus de transporte público urbano en su ruta diaria. La figura 12 muestra diversos valles y lapsos constituidos por velocidades mínimas, principalmente en las horas: (7:00, 10:00) AM y (1:00, 3:00, 4:00, 5:00) PM. Además, de no sobrepasar los 75 km/h y presentar aceleraciones máximas hasta de 10.1 m/s^2 conforme a la tabla 15.

Tabla 15. Valores representativos de los parámetros del Ciclo de conducción

Horario 7:00 am – 7:00 pm	Parámetros	
	Velocidad Promedio (km/h)	11.5
	Velocidad Máxima (km/h)	73.0
	Aceleración Promedio (m/s ²)	1.15E-04
	Aceleración Máxima (m/s ²)	10.1
	Aceleración Mínima (m/s ²)	-7.6
	Tiempo ralentí (s)	16487
	Total de paradas	1010
	Distancia Total (km)	142.25

De acuerdo a la figura 12, la velocidad máxima del ciclo de conducción se concentra en las horas de la mañana (8:00 AM) sobrepasando los 70 km/h. Acorde a los ciclos de conducción realizados en otras ciudades como Lima, Pune - India y ciudad de México las velocidades máximas también se produjeron en las horas de la mañana (Davis et al., 2004; Lents et al., 2004; University of California at Riverside, 2004). A comparación con ciclos de conducción reconocidos internacionalmente como el FTP-75, se mantuvo por debajo de su velocidad máxima adquirida (91.25 km/h), mientras que en el ciclo alemán desarrollado para buses: *Braunschweig Cycle*, superó su velocidad máxima de 58 km/h.

Referente a la velocidad promedio, el ciclo de conducción construido obtuvo una velocidad promedio menor al FTP-75 (34,12 km/h), asimismo, con los ciclos de conducción para buses desarrollados para diferentes ciudades. Todos los ciclos de conducción obtuvieron velocidades a partir de los 15 km/h, tal como se puede observar en la tabla 16. Lo anterior indica que en la ciudad de Cartagena los buses viajan a una velocidad promedio inferior a la reportada en otras ciudades. Este resultado es esperado, debido a la cultura vial que tiene la ciudad, lo cual se ve representado en el número de paradas promedio (77) obtenido en un recorrido inferior a 14 km.

Tabla 16. Velocidad promedio ciclos de conducción buses en ciudades del mundo.

Velocidad promedio ciclos de conducción buses (km/h)		Referencia
São Paulo	15.54	Lents et al., 2004
Beijín	17.07	Huan et al., 2005
Lima	23.15	Lents et al., 2004
Pune - India	16.55	University of California at Riverside , 2004
México	16.7	Davis et al., 2004

En el ciclo de conducción representativo los lapsos de velocidades mínimas representan continuas paradas realizadas en el mismo lugar en el transcurso del día. Con ayuda de los valores de latitud y longitud adquiridos a través del GPS se identificó que los principales lugares en los cuales se presenta este comportamiento son: el Centro Histórico, María Auxiliadora y el Mercado de Bazurto (Fig.13). Es de esperarse que los lugares mencionados muestren una significativa disminución de la velocidad, debido a que en la ciudad representan sitios de entretenimiento y comercialización altamente concurridos a cualquier hora y día de la semana. Aparte del hecho que varias de las paradas se realizan en periodos de mayor flujo vehicular como 7:00 AM, 1:00 PM y 5:00 PM cuando el tráfico vehicular se encuentra en su punto máximo.

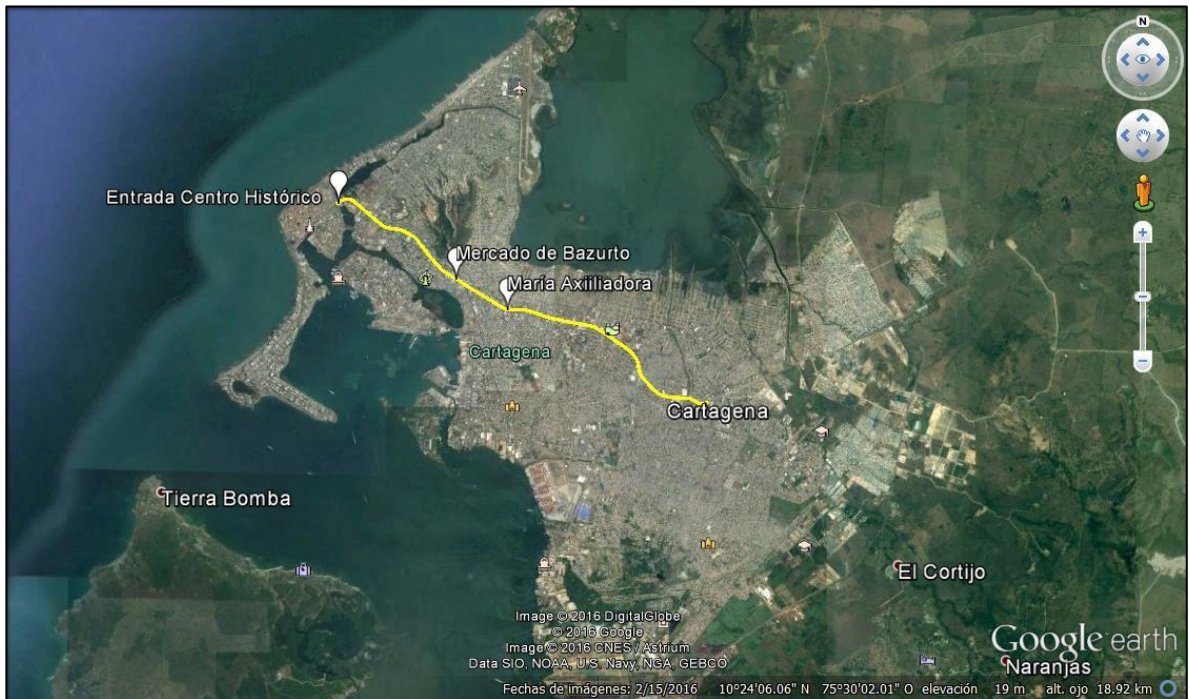


Figura 13. Lugares donde se presentan mayor disminución de velocidad y paradas
Fuente: Google Earth, 2016.

Tabla 17. Velocidad promedio de lugares donde se presentan mayor disminución de velocidad y paradas en los periodos de mayor flujo vehicular

VELOCIDAD PROMEDIO PERIODOS DE MAYOR FLUJO VEHICULAR (km/h)					
Horario 7:00 AM – 8:00 AM					
	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
María auxiliadora	2.67 ± 1.08	3.96 ± 0.64	5.49 ± 1.21	6.53 ± 2.50	3.05 ± 1.27
Mercado de Bazurto	10.57 ± 1.37	19.05 ± 2.45	16.39 ± 1.51	11.41 ± 1.79	17.59 ± 2.31
Centro Histórico	6.07 ± 2.39	4.82 ± 1.54	15.18 ± 1.36	2.17 ± 0.67	6.21 ± 1.72
Horario 12:00 PM – 2:00 PM					
	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
María auxiliadora	9.70 ± 1.82	8.04 ± 1.22	10.62 ± 1.96	6.42 ± 1.56	3.24 ± 1.17
Mercado de Bazurto	10.32 ± 0.80	13.91 ± 0.94	10.85 ± 1.21	10.34 ± 0.98	10.73 ± 2.10
Centro Histórico	5.88 ± 1.01	15.14 ± 4.21	4.93 ± 1.35	3.55 ± 0.75	3.17 ± 0.54
Horario 5:00 PM – 7:00 PM					
	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
María auxiliadora	14.08 ± 2.75	14.56 ± 2.43	8.50 ± 1.19	10.05 ± 1.41	15.69 ± 2.32
Mercado de Bazurto	10.79 ± 1.21	12.90 ± 2.33	14.38 ± 1.08	9.12 ± 0.74	9.54 ± 1.65
Centro Histórico	2.60 ± 0.64	2.82 ± 0.60	13.07 ± 1.41	5.20 ± 1.54	4.94 ± 1.06

Durante las mediciones a bordo del vehículo se identificó que la tendencia de la flota vehicular en general es detenerse en los lugares mencionados. Las velocidades promedio para los buses en estos puntos (tabla 17) también refuerzan la previa afirmación debido a que es notable que no alcanzan los 20 km/h; por lo tanto se puede considerar que dichos puntos se comportan como puntos críticos en la ciudad. Con el propósito de confirmar lo anterior se recurre a los niveles de servicio en carreteras.

Los niveles de servicio consisten en seis niveles que permiten conocer la capacidad que una vía posee para manejar un determinado flujo de tráfico y tipos de velocidades. Dependiendo del nivel de servicio se puede conocer si la vía puede ser tomada como un sitio de alta congestión o flujo rápido.

Tabla 18. Niveles de servicio para vías urbanas.

Velocidad de viaje como porcentaje de velocidad de flujo libre (%)		Nivel de servicio en base a la relación volumen a capacidad	
		≤ 1.0	> 1.0
Km/h	>85	A	F
	>67 – 85	B	F
	>50 – 67	C	F
	>40 – 50	D	F
	>30 – 40	E	F
	≤30	F	F

Fuente: extraído de TRB, 2010.

De acuerdo a las velocidades obtenidas, en los puntos señalados las velocidades no sobrepasan los 30 km/h, además teniendo en cuenta una relación de volumen a capacidad igual que 1.0, es decir, que el volumen de vehículos entrantes es igual a la capacidad máxima teórica que posee la vía (SWA, 2013); se comprueba que los lugares mencionados anteriormente presentan un nivel de servicio categoría **(F)** (tabla 18), dicho de otro modo, son vías que presentan las siguientes características: circulación congestionada, flujo irregular, las velocidades a manejar son bajas, se forman largas colas de vehículos con gran cantidad de paradas y avances cortos (Naranjo, 2008). Razones por las cuales los definimos como sitios de embotellamiento en la ciudad de Cartagena.

6.3 RESULTADOS MODELO IVE

El cálculo de emisiones de los buses de transporte público urbano fue realizado en base a dos situaciones: emisiones durante la semana, es decir, las emisiones que normalmente se producen de acuerdo al ciclo de conducción construido, y emisiones en fin de semana.

Durante el proceso de recolección de información los conductores sometidos a las encuestas para conocer las características del vehículo, no poseían conocimiento acerca del sistema de control de emisión utilizado por el medio de transporte. Por lo general, los motores Diésel modernos de alta eficiencia aparte de utilizar válvulas de admisión especiales, utilizan sistemas de recirculación de los gases (EGR) y otros dispositivos para mezclar el aire en la cámara de combustión y para mejorar

el proceso de combustión (Higuera, 2006). Partiendo de este hecho y de la incertidumbre de la presencia de sistemas de control de emisiones, se constituyeron dos escenarios para analizar las emisiones en semana: emisiones utilizando Válvula de Recirculación de Gases de Escape (EGR) y emisiones sin Válvula de Recirculación de Gases de Escape (EGR).

A continuación se muestran las emisiones vehiculares resultantes de la ejecución del modelo IVE en la Avenida Pedro de Heredia.

6.3.1 Emisiones con Válvula de Recirculación de Gases de Escape (EGR).

Tabla 19. Emisiones resultantes Ciclo de Conducción utilizando EGR

HORA	Emisiones (kg/h)					No. Buses
	CO	NOx	SOx	PM	VOC	
7:00	14.52	35.37	0.05	41.18	3.11	297
8:00	22.14	54.61	0.08	57.17	4.75	341
9:00	12.44	30.72	0.04	32.12	2.68	216
10:00	15.49	38.08	0.06	40.00	3.34	234
11:00	12.16	29.89	0.04	31.41	2.58	234
12:00	18.11	44.62	0.06	46.77	3.93	277
13:00	11.62	28.80	0.04	30.01	2.61	277
14:00	10.15	25.17	0.04	26.21	2.13	241
15:00	18.62	45.86	0.07	48.09	4.00	251
16:00	8.98	22.15	0.03	23.20	1.94	139
17:00	18.53	45.60	0.06	47.86	4.06	294
18:00	16.60	40.69	0.06	42.86	3.59	247
19:00	7.50	18.44	0.03	19.37	1.66	139
Total Contaminante (kg/día)	186.86	460	0.66	486.25	40.38	3187

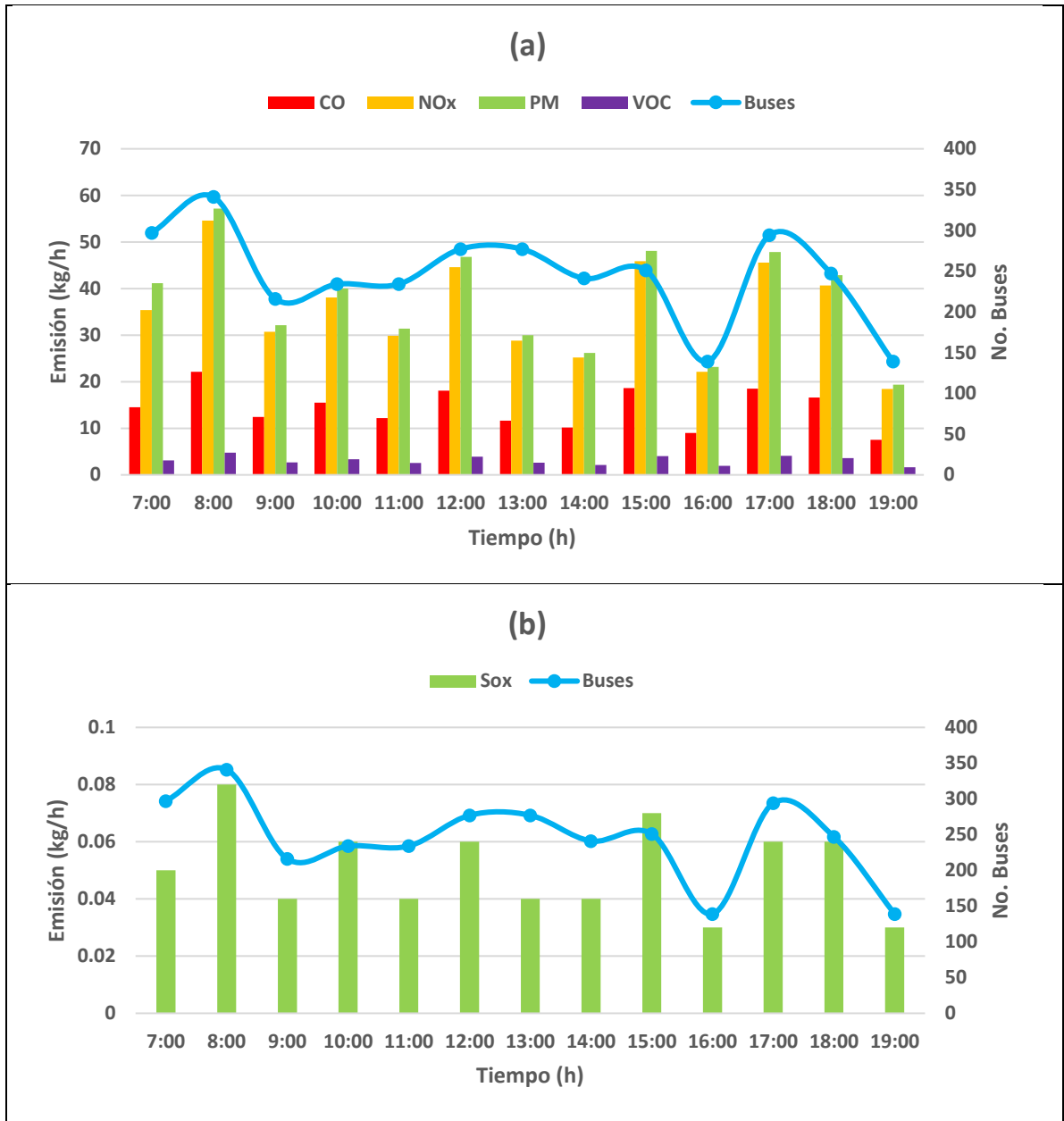


Figura 14. Emisiones contaminantes criterio utilizando EGR como sistema de control de emisiones. **a.)**: emisiones contaminantes sin SOx – **b.)**: emisiones óxidos de azufre (SOx).

El material particulado (PM) es el contaminante criterio que más se emite en el ciclo de conducción presentado para la ciudad de Cartagena de manera horaria, contando en su máxima emisión con 57.17 kg a las 8:00 AM. Seguido por los óxidos

de nitrógeno (NO_x) con 54.61 kg, para continuar con el monóxido de carbono (CO) con 22.14 kg, los compuestos orgánicos volátiles (VOC) con 4.75 kg y por último los óxidos de azufre (SO_x) con 0.08 kg; todos a la misma hora de la mañana. La segunda mayor emisión se concentra en las horas de la tarde (3:00 PM), permaneciendo en el mismo orden en cuanto a cantidad de contaminante generado.

De acuerdo a los resultados expuestos en la figura 14, era de esperarse que en las horas de la mañana (8:00 AM) las emisiones de contaminantes criterio fueran mayores. El presente estudio considera como un periodo de alto flujo vehicular la hora de 7:00 AM a 8:00 PM, debido a esto la última hora mencionada posee aún la influencia en actividad vehicular de las 7:00 de la mañana. De la misma manera, los periodos de mayor flujo vehicular para las horas del mediodía (12:00 – 2:00) PM y tarde (5:00 - 7:00) PM presentan altas emisiones a comparación del resto de horas.

Los estudios previos realizados por EPA Cartagena (2010) muestran que la Avenida Pedro de Heredia presentó mayores aportes en compuestos orgánicos volátiles (VOC); asimismo, los mayores aportes de contaminantes criterio por los Buses en relación a la flota vehicular total (incluyendo motos, carros y camiones) fueron los óxidos de nitrógeno (NO_x) y el material particulado (PM). Cumpliendo con lo anterior, los resultados obtenidos actualmente muestran que las emisiones máximas pertenecen al material particulado (PM), seguido de los óxidos de nitrógeno (NO_x).

Estudios similares realizados con el modelo IVE han coincidido que los buses de transporte urbano son los principales responsables de las emisiones de material particulado (PM) y óxidos de nitrógeno (NO_x) en las ciudades, sin tomar en cuenta la presencia de los vehículos pesados (Lents et al. , 2004; Davis et al., 2004; Lents et al., 2004). Por el contrario, estudios llevados a cabo en ciudades como Pune evidencian que los buses solo son productores de material particulado debido a la presencia de vehículos de dos ruedas (University of California at Riverside , 2004); igualmente, en la ciudad de Beijín la emisión de Óxidos de Nitrógeno es producto de los buses (Huan et al., 2005).

Las altas emisiones de material particulado se deben a la carencia de filtros de partículas dentro de las características descritas para los buses de la ciudad de Cartagena. A diferencia de los óxidos de nitrógenos (NO_x) los cuales al calcularse en el modelo IVE con la especificación del sistema de control de emisión EGR, no superan al material particulado. No obstante, las bajas emisiones de los óxidos de azufre (SO_x), observada en la figura 14b., son comprensibles debido a las características bajas en azufre del Diésel utilizado en Colombia (Resolución No. 182087, 2007; Ley No. 1205, 2008; Ecopetrol, 2013).

Existe una relación directa entre el número de buses por hora y las emisiones contaminantes; es decir, entre mayor sea el número de buses en operación, así

mismo aumentarán las emisiones de los contaminantes. Sin embargo, la figura 14a en las horas 13:00 PM y 14:00 PM muestran emisiones bajas a pesar del elevado número de vehículos. Cabe destacar que factores como el número de paradas y el tiempo de ralentí durante la parada, también afectan la liberación de contaminantes en el vehículo. Dicho comportamiento en la ciudad de Cartagena es representado por el fenómeno de “la guerra del centavo;” este tipo de comportamiento de manejo repercute de manera directa en la movilidad en la ciudad ya que por el afán de obtener mayores ganancias frente a otro conductor, los buses tienden disminuir la velocidad y en la mayoría de las veces se detienen a esperar a los pasajeros. Teniendo en cuenta lo anterior cobra sentido el comportamiento obtenido durante la hora mencionada, puesto que las mediciones a bordo revelaron que el tiempo de ralentí del vehículo durante las paradas, fueron mayores en relación a los datos recolectados para las demás horas.

6.3.2 Emisiones sin Válvula de Recirculación de Gases de Escape (EGR)

Tabla 20. Emisiones resultantes Ciclo de Conducción sin EGR

HORA	Emisiones (kg/h)					No. Buses
	CO	NOx	SOx	PM	VOC	
7:00	14.52	114.19	0.05	41.18	3.39	297
8:00	22.14	176.36	0.08	57.17	5.18	341
9:00	12.44	99.20	0.04	32.12	2.93	216
10:00	15.49	122.98	0.06	40.00	3.64	234
11:00	12.16	96.51	0.04	31.41	2.81	234
12:00	18.11	144.09	0.06	46.77	4.28	277
13:00	11.62	93.00	0.04	30.01	2.85	277
14:00	10.15	81.29	0.04	26.21	2.32	241
15:00	18.62	148.09	0.07	48.09	4.37	251
16:00	8.98	71.54	0.03	23.20	2.12	139
17:00	18.53	147.26	0.06	47.86	4.43	294
18:00	16.60	131.39	0.06	42.86	3.91	247
19:00	7.50	59.56	0.03	19.37	1.81	139
Total Contaminante (kg/día)	186.86	1485.46	0.66	486.25	44.04	3187

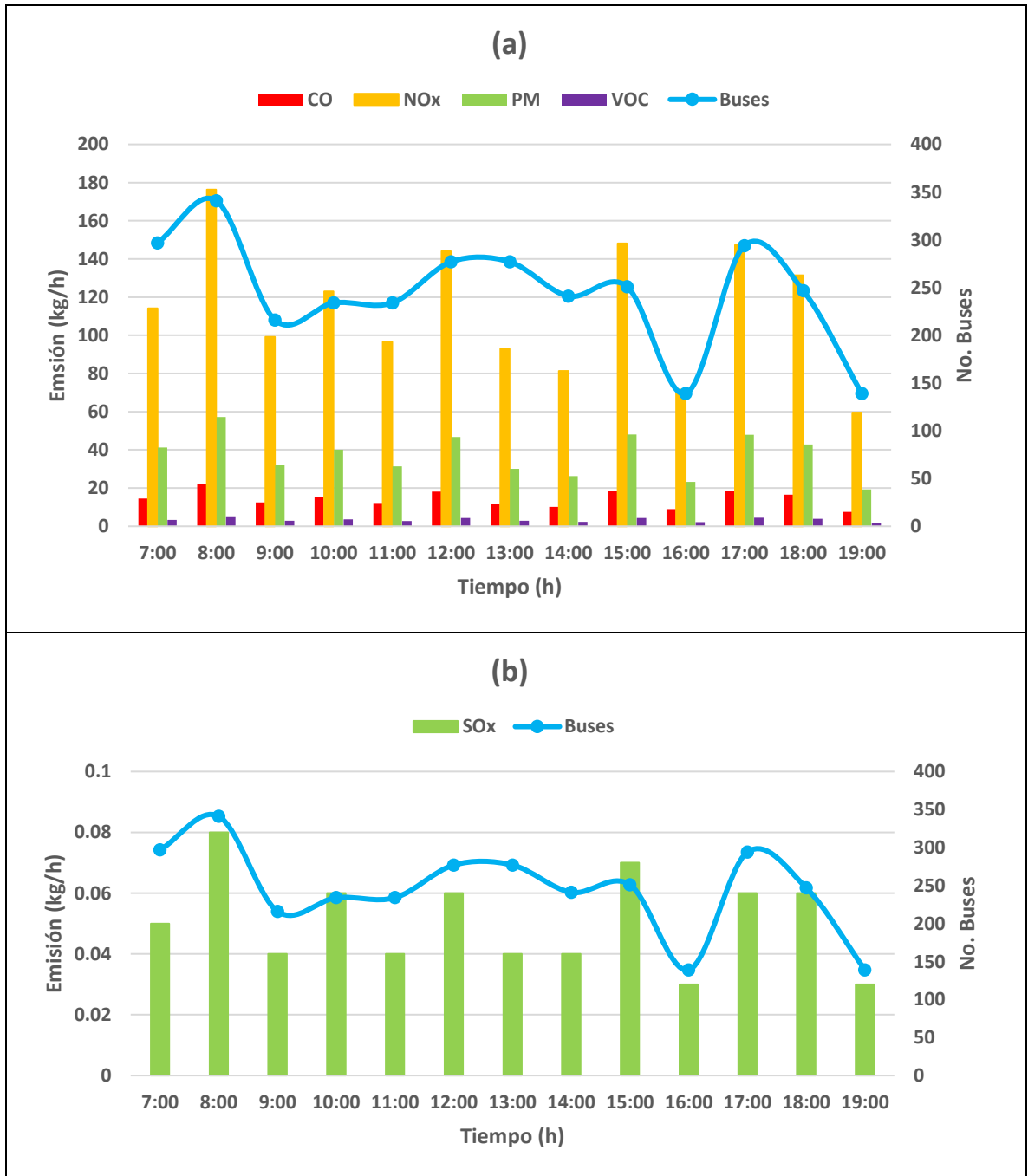


Figura 15. Emisiones contaminantes criterio Ciclo de Conducción sin utilizar EGR como sistema de control de emisiones. **a.)**: Emisiones contaminantes sin SOx – **b.)**: emisiones óxidos de azufre (SOx)

Al ejecutar el modelo IVE, sin incluir ningún sistema de control de emisiones, se observa que el contaminante criterio de mayor emisión fue los óxidos de nitrógeno (NO_x) con gran diferencia a comparación de los demás contaminantes a analizar. La emisión máxima alcanzada por los NO_x fue de 176,36 kg a las 8:00 AM, siendo su segunda emisión destacable a las 3:00 PM con 148.09 kg. Los siguientes contaminantes criterios mantuvieron sus máximos valores de emisión mencionados anteriormente, comenzando con los óxidos de nitrógeno (NO_x) con 54.61 kg, para continuar con el monóxido de carbono (CO) con 22.14 kg, los compuestos orgánicos volátiles (VOC) con 4.75 kg y los óxidos de azufre (SO_x) con 0.08 kg (Figura 15), también en las horas de la mañana.

El incremento notable de los óxidos de nitrógeno (NO_x) en las emisiones resultantes se debe fundamentalmente a la carencia de la Válvula de Recirculación de Gases de Escape (EGR). Debido a que en esta sección se calcularon las emisiones bajo las mismas características de las emisiones anteriores (en semana), los demás contaminantes criterio poseerán los mismos datos. La reducción de óxidos de nitrógeno (NO_x) es la función de la Válvula de Recirculación de Gases de Escape (EGR), su aumento en las emisiones demuestra la efectividad del sistema de control de emisión.

6.3.3 Emisiones Fin de Semana.

Las emisiones del fin de semana no provinieron de un ciclo de conducción definido como se realizó en los resultados anteriores. Las mediciones fueron realizadas en un solo recorrido de bus de transporte urbano con el propósito de ser objeto de comparación con las emisiones producidas por el comportamiento de manejo de un conductor durante la semana. Los resultados obtenidos son los siguientes:

Domingo:

Tabla 21. Emisiones contaminantes criterio Buses día Domingo

HORA	Emisiones (kg/h)				
	CO	NOx	SOx	PM	VOC
7:00	12.34	29.02	0.05	35.54	2.23
8:00	14.19	34.77	0.05	36.64	3.03
9:00	13.77	34.10	0.05	35.57	2.81
10:00	10.08	24.72	0.04	26.03	2.20
11:00	16.02	39.24	0.06	41.37	3.36
12:00	18.12	45.34	0.07	46.78	4.12
13:00	22.25	56.83	0.08	57.46	4.63
14:00	15.43	38.00	0.05	39.85	3.30
15:00	16.29	40.15	0.06	42.08	3.49
16:00	6.11	15.01	0.02	15.79	1.33
17:00	19.34	47.56	0.07	49.94	4.11
18:00	14.09	34.79	0.05	36.40	3.17
19:00	9.19	22.63	0.03	23.74	1.93
Total contaminante (kg/día)	187.22	462.16	0.68	487.19	39.71

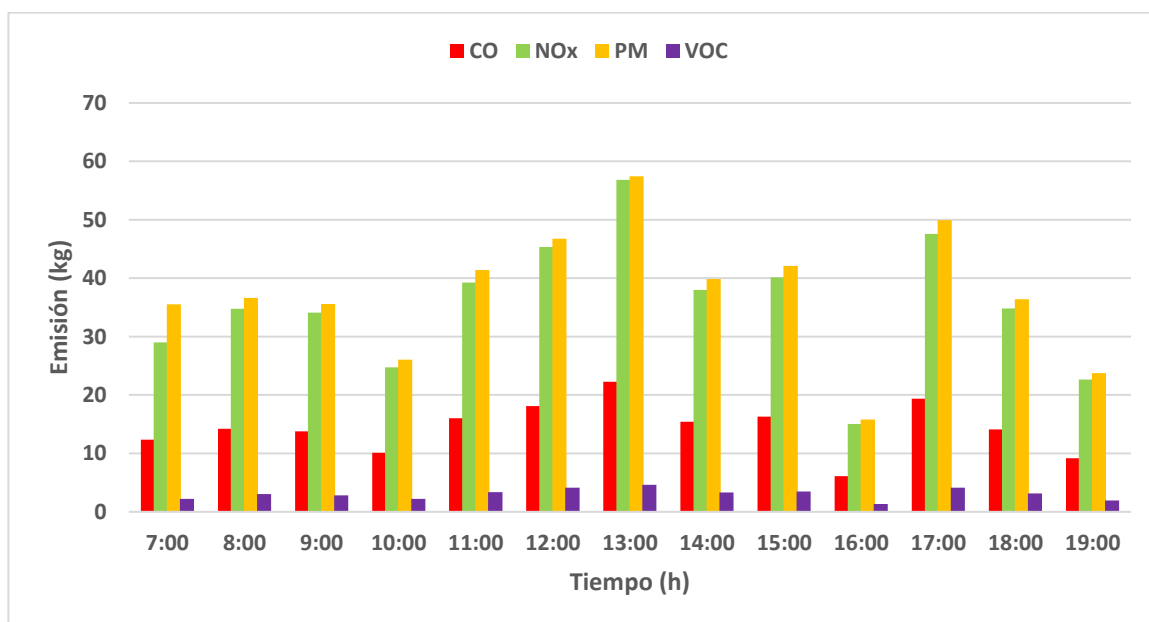


Figura 16. Gráfica emisiones contaminantes criterio día Domingo

Las emisiones el día Domingo se destacaron por incrementarse a las horas del mediodía (1:00 PM) perteneciendo la máxima emisión al material particulado (PM) con una cantidad de hasta 57.46 kg, continuando con los óxidos de nitrógeno (NO_x) con 56.83 kg, el monóxido de carbono (CO) con 22.25 kg y los compuestos orgánicos volátiles (VOC) con 4.63 kg.

Las mayores emisiones se concentraron en los periodos de mayor flujo vehicular de la tarde (1:00 – 2:00) PM y (5:00 – 7:00) PM. Durante las horas de la mañana las emisiones presentaron bajos niveles, además no variaron significativamente manteniéndose alrededor de los (35 – 36) kg/h en su máximo contaminante criterio producido, así como en los demás contaminantes. La poca variación presente en las horas de la mañana se debe a la escasa presencia de buses los domingos por la mañana en la ciudad.

Los cálculos fueron realizados contando con la presencia de Válvula de Recirculación de Gases de Escape (EGR), por lo tanto, el incremento del material particulado (PM) se debe también a la carencia de sistemas de control de emisiones como filtro de partículas.

Sábado:

Tabla 22. Emisiones contaminantes criterio Buses día Sábado

HORA	Emisiones (kg/h)				
	CO	NO _x	SO _x	PM	VOC
7:00	14.86	36.31	0.05	42.05	3.17
8:00	20.79	51.24	0.07	53.68	4.68
9:00	9.07	22.43	0.03	23.44	1.88
10:00	7.60	18.72	0.03	19.62	1.63
11:00	12.97	31.97	0.05	33.50	2.84
12:00	21.27	52.46	0.07	54.92	4.80
13:00	17.86	44.00	0.06	46.12	3.91
14:00	16.65	41.16	0.06	42.99	3.59
15:00	22.90	56.52	0.08	59.15	5.08
16:00	8.94	22.23	0.03	23.09	1.87
17:00	19.71	48.64	0.07	50.90	4.32
18:00	14.89	36.63	0.05	38.47	3.17
19:00	9.53	23.63	0.03	24.62	2.04
Total contaminante (kg/día)	197.04	485.94	0.68	512.55	42.98

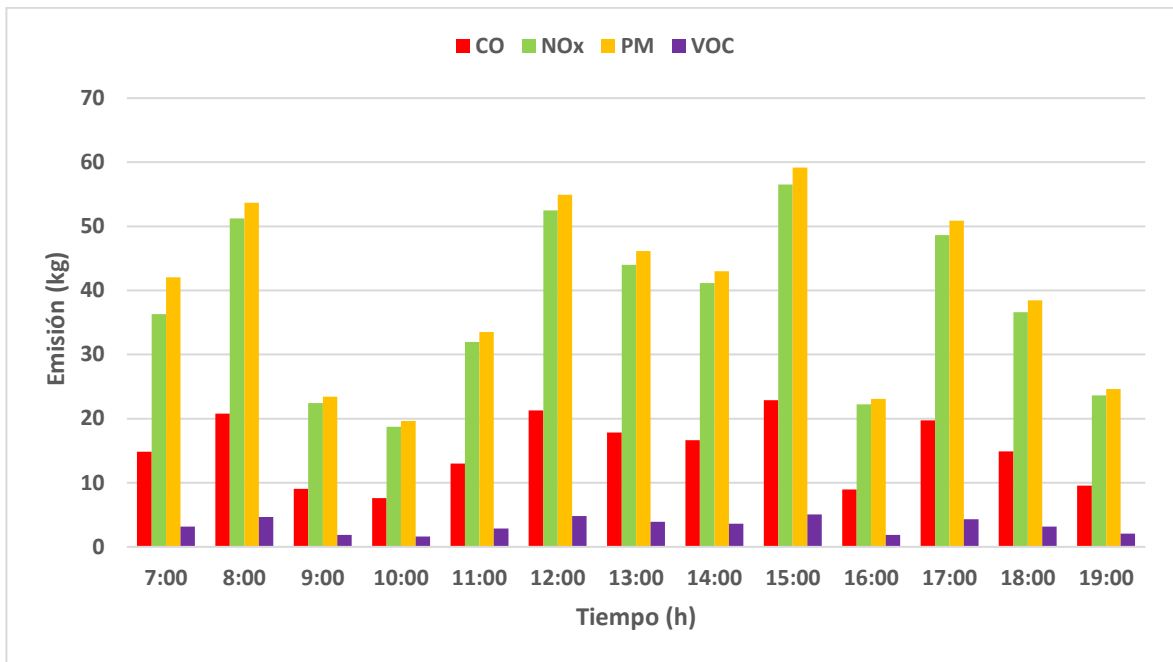


Figura 17. Gráfica emisiones contaminantes criterio día sábado

Refiriéndonos a las emisiones del día Sábado, a diferencia de los anteriores resultados las emisiones incrementaron en las horas de la tarde (3:00 PM). Las máximas emisiones se mantienen en el mismo orden que las anteriores correspondiendo a material particulado (PM) con 59.15 kg, seguido de los óxidos de nitrógeno (NO_x) con 56.52 kg, el monóxido de carbono (CO) con 22.90 kg y los compuestos orgánicos volátiles (VOC) con 5.08 kg.

En esta sección las emisiones se mantuvieron elevadas en todos los periodos de mayor flujo vehicular del día, presentando un mayor incremento en las horas de la tarde probablemente debido al aumento de la actividad vehicular en la ciudad. La emisión significativa que se observa a las 8:00 AM a pesar de no ser un periodo de mayor flujo vehicular, se debe a la influencia de la hora anterior sobre la misma, además del hecho que la actividad laboral los sábados es similar a los días de la semana.

La alta emisión de material particulado (PM) y baja emisión de óxidos de azufre (SO_x) es producida por las mismas causas explicadas en los resultados previos.

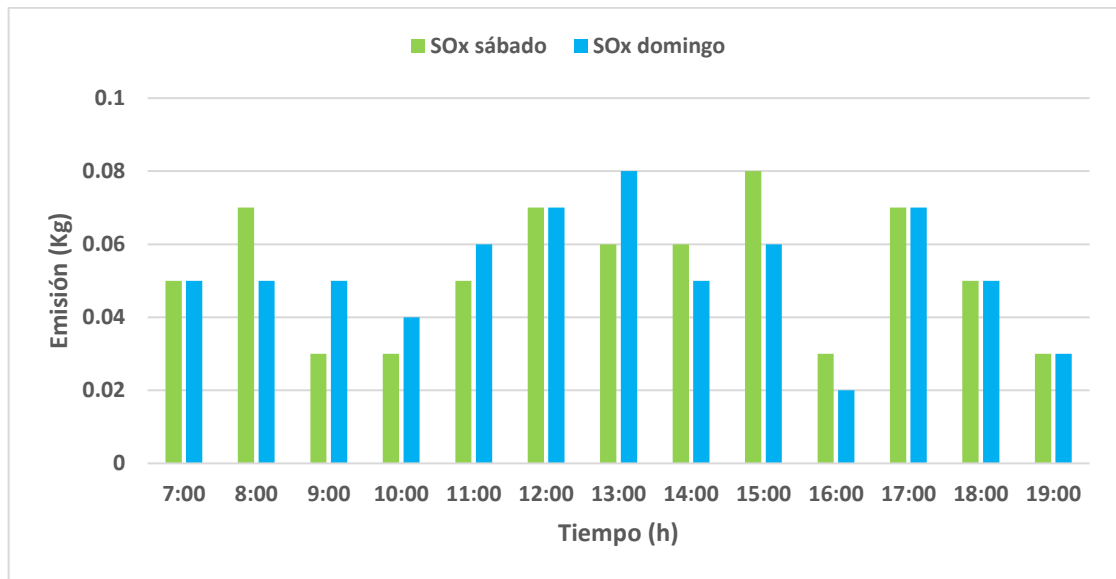


Figura 18. Emisión óxidos de azufre (SO_x) Fin de semana

Las emisiones máximas de óxido de azufre (SO_x) corresponden a las horas: 1:00 PM para el domingo y 3:00 PM para el Sábado, ambos con valores de 0.08 kg. Aparte de esto, las emisiones contaminantes aumentaron notablemente a partir de las 12:00 PM a comparación de las emisiones obtenidas durante la semana.

6.4 Comparación resultados semana y fin de semana.

La figura 19 representa la emisión total en términos porcentuales comparando los diferentes escenarios de estudio. Se aprecia que durante la semana y el día sábado, las emisiones sobrepasan el 30% de la emisión total mientras que el día domingo tiende a mantenerse entre el 20%. Esto se debe principalmente a la poca actividad vehicular en las horas del mañana del domingo, dado al cese del horario laboral en la ciudad a diferencia del sábado y los días de semana.

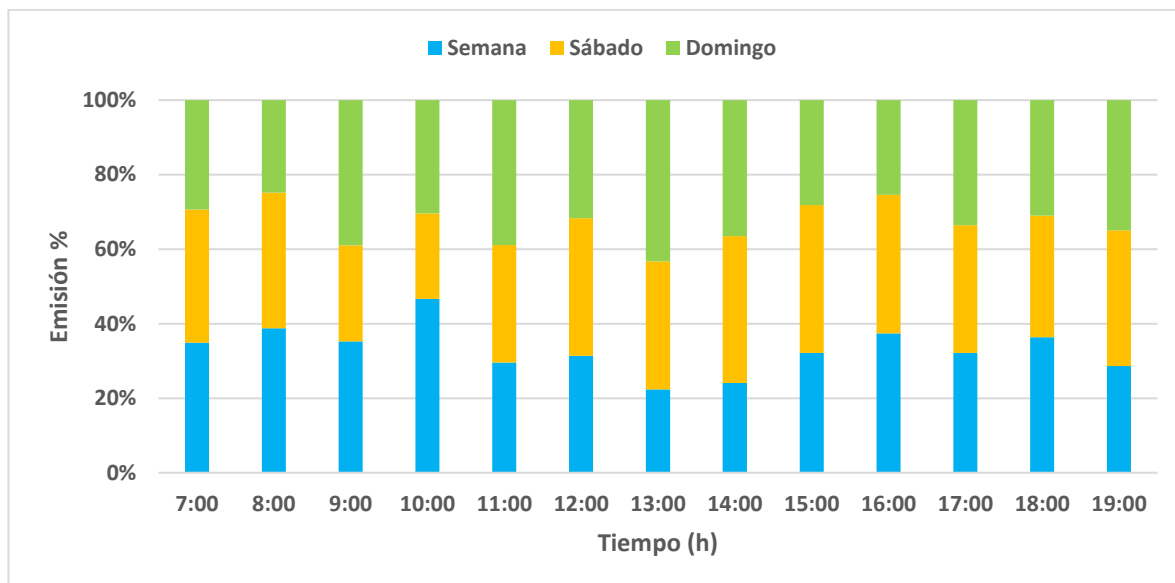


Figura 19. Emisión porcentual semana y fin de semana contaminantes criterio

Una reducción hasta del 13% se presenta durante las horas correspondientes entre las 9:00 AM a 11:00 AM del sábado. Entretanto el domingo y los resultados de semana aumentan alcanzando y superando el 40% de las emisiones.

A partir del mediodía las emisiones incrementan en todos los resultados estudiados durante los periodos de mayor flujo vehicular, a excepción del sábado el cual se mantiene con ligeras variaciones. No obstante, en el horario de: (2:00 a 5:00) PM las emisiones en semana se incrementan, mientras que el domingo disminuyen. Las emisiones máximas en semana correspondieron al 45% de la emisión total, a su vez en domingo y sábado las emisiones máximas correspondieron al 39% y 40% de la emisión total.

6.5 Factores de emisión.

Tal como se ha explicado en la metodología, el modelo cuenta con sus propios factores de emisión establecidos para el cálculo de emisiones dependiendo las características del vehículo a estudiar, los cuales se encuentran en la base de datos IVEBER de IVE. Teniendo en cuenta las características del bus de transporte público urbano a utilizar en la ciudad de Cartagena, los factores de emisión establecidos por el modelo IVE junto con los calculados en el presente proyecto, se encuentran en la tabla 23.

Tabla 23. Comparación factores de emisión calculados y pertenecientes al modelo IVE

Factores de Emisión (g/km)					
	CO	NOx	SOx	PM	VOC
IVE	2.18	5.22	0.08	1.20	0.42
Calculados	1.31	3.27	0.005	3.42	0.28

Los factores de emisión productos del cálculo con el modelo IVE fueron menores a comparación de los pertenecientes al modelo IVE, a excepción del material particulado el cual fue el contaminante de mayor emisión detectado. Contar con los propios factores de emisión permite realizar una estimación de emisiones contaminantes, provenientes del servicio público, con mayor precisión y exactitud, además es una herramienta básica para la construcción de un inventario de emisiones de las fuentes vehiculares en la ciudad de Cartagena.

6.6 Efecto de las variables ambientales en las emisiones.

El modelo IVE fue ejecutado cambiando la temperatura en un rango entre 28°C y 38°C y la humedad relativa entre 64% y 83% lo cual corresponde a condiciones extremas (mínimas y máximas) que reporta la estación meteorológica del Aeropuerto de la ciudad de Cartagena para el año 2015. Los resultados no arrojaron ninguna variación en las emisiones, debido a que las variables ambientales son utilizadas como factores de corrección que modifican las variables de los modos de conducción, en específico, el uso del aire acondicionado en la flota vehicular; en lugar de modificar directamente la base de factores de emisión establecida en IVE para la estimación de emisiones tal como lo muestra la ecuación 3. Teniendo en cuenta este cálculo interno del modelo, la humedad relativa y temperatura modifican la influencia del uso del aire acondicionado en las variables del comportamiento vehicular, no obstante a causa que los buses de la ciudad de Cartagena no utilizan aire acondicionado, el modelo no presenta cambio en las emisiones al realizar variaciones en las variables meteorológicas de temperatura y humedad relativa.

7. CONCLUSIONES.

Las emisiones contaminantes de los buses de transporte público urbano de la ciudad de Cartagena fueron estimadas por medio de la utilización del modelo internacional de emisiones en fuentes móviles (IVE) efectuando su calidad de modelo de estimación de emisiones para regiones de países en vía de desarrollo.

Los contaminantes criterio de mayor presencia producto de la circulación diaria de un bus en la Avenida Pedro de Heredia fueron los óxidos de nitrógeno (NO_x) con una emisión en promedio de 35 kg/h y el material particulado (PM) con 37 kg/h en promedio. Mientras que contaminantes como el monóxido de carbono (CO) y los compuestos orgánicos volátiles (VOC) se generaron en menor cantidad, destacando los óxidos de azufre (SO_x) no superando los 0.08 kg /h debido a la composición del Diésel utilizado en Colombia.

De acuerdo a los picos significativos de producción contaminante, las mayores emisiones se muestran en los periodos de mayor flujo vehicular correspondientes a 7:00 a 8:00 AM, 12:00 a 2:00 PM y 5:00 a 7:00 PM. A su vez, las máximas emisiones presentadas coinciden con horas donde existe una alta actividad vehicular.

Se puede afirmar que, en cuanto a la emisión de contaminantes, el día sábado se comporta similar a un día entre semana debido a las actividades laborales realizadas y actividad vehicular presentes durante el día; mientras que el domingo la emisión varía, presentándose en menor cantidad, a causa de la inactividad de la gran mayoría de los ciudadanos.

Existe la posibilidad que los resultados de las emisiones se vieran afectos por la presencia o carencia de los sistemas de control de emisión al momento de especificar las características en el modelo. El modelo IVE es una herramienta de cálculo de emisiones que posee un determinado número de sistemas de control de emisión y abarca en su gran mayoría las más comunes utilizadas en países de desarrollo. Sin embargo, en algunas ocasiones el diseño del modelo no permitía asociar diferentes sistemas de control de emisión que no fueran las opciones predeterminadas.

Al desarrollar el ciclo de conducción de la ciudad de Cartagena se llegó a la conclusión que la ciudad posee diversos problemas de movilidad. La presencia de paradas prolongadas (1010), velocidades bajas (11.56 km/h) y continuas aceleraciones notables en el ciclo de conducción son, también comportamientos de manejo promotores de la elevada liberación de contaminantes criterio.

Cabe resaltar que, al comparar el ciclo de conducción actual con los ciclos desarrollados en ciudades de diferentes países, posee tanto una velocidad promedio como una velocidad máxima inferior a los ciclos de referencia, a causa de las condiciones culturales, geográficas y estructurales de la región. Lo anterior indica que Cartagena requiere de un programa de educación dirigido a los conductores de servicio público, que incluya hábitos adecuados de manejo y contribuyan a mejorar la movilidad de la ciudad, lo cual posiblemente reducirá a su vez las emisiones de contaminantes emitidos a la atmósfera. Adicionalmente, en términos de infraestructura, la ciudad requiere de paradas estratégicas y específicas de pasajeros, que eviten la congestión vial. Se detectó que el Mercado de Bazurto, María Auxiliadora y el Centro Histórico son los puntos donde se generan mayores problemas de movilidad, de acuerdo con la ruta seleccionada.

Las pruebas de cálculo de emisiones realizadas en presencia y carencia de la válvula de recirculación de gases de escape (EGR) demuestran que la utilización de los sistemas de control de emisión cumple un papel importante en la reducción de contaminantes criterio durante las operaciones del vehículo.

Teniendo en cuenta lo anterior si los buses de la ciudad de Cartagena no cuentan con Válvula de Recirculación de Gases de Escape (EGR), se puede asegurar que actualmente se encuentran generando elevadas emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) que sobrepasan en más de un 40% las emisiones de material particulado (PM).

Las variables ambientales de humedad relativa y temperatura solo modifican la influencia del el uso del aire acondicionado en las variables del comportamiento vehicular en el cálculo interno del modelo IVE, por lo tanto, a causa que los buses de la ciudad de Cartagena no utilizan aire acondicionado, el modelo no presenta cambio en las emisiones resultantes durante la variación de las condiciones meteorológicas.

De acuerdo a los factores de emisión hallados en bus en la ciudad de Cartagena, se emite por kilómetro recorrido 3.42 kg de material particulado y 3.27 kg de óxidos de nitrógeno (NO_x), lo cual corresponde a emisiones inferiores respecto a un ciclo de conducción como el FTP 75, excepto para material particulado.

8. TRABAJO FUTURO.

Para la estimación de emisiones en trabajos futuros es recomendable consultar el ciclo de conducción definido por la localidad a estudiar. En caso que no se posean evidencias de su anterior creación o no se puede comprobar la veracidad del ya existente, proceder a su debida construcción colocando en práctica la metodología empleada en el presente proyecto. Asimismo, se debe desarrollar un ciclo de conducción para la ciudad de Cartagena que abarque el resto de la flota en circulación (motocicletas, taxis, vehículos particulares), aparte de los buses de transporte público urbano. Esta información permitirá construir un inventario de emisiones de fuentes móviles para la ciudad de Cartagena.

Debido a la implementación del Sistema Integrado de Transporte Masivo (Transcaribe) en la ciudad de Cartagena, también se sugiere el desarrollo de una metodología similar a la del presente proyecto para comprobar su eficacia en reducción de contaminantes criterio frente a los buses anteriormente implementados.

Siendo los instrumentos GPS la herramienta por excelencia para la obtención de la velocidad segundo a segundo del vehículo de estudio, se recomienda la utilización de un dispositivo que cuente con las características apropiadas de precisión y captación de señal al momento de realizar las mediciones en ruta. El presente proyecto cumple con la función de demostrar que el GPS incluido en los dispositivos móviles también permite la obtención de la información requerida para este tipo de estudios, no obstante, la incertidumbre presente en los datos recolectados lo convierten en una herramienta no recomendable.

Antes de llevar a cabo el cálculo de emisiones dentro del modelo se deberá realizar un estudio de los sistemas de control de emisiones utilizados por la flota actual. Para ello se proponen encuestas, campañas de obtención de información y consultas en la ficha técnica de los vehículos a estudiar.

Aunado a lo anterior, se recomienda asegurar la exactitud y precisión de la información recolectada y las emisiones calculadas empleando herramientas como: instrumentos de medición preciso, modelo de estimación de emisiones confiable y ciclo de conducción definido en la región.

9. REFERENCIAS.

- Achour, H., & Olabi, A. (2016). Driving cycle developments and their impacts on energy consumption of transportation. *Journal of Cleaner Production*, 1778–1788.
- Adak, P., Sahu, R., & Elumalai, P. (2016). Development of emission factors for motorcycles and shared auto-rickshaws using real-world driving cycle for a typical Indian city. *Science of the Total Environment*, 299–308.
- Araya, A. (2008). *Metodología de cálculo de emisiones vehiculares basada en modos de conducción y potencia específica vehicular* (Tesis de pregrado). Universidad de Chile. Chile, Santiago de Chile.
- Bespalov, V., Gurova, O., & Samarskaya, N. (2016). Main Principles of the Atmospheric Air Ecological Monitoring Organization for Urban Environment Mobile Pollution Sources. *Procedia Engineering*, 2019 – 2024 .
- Cartagena Cómo Vamos (CCV). (2015) ¿Cuáles son las principales enfermedades de los Cartageneros? Cartagena, Colombia.
- Castro, P; Escobar, L. (2006). *Estimación de las emisiones contaminantes por fuentes móviles a nivel nacional y formulación de lineamientos técnicos para el ajuste de las normas de emisión* (Tesis de pregrado). Universidad de la Salle. Colombia, Bogotá.
- Cedillo, K. (2013). *Determinación de ciclos típicos de conducción* (Tesis de Maestría). Instituto Tecnológico y de estudios superiores de Monterrey. México, Toluca.
- Clean Air Institute. (2013). *Metodologías para la estimación de emisiones de transporte urbano de carga y guías para la recopilación y organización de datos*. EE.UU., Washington D.C. : Clean Air Institute.
- Crolla, D. (2015). *Encyclopedia of Automotive Engineering*. USA: John Wiley & Sons.
- Crouse, W. (1993). *Mecánica del automóvil*. Barcelona, España: Marcombo Boixareu Editores.
- Davis, N., Lents, J., Nikkila, N., & Osses, M. (2004). *Mexico City Vehicle Activity Study* . México: International Sustainable Systems Research Center (ISSRC).

- Echeverri Londoño, C. A. (2006). Estimación De La Emisión De Gases De Efecto Invernadero En El Municipio De Montería (Córdoba, Colombia). (Spanish). *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 5(9), 85–96.
- Echeverri, C., Valencia, H., & Acosta, A. (2012). Metodología para evaluar el impacto ambiental sobre la calidad del aire en los proyectos de rediseño de rutas de transporte público colectivo en las ciudades. Estudio caso: Medellín. *Ingenierías Universidad de Medellín*, 42.
- Ecopetrol. (2013). *Análisis a muestras de Diesel corriente, Diesel Extra, Gasolina corriente y Gasolina extra*. Cartagena, Bolívar: Ecopetrol S.A.
- EPA Cartagena. (2009). *Perspectivas del medio ambiente urbano: Geo Cartagena*. Cartagena, Colombia.
- EPA Cartagena. (2010). *Diagnóstico de la calidad del aire (inventario de emisiones) y diseño del sistema de vigilancia de calidad del aire de la ciudad de Cartagena de indias D.T. y C, departamento de Bolívar*. Cartagena, Bolívar: EPA Cartagena.
- Giraldo, L. (2005). *Estimación del inventario de emisiones de fuentes móviles para la ciudad de Bogotá e identificación de variables pertinentes* (Tesis de Maestría). Universidad de los Andes. Colombia, Bogotá.
- González Oropeza, R; (2005). Los ciclos de manejo, una herramienta útil si es dinámica para evaluar el consumo de combustible y las emisiones contaminantes del auto transporte. *Ingeniería. Investigación y Tecnología*, VI() 147-162. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=40460301>
- Goyal, P., Mishra, D., & Kumar, A. (2013). Vehicular emission inventory of criteria pollutants in Delhi. *SpringerPlus*, 2(1), 1.
- Guo, H., Zhang, Q., Shi, Y., & Wang, D. (2007). Evaluation of the International Vehicle Emission (IVE) model with on-road remote sensing measurements. *Journal of Environmental Sciences*, 818–826.
- Guevara, M. (2010). *Metodología de pruebas para la evaluación de convertidores catalíticos en motores a gasolina* (Tesis de pregrado). Escuela Politécnica Nacional. Ecuador, Quito.
- Higuera, J. (2006). *Diagnóstico de Fallas en Motores Térmicos Alternativos Mediante el Análisis de la Variación de la Velocidad Angular* (Tesis de Maestría). Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Colombia, Bucaramanga.

- Huan, L., Chunyu, H., Lents, J., Davis, N., Osses, M., & Nikkila, N. (2005). *Beijing Vehicle Activity Study*. Beijing, China: International Sustainable Systems Research Center (ISSRC).
- Huang, C; Pan, H; Lents, J; Davis, N; Osses, M; Nikkila, N. (2005). *Shanghai Vehicle Activity Study*. Shanghai, China: International Sustainable Systems Research Center (ISSRC).
- Hung, W., Tong, H., Ha, K., Lee, C., & Pao, L. Y. (2007). Development of a practical driving cycle construction methodology: A case study in Hong Kong. *Transportation Research Part D*, 115–128.
- H. Y. Tong & W. T. Hung (2010) A Framework for Developing Driving Cycles with On-Road Driving Data, *Transport Reviews: A Transnational Transdisciplinary Journal*, 30:5, 589-615.
- Instituto Nacional de Ecología. (2005). *Guía de elaboración y usos de inventarios de emisiones*. Estados Unidos, Kansas.
- Instituto Nacional de Ecología. (2009). *Guía metodológica para la estimación de emisiones vehiculares en ciudades mexicanas*. México D.F: Instituto Nacional de Ecología.
- ISSRC. (2008). *Attach C: Manual del usuario del modelo IVE. Versión 2.0*. USA: IVE Model.
- ISSRC. (2008). *Manual del Usuario del Modelo IVE. Versión 2.0*. U.S.A: IVE Model.
- Jiménez Alonso, F., Román de Andrés, A., & López Martínez, J. M. (2013). Determinación de ciclos de conducción en rutas urbanas fijas. *Dyna Ingeniería e Industria*, 88(6), 681-688.
- Jimenez-Palacios, J. L. (1998). *Understanding and quantifying motor vehicle emissions with vehicle specific power and TILDAS remote sensing* (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology).
- Koupal, J., Cumberworth, M., Michaels, H., Beardsley, M., & Brzezinski, D. (2002). Draft design and implementation plan for EPA's multi-scale motor vehicle and equipment emission system (MOVES). *US Environmental Protection Agency: Washington, DC, USA*.
- Lents, J., Davis, N., Nikkila, N., & Osses, M. (2004). *Lima Vehicle Activity Study*. Lima, Perú: International Sustainable Systems Research Center (ISSRC).
- Lents, J., Davis, N., Nikkila, N., & Osses, M. (2004). *São Paulo Vehicle Activity Study*. São Paulo, Brasil: International Sustainable Systems Research Center (ISSRC).

- Ley No. 1205 Por medio de la cual se mejora la calidad de vida a través de la calidad del diésel y se dictan otras disposiciones (2008). *En Diario Oficial 47.050*. Colombia.
- Londoño, L., Correa, M., & Palacio, C. (2011). Estimación de las emisiones de contaminantes atmosféricos provenientes de fuentes móviles en el área urbana de Envigado, Colombia. *Escuela de ingenierías de Antioquia (EIA)*, 149-162.
- Martínez, E. (2014). *Convertidores catalíticos y sus aplicaciones* (Tesis de pregrado). Universidad Veracruzana. México, Veracruz.
- MAVDT. (2010). *Protocolo para el control y vigilancia de la contaminación atmosférica generada por fuentes fijas*. Bogotá, Colombia: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
- Michel, A., & André, V. (2004). Characterisation of an urban bus network for environmental purposes. *Science of the Total Environment* , 85 – 99.
- Nesamani, K. (2010). Estimation of automobile emissions and control strategies in India. *Science of the Total Environment*, 1800–1811.
- Naranjo, V. (2008). *Análisis de la capacidad y nivel de servicio de las vías principales y secundarias de acceso a la ciudad de Manizales*. Universidad Nacional de Colombia sede Manizales. Colombia, Manizales. Recuperado de: <http://www.bdigital.unal.edu.co/3555/1/victorhugonaranjoherrera.2008.pdf>.
- Pérez, M. (2011). *Sistemas Auxiliares del Motor*. Madrid, España: Paraninfo.
- Radian International LLC. (1997). *Manuales del Programa de Inventarios de México*. Colorado.
- Radian International LLC. (1997). *Manuales del Programa de Inventarios. Volumen VI - Desarrollo de Inventarios de Emisiones*. Sacramento.
- Resolución No. 182087 por la cual se modifican los criterios de calidad de los biocombustibles para su uso en motores diésel como componente de la mezcla con el combustible diésel de origen fósil en procesos de combustión (2007). 17 de Diciembre.
- Sánchez, Jorge, Urrego, Juan, Zakzuk, Josefina, Bornacelly, Adriana, Castro, Ildefonso, & Caraballo, Luis. (2013). Niveles de Contaminantes en el aire de Cartagena, Colombia. *Revista de la Universidad Industrial de Santander. Salud*, 45(3), 35-44. Retrieved October 14, 2014, from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-08072013000300004&lng=en&tlng=es.

- Seers, P., Nachin, G., & Glaus, M. (2015). Development of two driving cycles for utility vehicles. *Transportation Research Part D*, 377–385.
- Shendell, D. (2014). Community Outdoor Air Quality: Sources, Exposure Agents and Health Outcomes. 791 - 806.
- Transcribe S.A. (2013). *Plan de Manejo de Tráfico en Obra Tramo 5A Bazurto - Popa*. Colombia, Cartagena: Transcribe S.A.
- TRB. (2010). *Highway Capacity Manual (HCM)*. transportation research board (TRB).
- SWA. (2013). *HCM versus CLV for Traffic Impact Study Applications*. Estados Unidos: Sabra, Wang & Associates, Inc.
- UNEP (2009). *Manual para una flota limpia*. U.S.A: Editorial Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP).
- U.S EPA. (1995). *AP 42, Compilation of Air Pollutant Emission Factors*. USA: US Environmental Protection Agency (US EPA).
- University of California at Riverside . (2004). *Pune Vehicle Activity Study*. Pune, India: International Sustainable Systems Research Center (ISSRC).
- Zhang , X., Zhao, D., & Shen , J. (2012). A Synthesis of Methodologies and Practices for Developing Driving Cycles. *Energy Procedia* 16, 1868 – 1873.
- Zhang, Q., Xu, J., Wang, G., Tian, W., & Jiang, H. (2008). Vehicle emission inventories projection based on dynamic emission factors: A case study of Hangzhou, China . *Atmospheric Environment*, 4989–5002.