

# Estimación del inventario de emisiones de fuentes móviles para la ciudad de Bogotá e identificación de variables pertinentes.

L.A. Giraldo & E. Behrentz

*Universidad de Los Andes, Bogotá, Colombia*

**RESUMEN:** Se realizó el inventario de emisiones de fuentes móviles de la ciudad de Bogotá utilizando el modelo internacional de emisiones –IVE– como herramienta de cálculo. Se estimaron los aportes de cada categoría vehicular a las emisiones totales y se evaluaron diferentes estrategias que podrían disminuir los niveles de emisiones en la ciudad. Se determinó que los buses representan la categoría vehicular más importante, en términos de emisiones de contaminantes, a pesar de representar menos del 5% del total de vehículos en la ciudad. Los buses generan 50% de las emisiones de PM<sub>10</sub>, cerca del 30% de las emisiones de CO y 40% de las emisiones de NO<sub>x</sub>. Se determinó que el mejoramiento de la calidad de los combustibles diesel es la mejor estrategia para la reducción de las emisiones de PM<sub>10</sub> en Bogotá.

**ABSTRACT:** We estimated Bogotá's mobile source emissions inventory using the international vehicle emission model. The contributions of each vehicle category to total emissions were calculated. Different alternatives to reduce emissions in the city were evaluated. Buses represent the most important vehicle category generating 50% of the PM<sub>10</sub> emissions, around 30% of the CO emissions and 40% of the NO<sub>x</sub> emissions. Improving diesel fuels quality was identified as the single most efficient measure to reduce PM<sub>10</sub> mobile source emissions in Bogotá.

## 1 INTRODUCCIÓN

La contaminación atmosférica en las grandes ciudades es hoy en día uno de los temas que genera mayor interés público. Estudios recientes (Schifter et al., 2003; Ghose et al., 2004) han demostrado que las fuentes móviles son las principales generadoras de contaminantes atmosféricos en centros urbanos. Bogotá en su calidad de mega-ciudad no es la excepción y por esta razón es importante estudiar las distintas fuentes de emisión, así como realizar inventarios que nos permitan cuantificar la severidad del problema.

A través de los años se han desarrollado diferentes metodologías para la estimación de inventarios de emisiones de fuentes móviles, las cuales se pueden clasificar en metodologías de estimación directa y metodologías de estimación indirecta. Las metodologías de estimación directa son aquellas que reali-

zan mediciones de emisiones directamente en la fuente. Algunos ejemplos de estas metodologías son el monitoreo a bordo, las mediciones con sensores remotos y las pruebas dinamométricas. Estas metodologías son precisas pero involucran una inversión de capital considerable. Las metodologías de estimación indirecta, no realizan mediciones de emisiones en la fuente directamente. En vez de esto, utilizan correlaciones entre las emisiones y diversos parámetros que las afectan.

La gran mayoría de metodologías para la estimación de emisiones se fundamentan en la Ecuación 1.

$$E = F_e \cdot A \cdot N_f \quad (1)$$

donde: E = emisión, F<sub>e</sub> = factor de emisión y N<sub>f</sub> = número de fuentes; A = factor de actividad.

Existen modelos computacionales diseñados para estimar las emisiones provenientes de distintas fuentes. Estos modelos son generados a partir de resultados empíricos basados en mediciones directas

que a su vez son correlacionadas con diversos parámetros. Estas correlaciones son aplicadas en otros lugares y a partir de estas se estiman las emisiones. Los modelos de estimación de emisiones vehiculares más utilizados alrededor del mundo son el MOBILE y el COPERT, los cuales fueron desarrollados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) y por la Agencia Ambiental Europea (EEA), respectivamente.

El principal inconveniente de utilizar modelos de estimación de emisiones desarrollados para ciudades distintas, tiene que ver con la influencia que las condiciones y características propias de cada lugar tienen en los factores de emisión vehiculares. Por esta razón, la USEPA financió en el 2003, la elaboración del Modelo Internacional de Emisiones Vehiculares (IVE), con el objetivo de suplir las necesidades de países en vía de desarrollo en la realización de inventarios de emisiones de fuentes móviles. Este trabajo ha sido llevado a cabo por investigadores de la Universidad de California y el Centro Internacional de Investigación de Sistemas Sostenibles (ISSRC).

El modelo IVE fue creado en el marco del proyecto que lleva su nombre, con el objetivo de realizar un estudio internacional de emisiones por fuentes móviles en países en vía de desarrollo. El protocolo involucrado en tal estudio, incluye no solo la herramienta computacional sino el desarrollo de una metodología que permite recolectar, de manera efectiva y económica, la información necesaria para estimar las emisiones provenientes del parque automotor.

En Bogotá se han realizado diversos estudios en los cuales se han estimado las emisiones provenientes de fuentes móviles para contaminantes criterio (CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, PM y COV) así como para gases causantes del efecto invernadero (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>). Sin embargo, a pesar de la importancia de los estudios existentes, el desarrollo del presente proyecto permite comparar y actualizar los resultados obtenidos además de ofrecer una alternativa económica y fácil de utilizar. Adicionalmente, la herramienta utilizada en este proyecto permite el análisis de escenarios y de sensibilidad para determinar e identificar los factores que tienen una mayor influencia en las emisiones de la flota vehicular de la ciudad.

## 2 METODOLOGÍA

La metodología utilizada en la estimación del inventario de emisiones por fuentes móviles fue la establecida por los creadores del modelo IVE, la cual ha sido aplicada de manera estandarizada en 11 ciuda-

des del mundo. En esta sección se describe el funcionamiento del modelo y la metodología utilizada.

### 2.1 Descripción del Modelo IVE

Por medio del modelo IVE es posible estimar las emisiones de contaminantes criterio, gases efecto invernadero y otras sustancias tóxicas (NH<sub>3</sub>, benceno, plomo, 1.3 butadieno y acetaldehídos) provenientes de vehículos de pasajeros (particulares y taxis), motocicletas, buses y camiones.

Para la estimación del inventario de emisiones, el modelo requiere información acerca de los siguientes componentes: la tasa de emisión de contaminantes de los vehículos (factores de emisión), el nivel de actividad de los vehículos y la distribución tecnológica de la flota (v.g., uso de aire acondicionado, tipo de combustible utilizado, sistemas de control de emisiones).

El modelo IVE cuenta con la opción de ingresar los factores de emisión propios de cada ciudad. Sin embargo, en caso de que esta información no esté disponible, el modelo utiliza factores de emisión desarrollados a partir del ciclo de conducción del Método de Prueba Federal (FTP) de Estados Unidos para ser luego ajustados a la realidad de las características observadas de la ciudad para la cual se está elaborando el análisis. El proceso de cálculo que realiza el modelo para la corrección de los factores de emisión se presenta en la Ecuación 2.

$$Q_{[t]} = B_{[t]} \cdot K_{1[t]} \cdot K_{2[t]} \cdot K_{3[t]} \cdot K_{4[t]} \cdot K_{5[t]} \cdot K_{6[t]} \quad (2)$$

donde  $Q_{[t]}$  = factor de emisión ajustado para cada categoría;  $B_{[t]}$  = factor de emisión base por tecnología (g/km);  $K_{1[t]}$  = factor de corrección por temperatura;  $K_{2[t]}$  = factor de corrección por humedad;  $K_{3[t]}$  = factor de corrección por mantenimiento y programas de inspección;  $K_{4[t]}$  = factor de corrección por la calidad del combustible;  $K_{5[t]}$  = factor de corrección por altura del lugar;  $K_{6[t]}$  = factor de corrección según los patrones de conducción de cada vehículo (también incluye otros efectos causados por el uso de aire acondicionado y las pendientes de las vías). Los factores de emisión y corrección están definidos en el modelo IVE y son asignados de acuerdo a las características de los vehículos, la meteorología y calidad de los combustibles de cada ciudad.

### 2.2 Descripción de la metodología utilizada

La metodología desarrollada por el proyecto IVE permite recolectar información relacionada con la distribución tecnológica de vehículos de pasajeros

(combustible y tipo de vehículos), la distribución de la flota activa en la ciudad, los patrones de conducción de las diferentes categorías vehiculares y los niveles de actividad vehicular.

Para la estimación de emisiones es necesario recolectar información adicional diferente a la recolectada en la campaña de medición incluyendo el número total de vehículos registrados en la ciudad, la temperatura y humedad relativa, el factor de actividad vehicular (kilómetros promedio recorridos al día por cada categoría de vehículos) y las características y calidad de los combustibles.

Una vez se contó con la información requerida por el modelo se procedió a correr el mismo para estimar el inventario de emisiones de Bogotá. Adicionalmente se corrieron diversos escenarios con el fin de identificar variables pertinentes en la estimación del inventario de emisiones y cuantificar de esta forma los beneficios que tendría la implementación de ciertas medidas enfocadas a la reducción de las emisiones en la ciudad.

A continuación se describe la manera como se llevó a cabo la campaña de medición en la ciudad de Bogotá y los diferentes escenarios evaluados.

### 2.2.1 Descripción de la campaña de medición

La campaña de medición se llevó a cabo en Bogotá del 17 al 28 de Enero del 2005 e involucró la participación de aproximadamente 30 personas durante dos semanas de mediciones. Durante este periodo se desarrollaron las siguientes actividades: 1) Encuestas en parqueaderos de la ciudad. 2) Recolección de información utilizando sistemas de posicionamiento global (GPS por sus siglas en inglés). 3) Aforos (conteos) vehiculares utilizando cámaras de video.

Las encuestas en parqueaderos se realizaron con el fin de obtener la distribución tecnológica de vehículos de pasajeros. En estas encuestas se recolectó información en quince parqueaderos de la ciudad para determinar el modelo, el tipo de combustible, el kilometraje, la presencia de equipos de control de emisiones (convertidor catalítico), entre otras variables.

Las mediciones de posición en tiempo real utilizando unidades GPS se realizaron en vehículos particulares (VP), taxis, motos, camiones y buses. A partir de esta información se determinaron los patrones de conducción para cada categoría de vehículos así como las pendientes en las vías por donde éstas circulan. Para efectuar las mediciones con GPS en VP se seleccionaron tres sectores de la ciudad cada uno representativo de un nivel socio-económico diferente. En cada uno de estos sectores se llevaron a cabo mediciones en tres tipos de vías: vías residen-

ciales, vías arteriales (vías de dos carriles en cada sentido, con semáforos que generalmente comunican las vías residenciales con las vías rápidas) y vías rápidas (vías con pocos o ningún semáforo y con cuatro o más carriles en cada sentido). Los sectores seleccionados fueron el barrio Santa Bibiana al norte de la ciudad, representativo de una zona de alto ingreso, el barrio Teusaquillo en la zona centro, representativo de una zona comercial y el barrio Marsella ubicado al sur de la ciudad representativo de una zona de medio-bajo ingreso. Las vías arteriales seleccionadas fueron: Avenida 19 al norte de la ciudad, Calle 19 en el centro de la ciudad y Avenida 1 de Mayo al sur de la ciudad. Las vías rápidas seleccionadas fueron: Autopista Norte al norte de la ciudad, Calle 26 en el centro de la ciudad y Avenida Boyacá en el sur de la ciudad. Cada uno de los tres VP dotado con un GPS, siguió un cronograma que consistía en recorrer durante seis días, tres en horas de la mañana (7:00-13:00) y tres en horas de la tarde (14:00-21:00), los sectores seleccionados.

Los aforos vehiculares obtenidos mediante el uso de cámaras de video se realizaron filmando el flujo vehicular de las vías recorridas por uno de los VP seleccionado para la actividad con GPS. Esta actividad generó información acerca del número y tipo de vehículos circulando por las calles.

Las mediciones realizadas en este proyecto permitieron recolectar información de la flota dinámica en la ciudad. Este concepto se refiere a la flota de vehículos que está siendo utilizada en la ciudad. Este tipo de mediciones son muy importantes y se diferencian de la información que se puede obtener de una base de datos estática, la cual se limita a la información de vehículos registrados en la ciudad sin tener en cuenta los factores de actividad de los mismos.

### 2.2.2 Descripción de los escenarios analizados

Durante esta parte del proyecto, se estudiaron diferentes escenarios con el fin de realizar un análisis de sensibilidad de las variables más importantes en la determinación del inventario de emisiones de fuentes móviles en Bogotá. Del mismo modo, el estudio de escenarios nos permitió evaluar la eficiencia de algunas medidas que afectarían las características de la flota vehicular de la ciudad.

Los escenarios fueron planteados con base en las necesidades que presenta actualmente la ciudad y en la posibilidad de encontrar estrategias que pueden llegar a ser medidas eficientes para la reducción de los niveles de emisiones vehiculares.

La Figura 1 es una representación esquemática que resumen los 10 escenarios evaluados durante este trabajo. Estos escenarios evaluaron los efectos en

el inventario de emisiones debido al cambio en los combustibles utilizados por diferentes vehículos, a la modificación de las características de las categorías vehiculares y a la renovación de la flota vehicular entre otros.

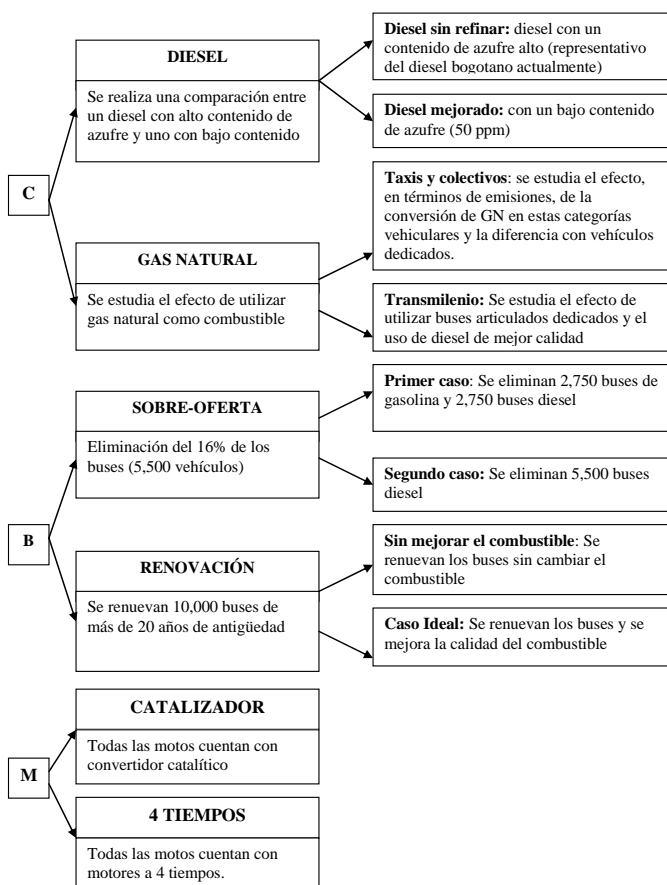


Figura 1. Resumen de los escenarios analizados.

C= escenarios involucrando la calidad de los combustibles; B= escenarios involucrando la categoría vehicular de los buses; M= escenarios involucrando la categoría vehicular de las motos.

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Distribución tecnológica de vehículos de pasajeros

Durante la campaña de campo se recolectó información válida para 1,044 VP y 68 taxis. La Tabla 1 presenta un resumen de esta información. Dentro de los resultados obtenidos, a partir de la base de datos dinámica construida en este estudio, se encontró que alrededor del 53% de los VP en la ciudad cuentan con convertidor catalítico.

La Tabla 1 muestra que el combustible más utilizado en Bogotá sigue siendo la gasolina tanto para VP como para taxis, sin embargo para estos últimos se ve una tendencia reciente hacia la utilización de motores duales (convertidos) de gas natural y gasolina.

Dentro de la información recolectada se encuentra la presencia/ausencia de aire acondicionado. Aunque en términos de emisiones este es un parámetro relativamente importante, en Bogotá no es tan relevante debido a que típicamente no se presentan temperaturas altas que motiven el uso de estos sistemas.

Tabla 1. Distribución tecnológica de vehículos de pasajeros

Categoría	Tipo de combustible *	Sistema de aire acondicionado	Tipo de Transmisión	Convertidor Catalítico (CC)
Vehículos Particulares	98% Gasolina	44% con A/C	90% Mecánicos	47% sin CC
	1% Diesel	56% sin A/C	9% Automáticos	53% con CC
Taxis	81% Gasolina	19% con A/C	100% Mecánicos	28% sin CC
	15% Gas Natural**	80% sin A/C	0% Automáticos	72% con CC

\* Vehículos de pasajeros: 0.3% gas natural y gasolina (motores duales). Taxis: 5.9% diesel. \*\*Se refiere a vehículos con motores duales de gasolina y gas natural. Son vehículos que han sido fabricados para operar con gasolina y luego son convertidos a motores duales. Nota: resultados obtenidos a partir de una base de datos dinámica construida partir de encuestas en diferentes parqueaderos de la ciudad.

Comparando los resultados obtenidos para Bogotá y otras ciudades, se presentó una similitud en la distribución tecnológica de los vehículos de pasajeros (particulares y taxis) entre Bogotá y Lima, en donde se presentan fracciones similares de vehículos sin catalizador y con catalizador de 3 vías como se muestra en la Tabla 2.

La edad media de los VP en Bogotá se estimó en 9 años. Este es un valor alto comparado con otras ciudades Latino-Americanas como Santiago de Chile, Sao Paulo y Ciudad de México donde se encuentra alrededor de los 6 años (Lents et al., 2004). De nuevo se presenta una similitud con la situación en Lima, donde la edad media de la flota vehicular es de 11 años.

En el caso de los taxis, la edad media estimada en Bogotá fue de 5 años. Este resultado coincide con un estudio realizado anteriormente en la ciudad en el cual se determinó que la edad de esta categoría vehicular pasó de 8 años en el 2002 a 6 años en el 2004 (Ibáñez, 2004).

Tabla 2. Comparación de la distribución tecnológica de vehículos de pasajeros en Bogotá con otras ciudades del mundo.

Ciudad	Control de Aire/Combustible		Catalizador		
	Carburador	Inyección Electrónica	Sin	2 vías	3 vías
Almaty, Kazakhstan	45%	51%	89%	0%	7%
Lima, Peru	44%	56%	53%	6%	40%
Los Angeles, USA	6%	94%	1%	3%	96%
Ciudad de México, México	18%	82%	20%	0%	80%
Nairobi, Kenya	60%	32%	100%	0%	0%
Pune, India	42%	32%	29%	35%	11%
Santiago, Chile	17%	80%	17%	3%	77%
Sao Paulo, Brasil	17%	83%	19%	0%	81%
<b>Bogotá, Colombia</b>	<b>36%</b>	<b>64%</b>	<b>46%</b>	<b>3%*</b>	<b>50%</b>

Fuente: Lents, 2004. Estudio de la actividad vehicular en Sao Paulo.

\* Este número se obtuvo al hacer una clasificación de los vehículos que estaban equipados con convertidor catalítico pero que no contaban con inyección electrónica.

### 3.2 Factor de actividad para los vehículos de pasajeros

A la fecha no hay información oficial acerca del kilometraje típico recorrido por los vehículos que hacen parte de la flota bogotana, información fundamental en el cálculo de emisiones (ver Ecuación 1).

Las encuestas realizadas en los diferentes parqueaderos permitieron recolectar información de kilometraje para 540 vehículos, según los cuales el kilometraje recorrido por un vehículo es de aproximadamente 17,000 km por año con una tasa de reducción anual de alrededor del 2%

En algunos estudios de movilidad en la ciudad, la Secretaría de Tránsito de Bogotá (STT), utiliza valores entre 15,000 y 18,000 kilómetros al año para vehículos de pasajeros. Otros estudios realizados en la Universidad de Los Andes, reportan tasas de actividad de 18,000 km para el primer año con una tasa de reducción anual de 2.8% (Behrentz, 2004).

Los resultados obtenidos en otras ciudades donde se ha implementado el modelo IVE presentan tendencias similares a las obtenidos en Bogotá.

Para la categoría taxis se estimó un factor de actividad de 58,000 km por año con una tasa de reducción anual de 4.1%.

### 3.3 Aforos vehiculares utilizando cámaras de video

Se recolectó información para 800 minutos (13.3 horas) de filmación durante seis días hábiles en diferentes zonas de la ciudad. La información se analizó

para toda la ciudad, para los diferentes sectores socio-económicos estudiados (alto ingreso, medio-bajo ingreso y comercial) y adicionalmente se realizó una comparación de los resultados obtenidos en Bogotá con los resultados para otras ciudades.

#### 3.3.1 Ocupación relativa de las vías en Bogotá

Los aforos vehiculares en las vías mencionadas anteriormente (sección 2.2.1), permitieron estimar la participación relativa de las diferentes categorías vehiculares en la ciudad. En las Figuras 2a y 2b, se presenta el comportamiento, en términos de ocupación relativa y número de vehículos en las vías, de las diferentes categorías vehiculares para cada hora entre las 6:00 y las 21:00 horas.

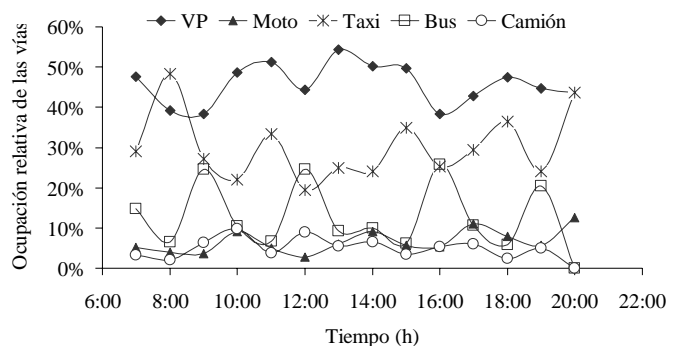


Figura 2a. Contribución de diferentes categorías al total de vehículos en las vías de Bogotá.

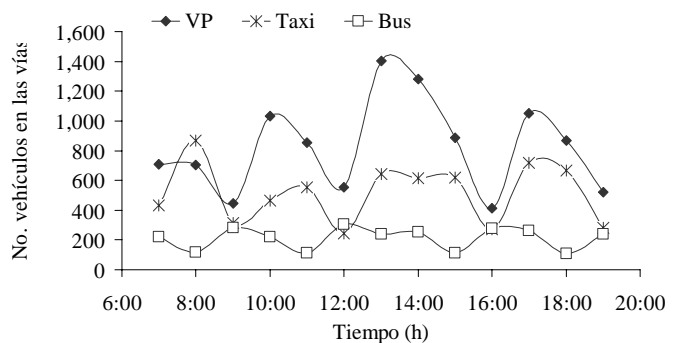


Figura 2b. Aforos de las principales categorías vehiculares durante el día en diferentes sectores de la ciudad.

Es claro que la categoría vehicular que se encuentra en un mayor porcentaje en la ciudad es la de VP lo cual concuerda con la información disponible en el registro oficial de vehículos de la ciudad, en donde esta categoría representa alrededor del 85% del total de vehículos.

Los taxis representan una participación importante de ocupación en las vías. Como se puede observar en la Figura 2a, estos vehículos representan desde un 20% hasta un 50% de los vehículos en las calles en las diferentes horas del día. Este es un resultado interesante si se tiene en cuenta que para esta categoría tan solo se encuentran registrados 50,000 vehículos, lo que corresponde a alrededor del 5% del total de la flota de la ciudad (el número total de vehículos en la ciudad es de aproximadamente 950,000 vehículos).

Las horas en las que se registró un mayor número de vehículos para la categoría de VP como se muestra en la Figura 2b, fueron las 8:00, las 10:00, entre las 13:00 y las 14:00, y las 17:00 horas. Son resultados coherentes con las actividades típicas de la población en un día laboral. El pico de las 10:00 horas se puede explicar debido al efecto de la medida de restricción vehicular en la ciudad que no permite la circulación de ciertos vehículos entre las 6:00 y las 9:00.

### 3.3.2 Ocupación relativa de las vías en Bogotá dependiendo del sector socio-económico

Otra variable importante para la determinación del inventario de emisiones, es el sector socio-económico. La Figura 3 resume los resultados obtenidos para los tres tipos de sectores analizados en horas de la mañana y en horas de la tarde.

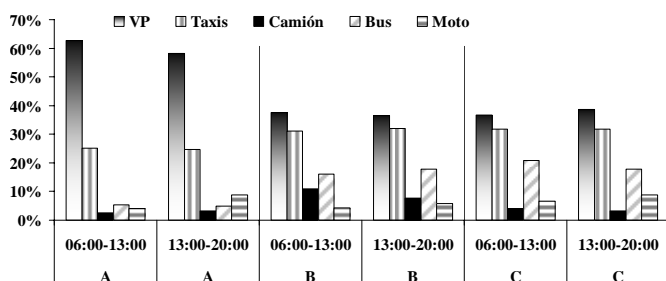


Figura 3. Distribución de la flota vehicular en diferentes sectores socio-económicos de la ciudad en horas de la mañana y de la tarde. A = Sector de alto ingreso; B = Sector de medio-bajo ingreso; C = Sector comercial

Los resultados obtenidos demuestran que los vehículos de mayor participación en los tres sectores socio-económicos analizados son los vehículos de pasajeros (particulares y taxis). Los buses y camiones presentan una mayor participación en sectores de medio-bajo ingreso y comercial, que en sectores de alto ingreso. Los resultados presentados en la Figura 3 también muestran que no se presentan diferencias

significativas entre las horas de la mañana y las de la tarde para todas las categorías analizadas a excepción de la categoría motos. En horas de la tarde en los tres sectores analizados, se presentan porcentajes mayores de motos. Este resultado puede ser debido a la tendencia que existe en diversas entidades a recolectar la correspondencia en horas de la tarde.

### 3.3.3 Comparación de los resultados bogotanos con otras ciudades

Se realizó una comparación de los resultados obtenidos en Bogotá con otras ciudades donde se ha realizado el proyecto IVE. La Tabla 3 presenta información correspondiente a 8 ciudades incluida Bogotá.

Tabla 3. Comparación del porcentaje de categorías vehiculares en diferentes ciudades del mundo.

Ciudad	VP	Moto	Taxis	Bus	Camión	No-Motorizado
Almaty, Kazakhstan	83%	0%	0%	12%	5%	1%
Lima, Peru	52%	1%	3%	18%	6%	0%
Los Angeles, USA	95%	0%	0%	1%	4%	0%
México City, México	74%	2%	15%	3%	5%	0%
Nairobi, Kenya	88%	2%	1%	4%	5%	1%
Pune, India	12%	55%	0%	1%	1%	17%
Santiago, Chile	79%	1%	8%	6%	6%	0%
Sao Paulo, Brasil	75%	10%	5%	5%	5%	0%
<b>Bogotá, Colombia</b>	<b>46%</b>	<b>6%</b>	<b>29%</b>	<b>13%</b>	<b>6%</b>	<b>0%</b>

Fuente: Lents, 2004. Estudio de la actividad vehicular en Sao Paulo

No-motorizados: medios de transporte que no cuentan con motor (vg., bicicletas, patinetas, caballos). VP = vehículo particular.

Dentro de las ciudades estudiadas por el proyecto IVE, Bogotá presenta el mayor número de taxis en las vías. En este punto es importante aclarar nuevamente que la información recolectada durante la campaña de medición se refiere a información dinámica, lo que está teniendo en cuenta no sólo el número de vehículos sino el factor de actividad. Por esta razón el valor registrado para el porcentaje de taxis en las vías está representando que esta categoría de vehículos tiene un factor de actividad bastante alto comparado con otras categorías.

El número de taxis observados en las vías de Bogotá es un valor muy superior al de las otras ciudades donde se ha realizado el estudio IVE. Sin embargo, es necesario considerar que no todas las ciudades cuentan con un sistema de transporte público individual tan organizado como en Bogotá, en

donde la identificación de los taxis es sencilla dado su color y letrero representativo. En otras ciudades el más difícil proceso de identificación puede haber causado errores durante los aforos de los vehículos.

Por otro lado, el elevado número de taxis en la ciudad, podría estar explicado por resultados de estudios previos (Ibáñez, 2004), en donde se determinó que en Bogotá existe una sobre-oferta de taxis (entre 45% y 55%). El valor recomendado a nivel mundial es de 3 taxis por cada 1,000 habitantes, mientras en Bogotá este número es de 5.2 taxis por cada 1,000 habitantes (Ibáñez, 2004).

### 3.4 Patrones de conducción

La información recolectada utilizando unidades GPS y siguiendo la metodología mencionada con anterioridad (sección 2.2.1) nos permitió recolectar información necesaria para la determinación de los patrones de conducción de cada categoría vehicular. A continuación se presentan los resultados obtenidos para la categoría de VP.

#### 3.4.1 Patrones de conducción de vehículos particulares

La información recolectada para VP demuestra la importancia del tipo de vía en los patrones de conducción. En las figuras 4a y 4b se presenta un ejemplo del comportamiento de la velocidad en función del tiempo en tres tipos de vías diferentes en un sector socio-económico de nivel de ingreso alto. Estos datos corresponden a un recorrido de treinta minutos (7:00 am a 7:30 am) realizado durante tres días (cada día se recorrió un tipo de vía diferente a la misma hora del día anterior). Las velocidades promedio durante este periodo para los tres tipos de vía fueron: 44 kph, 20 kph y 22 kph, respectivamente para vía rápida, arterial y residencial.

Aunque las velocidades promedio en la vía arterial y la residencial son similares, en la Figura 4b se pudo observar que el patrón de conducción es diferente. Mientras en la vía residencial no se presentan numerosos cambios dramáticos de velocidad ni numerosos momentos de detención, en la vía arterial estas situaciones son las más típicas. Estos cambios constantes de aceleración están relacionados con la presencia de cruces y semáforos en las vías de tipo arterial. Del mismo modo, dadas las condiciones de infraestructura, las vías arteriales permiten alcanzar mayores velocidades máximas. La Tabla 4 presenta

las velocidades promedio para diferentes segmentos horarios en cada una de las vías recorridas durante la campaña de medición.

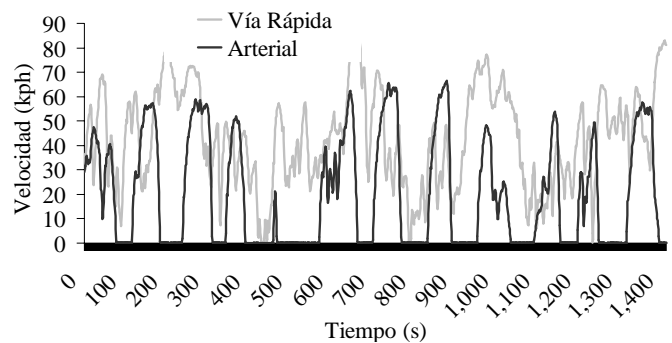


Figura 4a. Comparación de los patrones de conducción para dos tipos de vías en un sector de nivel socio-económico alto.

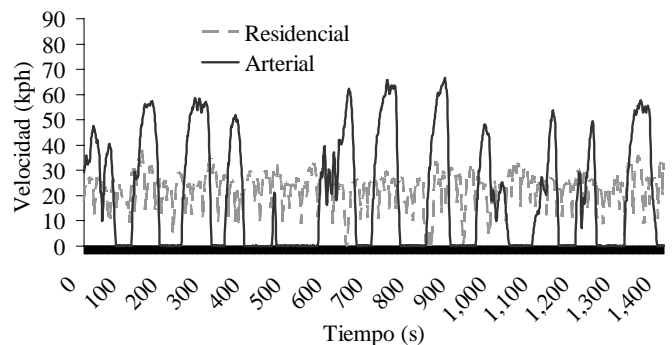


Figura 4b. Comparación de los patrones de conducción para dos tipos de vías en un sector de nivel socio-económico alto.

Tabla 4. Velocidades promedio durante el día para vehículos particulares en tres tipos de vías.

Hora	Vía rápida (kph)	Arterial (kph)	Residencial (kph)
5:30-7:30	41	26	19
7:30-9:30	41	26	19
9:30-11:30	34	25	18
11:30-13:30	34	16	22
13:30-15:30	37	22	23
15:30-17:30	32	23	22
17:30-19:30	37	21	19
19:30-21:00	30	19	20

Aunque conocer la velocidad promedio es un aspecto importante al momento de determinar el factor de emisión, este parámetro no es el mejor indicador de la demanda de potencia en el vehículo. Acelerar el vehículo consume energía considerablemente en un proceso en el que se pueden presentar niveles eleva-

dos de emisiones de distintas especies contaminantes. Los niveles de aceleración no se pueden determinar a partir de la velocidad promedio. Por esta razón, los cálculos en la metodología IVE están basados en una clasificación de la información en la que se presentan diversas categorías que representan diferentes condiciones de estrés y demanda de potencia del vehículo (Lents et al., 2004).

### 3.5 Resultados de emisiones de fuentes móviles para Bogotá según el modelo IVE

El inventario desarrollado durante este estudio contiene información sobre diferentes contaminantes y sobre el aporte de cada categoría vehicular (VP, Taxi, Moto, Bus y Camión) a las emisiones totales en la ciudad. La Tabla 5 resume los resultados obtenidos para los contaminantes considerados en este proyecto, y la Figura 5 presenta el aporte de las diferentes categorías vehiculares a las emisiones totales.

Tabla 5. Emisiones totales de diversos contaminantes provenientes de fuentes móviles en la ciudad de Bogotá.

	km d <sup>-1</sup>	CO	COV	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	PM <sub>10</sub>	B	A	F	CO <sub>2</sub>
VP	20,000,000	1,000	70	40	1	0.20	0.1	0.2	0	5,600
Motos	2,300,000	90	45	0	0	1	0.1	0.7	3	65
Taxi	13,000,000	270	25	20	1	0.3	0.05	0.1	0	3,500
Bus	4,000,000	700	35	60	3	3	0.1	0.3	1	3,200
Camión	1,400,000	500	30	30	1	1	0.1	0.2	1	1,650
Total	40,000,000	2,500	200	150	7	6	0.5	1.5	5	14,000

Las unidades utilizadas son Ton día<sup>-1</sup>. VP= vehículos particulares; B = butadieno; A = acetaldehído; F = formaldehído. Nota= totales pueden no coincidir por causa de la reducción de cifras significativas.

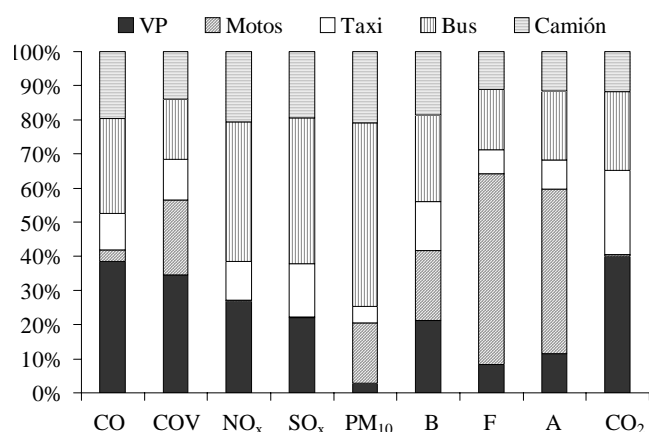


Figura 5. Aporte de las principales categorías vehiculares a las emisiones totales de diversos contaminantes atmosféricos en la ciudad de Bogotá. VP= vehículos particulares; B = butadieno; A = acetaldehído; F = formaldehído.

La categoría de VP tiene una participación importante en las emisiones de contaminantes tales como CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> y COV. El aporte de esta categoría al inventario total de emisiones de la flota vehicular Bogotana fue de alrededor del 40% para CO, 40% para CO<sub>2</sub>, 35% para COV, 30% para NO<sub>x</sub> y 20% para SO<sub>x</sub>. Estos resultados eran esperados al considerar que esta categoría representa alrededor del 85% de los vehículos en la ciudad y que el combustible de mayor uso para estos vehículos es la gasolina.

La categoría vehicular que presentó los resultados más críticos, con respecto a su aporte a las emisiones totales en la ciudad, fue la de los buses. Esta categoría es responsable de un alto porcentaje de la mayoría de contaminantes: alrededor de 30% de las emisiones de CO, 40% de las emisiones de NO<sub>x</sub>, 40% de las emisiones de SO<sub>x</sub>, 50% de las emisiones PM<sub>10</sub> y 20% de las emisiones de CO<sub>2</sub>. Estos aportes son aún más importantes si se tiene en cuenta que los buses representan menos del 5% de la flota vehicular en la ciudad.

La gran participación de esta categoría en las emisiones de CO (30%) es el reflejo de la presencia de un número importante de buses que utilizan gasolina como combustible. Es común en muchos países que la mayoría de vehículos en esta categoría utilice diesel como combustible (Sawyer et al., 2000; Gertler, 2005).

Es de vital importancia reconocer la participación que los buses tienen en las emisiones totales de PM<sub>10</sub> en la ciudad, representando la mitad del total de emisiones. El PM<sub>10</sub> es ampliamente reconocido como uno de los contaminantes más importantes en términos de salud pública (Neuberger et al., 2004; Kan et al., 2004).

Sin embargo, es fundamental aclarar que el problema real está relacionado con la calidad de los combustibles diesel disponibles en la ciudad. El diesel bogotano cuenta con un contenido de azufre de 1500 ppm, que aún siendo el contenido de azufre más bajo del país (en el resto del territorio nacional es de 4500 ppm) es un contenido demasiado alto comparado con otras ciudades como Santiago de Chile, en donde el diesel contiene tan solo 50 ppm de azufre. Estudios reportados en la literatura científica (v.g Durbin et al., 2003; Saiyasitpanich et al., 2005) han encontrado una relación directa entre el contenido de azufre en el diesel y las emisiones de PM<sub>10</sub>, lo que demuestra la importancia de mejorar la calidad del diesel en Bogotá y el resto del país.

Otro resultado interesante se presenta en el caso de la categoría de las motos, las cuales de acuerdo a

nuestros resultados, son responsables de alrededor del 18% de las emisiones de  $PM_{10}$  y 20% de las emisiones de COV. Esta categoría vehicular no está sujeta actualmente a ninguna reglamentación en el país en relación con sus emisiones de agentes contaminantes, a pesar de que los aportes al inventario de emisiones para contaminantes como el material particulado son similares a aquellos relacionados con la categoría de los camiones. De esta manera, los factores más relevantes para el inventario de emisiones en la ciudad están relacionados con la calidad de los combustibles y el gran número de motos con motores de dos tiempos y sin sistemas de control de emisiones.

### 3.6 *Inventario de emisiones de fuentes móviles para Bogotá bajo diferentes escenarios*

Como se mencionó anteriormente, el modelo IVE fue utilizado como herramienta de cálculo, no solo para la determinación del inventario actual de emisiones sino para un ejercicio de análisis de sensibilidad de los factores que intervienen en este inventario. El objetivo de este ejercicio fue el de evaluar posibles estrategias encaminadas a una reducción de las emisiones en la ciudad. En la Figura 1 se presenta un esquema donde se resumen los escenarios evaluados en esta sección.

#### 3.6.1 *Escenarios mejorando la calidad del diesel*

Los combustibles más utilizados en Bogotá son la gasolina y el diesel. Como se mencionó anteriormente, en el caso de vehículos de pasajeros más del 90 % de los vehículos tienen motores que operan con gasolina. Para vehículos de carga, refiriéndose a las categorías vehiculares de buses y camiones, se presenta una distribución más uniforme de vehículos operando con gasolina y con diesel. De estos vehículos, aproximadamente 45% son de gasolina y 55% de diesel (buses matriculados en Bogotá STT, 2004; camiones registrados en la base de datos de los centros de diagnóstico autorizados por el DAMA, 2004). Es importante mencionar que en los últimos años, debido a una serie de incentivos establecidos por las autoridades de tránsito y transporte, se ha presentado una tendencia a la conversión de vehículos pesados de gasolina para que operen con combustible diesel. Estas medidas muy seguramente generarán que en el mediano-corto plazo el porcentaje de vehículos de carga que utilizan gasolina disminuirá de manera significativa.

El escenario de mejoramiento de combustibles tiene como objetivo evaluar el efecto en las emisiones de contaminantes en Bogotá relacionado con un cambio en la calidad del combustible diesel.

La Figura 6 resume los resultados encontrados para las emisiones de contaminantes criterio en la situación actual (e.d., utilizando un diesel con un alto contenido de azufre) así como para el escenario en el que se supuso la utilización de un combustible diesel con un bajo contenido de azufre. Para evaluar este escenario, se seleccionó la opción “Biodiesel 100%” al interior del modelo IVE ya que la versión actual de este modelo aun no permite reducir los niveles de azufre de los combustibles diesel al momento de efectuar los cálculos de las emisiones.

Los resultados en la Figura 6 muestran una reducción en las emisiones de  $PM_{10}$  de 45% y de 65% en las emisiones de  $SO_x$  utilizando un diesel con un bajo contenido de azufre. Este resultado es consistente con estudios previos (v.g., Crookes et al., 1996) que demuestran la reducción de material particulado al utilizar un combustible con un bajo contenido de azufre como el biodiesel.

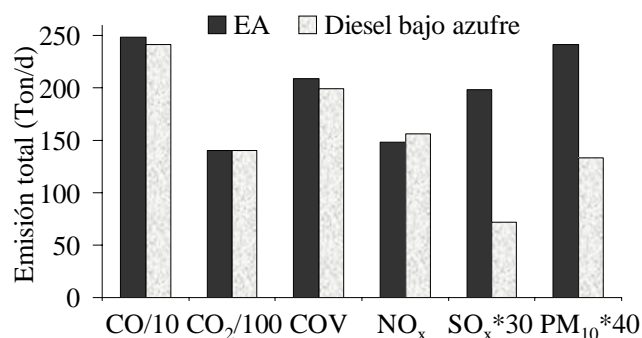


Figura 6. Estimación de las emisiones totales en la ciudad de Bogotá utilizando diferentes calidades de diesel.

Basados en estos resultados, se podría afirmar que un mejoramiento de los combustibles que se vienen utilizando en la ciudad podría generar un beneficio ambiental muy importante en términos de las emisiones de  $PM_{10}$ .

Sin embargo, es necesario realizar estudios más profundos acerca de este tema, ya que la gran mayoría de las medidas de protección ambiental representan ventajas y desventajas. Un ejemplo de esto es el caso del biodiesel, el cual aunque reduce las emisiones de  $PM_{10}$ , aumenta las emisiones de  $NO_x$  en 5%, una sustancia promotora del fenómeno de smog fotoquímico. Por esta razón, la determinación de cam-

biar un combustible por otro, debe estar acompañada de diversos estudios que evalúen las necesidades de la población y los beneficios relativos de los diferentes combustibles.

### 3.6.2 Escenarios considerando eliminación de la sobreoferta actual de buses

Estudios realizados en la ciudad de Bogotá han estimado que actualmente se presenta una sobreoferta del transporte público colectivo (buses) que oscila entre el 11% y el 22% (Ibáñez, 2004).

En esta parte del estudio, el modelo IVE fue utilizado para cuantificar el efecto que produciría la eliminación de una sobreoferta de buses de modelos antiguos (con edades mayores a 20 años) del 16% (punto medio entre 11% y 22%), equivalente a aproximadamente 5,500 vehículos.

De acuerdo a lo esperado, la reducción en el número de buses (equivalente a una sobreoferta de 16%) generó una disminución importante en las emisiones estimadas por el modelo (Figura 7). Las reducciones más significativas se presentaron para las emisiones de  $PM_{10}$ , con un porcentaje de reducción del 15%, seguida por una reducción de alrededor del 10% para las emisiones de CO,  $NO_x$  y  $SO_x$ . Estos resultados son aún más interesantes al considerar que los 5,500 buses eliminados durante los cálculos, equivalen a menos del 1% de la flota vehicular Bogotana.

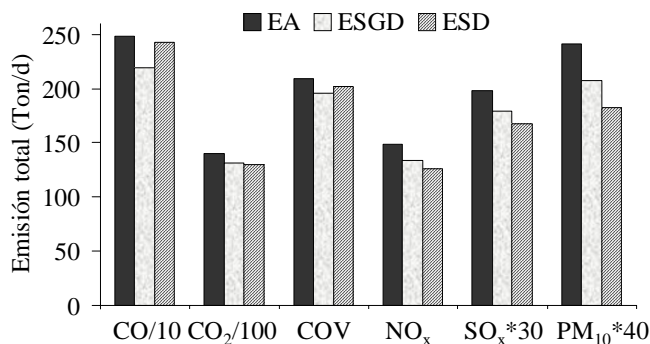


Figura 7. Estimación de las emisiones totales para los casos de sobreoferta y sin sobreoferta de buses de gasolina y diesel en la ciudad.

EA = estado actual; ESGD = eliminación de sobreoferta de 16% de buses (gasolina y diesel); ESD = eliminación de sobreoferta de 16% de buses diesel.

Una medida como la presentada en el escenario ESGD de la Figura 7, en el cual se consideró una reducción del 16% de la flota de buses utilizando diesel y gasolina estaría encaminada al mejoramiento

de las condiciones ambientales en la ciudad, pero no estaría enfocada hacia el problema principal que se presenta actualmente en Bogotá, los altos niveles de emisiones de material particulado. Por esta razón, el escenario ideal sería una eliminación de la sobreoferta de buses que operen con combustible diesel (ver escenario ESD en la Figura 7).

La reducción en las emisiones de  $PM_{10}$  en el caso de una eliminación de 5,500 buses operando con diesel es de 25% comparada con 15% al eliminar buses diesel y a gasolina en partes iguales. Esta reducción es bastante considerable ya que se estarían reduciendo las emisiones en un valor equivalente al aporte actual de todos los camiones y todos los vehículos de pasajeros.

Aunque en este escenario la sobreoferta sólo reduce la cantidad de vehículos diesel, se logran reducciones en las emisiones de todos los contaminantes criterio. Por esta razón, una recomendación plausible para las autoridades ambientales y de tránsito sería una chatarrización selectiva enfocada a los buses que operen con motores diesel.

### 3.6.3 Escenarios renovando parte de la flota de buses incluyendo mejoramiento de la calidad del diesel

El total de buses de tamaño mediano y grande en la ciudad (las categorías seleccionadas para este escenario) es de aproximadamente 22,000 vehículos, para los cuales cerca de 10,000 son de modelos menores o iguales a 1985 (20 años de antigüedad). Los vehículos de modelos antiguos además de no contar con equipos de control de emisiones, suelen presentar una degeneración en distintas partes del motor y del sistema de alimentación de combustibles que los hacen propensos a presentar mayores factores de emisión (e.d., cantidad de contaminante emitido por unidad de distancia recorrida). El modelo IVE fue utilizado para estimar las emisiones resultantes al renovar 10,000 buses de años modelo menores e iguales a 1985 por buses nuevos de mejor tecnología y que cuentan con sistemas de control de emisiones. Adicionalmente, se evaluó el efecto que tendría llevar a cabo una renovación de este tipo en conjunto con un mejoramiento de la calidad del combustible. La Figura 8 presenta los resultados obtenidos para estos escenarios.

La medida de renovación de buses sin mejorar la calidad del diesel es una medida que presenta, según nuestros resultados, una reducción relativamente significativa para las emisiones de  $PM_{10}$  (6%), CO (17%), COV (8%) y  $NO_x$  (13%). Generalmente, el objetivo de llevar a cabo una renovación de vehículos es mejorar y actualizar las diferentes tecnologías

de control de emisiones además de utilizar motores más eficientes. Sin embargo, las nuevas tecnologías requieren de ciertas condiciones necesarias para funcionar adecuadamente. Una de ellas es la mejora en la calidad de los combustibles. Por esta razón la mejora de los combustibles debe ir de la mano con la actualización de los diferentes motores y tecnologías de equipos de control de emisiones.

Los resultados obtenidos al renovar la flota y mejorar la calidad del combustible (ver escenario RCMC en la Figura 8) confirman lo expuesto en el párrafo anterior. La reducción en las emisiones de  $PM_{10}$  en este caso es de 47% comparada con 6% al renovar la flota sin mejorar la calidad del combustible y la reducción en las emisiones de  $SO_x$  es de 58% siendo nula en el escenario de renovación sin mejora de los combustibles.

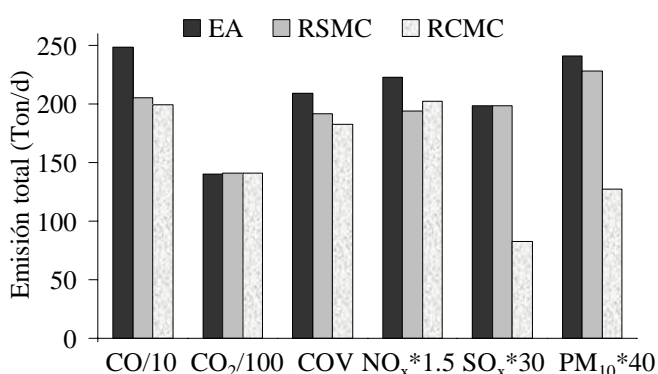


Figura 8. Estimación de las emisiones totales para la ciudad de Bogotá en el escenario de renovación de buses incluyendo mejoramiento en la calidad del diesel.

EA = estado actual; RSMC = renovación sin mejoramiento de combustible (diesel sin refinar con un alto contenido de azufre); RCMC = renovación con mejoramiento de combustible (Diesel con bajo contenido de azufre como el biodiesel).

### 3.6.4 Escenario sobre el requerimiento de catalizador para todas las motos de la ciudad y caso hipotético de motos a 4 tiempos.

Como se mencionó anteriormente, la categoría motos es responsable de alrededor del 20% de las emisiones totales de  $PM_{10}$  y COV. Adicionalmente las motos son responsables de alrededor del 50% de las emisiones totales en la ciudad de acetaldehído y formaldehído. Esta situación se presenta, entre otras razones, debido al gran número de motos con motores de dos tiempos.

Este escenario se enfocó en estudiar cuáles serían los resultados de aplicar alguna normatividad que obligue a todas las motos de la ciudad a contar con

un convertidor catalítico y a estudiar cuales serían los resultados en el caso hipotético en el que todas las motos contaran con motores de 4 tiempos.

Los resultados obtenidos (ver escenario catalizador en la Figura 9) demuestran la efectividad de contar con convertidores catalíticos en todas las motos en donde se lograría una reducción importante en contaminantes criterio como el  $PM_{10}$  (10%) y los COV (15%). Adicionalmente, la reducción en emisiones de compuestos tóxicos, de los cuales hasta el momento en la ciudad se tiene poco conocimiento, como lo son el acetaldehído y el formaldehído, fue significativa. La medida de implementar el uso de convertidor catalítico para las motos en la ciudad podría llegar a reducir en aproximadamente 40% las emisiones de formaldehído y en 30% las de acetaldehído. Estos compuestos son de gran importancia en términos de calidad del aire ya que, además de ser especies altamente tóxicas, en conjunto con los  $NO_x$  son contribuyentes importantes a la formación de ozono troposférico, causante del conocido smog fotoquímico.

Las reducciones obtenidas por el eventual uso de catalizadores en las motos de la ciudad, toman aún más importancia si se tiene en cuenta que estos vehículos representan menos del 4% de la flota Bogotana.

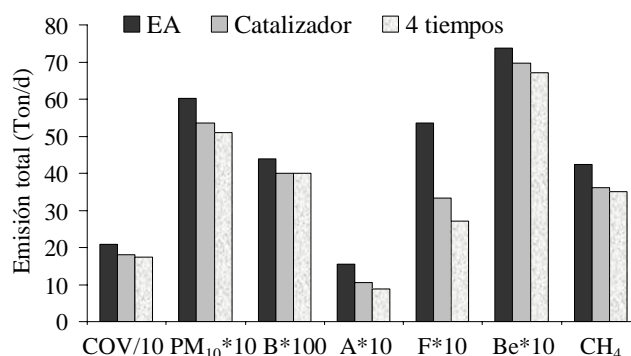


Figura 9. Estimación de las emisiones totales para la ciudad de Bogotá en los escenarios de motos con catalizadores y motos a 4 tiempos.

EA= estado actual (motos sin catalizador); Catalizador = caso en el que todas las motos cuentan con convertidor catalítico; 4 tiempos= caso hipotético en el que todas las motos cuentan con motores de 4 tiempos; B = butadieno; A = acetaldehído; F = formaldehído; Be= benceno

Los resultados obtenidos en el caso hipotético en el que todas las motos fueran de 4 tiempos (ver escenario 4 tiempos en la Figura 9), muestran una reducción de las emisiones ligeramente mayor a la obtenida con el uso de catalizador en estos vehículos. Las

emisiones de  $PM_{10}$  se reducen en un 15% comparado con 10% al utilizar catalizador. La mayor diferencia se presentó en la reducción de las emisiones de formaldehído con un porcentaje de reducción de 50% comparado con 40% en el caso de que todas las motos contarán con catalizador.

### 3.6.5 Escenario del cambio de taxis y colectivos a gas natural: comparación vehículos duales y vehículos dedicados de gas natural

En los últimos años, en Bogotá y el resto del país, se ha venido presentando una tendencia entre vehículos de las categorías taxis y colectivos (buses pequeños con una capacidad aproximada de 15 pasajeros), en la que estos vehículos se han modificado para operar con motores duales que le permiten al motor utilizar gasolina o gas natural.

En este escenario se evaluó la diferencia que se presenta, en términos del inventario de emisiones de fuentes móviles, cuando se utiliza gas natural como combustible en vehículos diseñados desde la fábrica para operar con este combustible (vehículos dedicados) y en vehículos que inicialmente eran de gasolina y son convertidos en vehículos duales con la capacidad de operar usando gas natural o gasolina.

Se evaluaron dos escenarios: el primero realiza la estimación de emisiones teniendo en cuenta que todos los taxis y colectivos utilizan gas natural como combustibles en motores duales. El segundo es suponiendo que se cambiaran todos los motores a motores diseñados para operar con gas natural (dedicados). Estos escenarios se comparan con la situación hipotética en la que todos los taxis y colectivos operan con gasolina. Para los tres casos (gasolina, dual y dedicado) se supone que los vehículos no tienen ningún sistema de control de emisiones. Las figuras 10 y 11 resumen los resultados de este ejercicio.

En el caso de las emisiones de CO, provenientes de las categorías de taxi y colectivo, los motores duales no presentan ningún beneficio en término de reducción de emisiones de este contaminante, más aún las emisiones se incrementan aproximadamente en un 10% (ver escenario dual en la Figura 10). Este resultado contrasta con el caso de motores originales de gas natural donde se presenta una reducción de las emisiones de CO, provenientes de taxis y colectivos, de alrededor del 25% (ver escenario gas natural en la Figura 10). Es un resultado esperado debido a que los motores duales al no encontrarse diseñados para operar con gas natural, realizan un proceso de combustión que no necesariamente es el más eficiente.

Los resultados obtenidos para las emisiones de COV,  $SO_x$  y benceno, generadas por los taxis y co-

lectivos, presentaron una reducción importante y similar para los motores duales y los motores dedicados (20% COV, 15%  $SO_x$ , 35% benceno).

Las emisiones de  $NO_x$ , y  $PM_{10}$  no son disminuidas al suponer que todos los vehículos son duales. Los motores fabricados para operar con gas natural presentarían una reducción de las emisiones de taxis y colectivos de aproximadamente 90% para  $PM_{10}$  (el contaminante más importante) y 20% para  $NO_x$ .

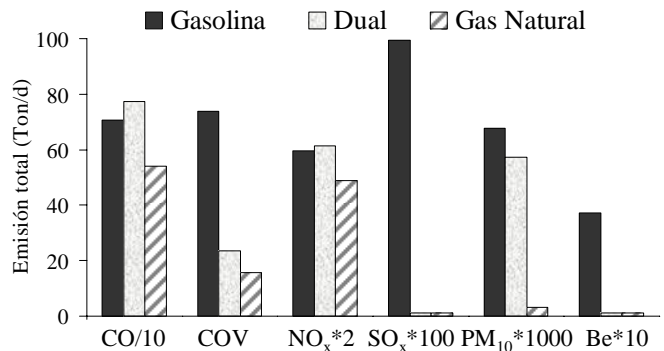


Figura 10. Estimación de las emisiones para las categorías de taxi y colectivo operando con gasolina, gas natural y motores duales.

Gasolina = se supone que todos los taxis y colectivos operan con gasolina; Be = Benceno; Para los tres escenarios se supone que los vehículos no tienen ningún sistema de control de emisiones.

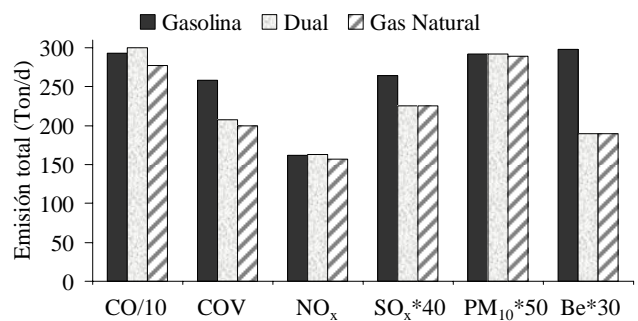


Figura 11. Estimación de las emisiones totales para la ciudad de Bogotá en los escenarios con taxis y colectivos operando con gasolina, gas natural y motores duales.

Gasolina = se supone que todos los taxis y colectivos operan con gasolina; Be = Benceno; Para los tres escenarios se supone que los vehículos no tienen ningún sistema de control de emisiones.

Si se tienen en cuenta los aportes de la categoría de taxi y colectivo al total de las emisiones (ver Figura 11) se puede apreciar que el uso de gas natural, bien sea en vehículos duales o en motores dedicados, no presenta una disminución importante en las emisio-

nes de los contaminantes más relevantes para la ciudad, debido a que los taxis y colectivos son vehículos livianos que no son verdaderamente importantes para el inventario de emisiones en la ciudad (ver Figura 5). Por lo tanto convertir los taxis y colectivos a gas natural traería, probablemente, un beneficio económico para los propietarios de estos vehículos pero no representaría un beneficio en términos ambientales.

### 3.6.6 Escenario considerando el cambio de combustible de Transmilenio de diesel a gas natural

Desde el año 2001, en la ciudad de Bogotá viene operando el sistema de transporte masivo Transmilenio (TM), para el cual ha sido propuesto el cambio de combustible para los buses articulados que componen el sistema. Actualmente todos los buses excepto por un prototipo experimental, operan con combustible diesel y se ha considerado la posibilidad de reemplazar parte de esta flota por vehículos dedicados a gas.

El escenario discutido en esta sección está enfocado en cuantificar el efecto en el inventario de emisiones de  $PM_{10}$  de la ciudad que tendría el mejoramiento del combustible diesel en la ciudad y el cambio de combustible diesel a gas natural en los buses articulados que hacen parte del sistema TM.

La Figura 12 resume los resultados obtenidos para este escenario. Durante este ejercicio se supone que los buses articulados del sistema TM operan actualmente como buses sin ningún sistema de control de emisiones. Esta suposición fue basada en el fenómeno de envenenamiento por azufre (Matsumoto et al., 2000; Neyestanaki et al., 2004) relacionado con la mala calidad de nuestros combustibles que no permite sacar provecho de los avanzados sistemas de control de emisiones que eran funcionales cuando estos vehículos estaban nuevos. De esta manera, el escenario aquí propuesto representa un enfoque conservador y posiblemente sobreestima las emisiones de los buses que hacen parte de TM.

En este escenario, se realizó una comparación suponiendo una mejora en el combustible diesel con alto contenido de azufre a un diesel con un bajo contenido de azufre y suponiendo que los buses articulados cuentan con inyección electrónica y filtro de control de partículas (el cual es posible incorporar gracias a la reducción del contenido de azufre en el diesel). La segunda comparación se realizó suponiendo un cambio de los buses articulados por buses fabricados para operar con gas natural (dedicados), equipados con sistemas de alimentación de combus-

tible tipo inyección electrónica y catalizadores de 3 vías.

Nuestros resultados muestran una reducción importante en la mayoría de contaminantes criterio relacionados con el diesel ( $PM_{10}$ ,  $NO_x$  y  $SO_x$ ), tanto en el caso de mejora en la calidad del diesel como en el caso de uso de gas natural en buses con motores dedicados. La disminución en las emisiones de contaminantes como el  $PM_{10}$  y el  $SO_x$  es muy similar para buses articulados que utilizan un diesel de buena calidad y que cuentan con filtro de partículas, al compararlas con los buses articulados utilizando gas natural y catalizador de 3 vías. La reducción en las emisiones de  $PM_{10}$  para buses articulados que utilizan un diesel de buena calidad y que cuentan con equipos de control de emisiones es de alrededor del 95% comparado con 99% para buses articulados utilizando gas natural y catalizador de 3 vías. Las reducciones en las emisiones de  $SO_x$  son de 90% y 99% para buses articulados que utilizan un diesel de buena calidad y que cuentan con filtro de partículas y para buses articulados utilizando gas natural y catalizador de 3 vías, respectivamente.

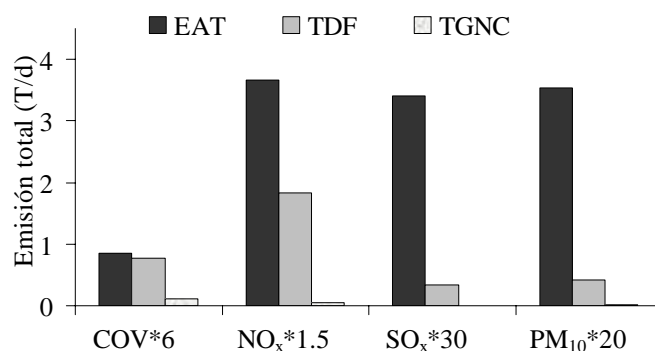


Figura 12 Estimación de las emisiones para Transmilenio en la ciudad de Bogotá utilizando diesel y gas natural como combustible.

EAT = estado actual de Transmilenio, equivalente a buses articulados con motores de diesel con alto contenido de azufre y sin equipos de control de emisiones; TDF = buses operando con un diesel con bajo contenido de azufre y con filtro de partículas. TGNC = buses operando con gas natural y con catalizador. Nota: ver Tabla 6 para una comparación de estas emisiones con respecto al total de la flota vehicular bogotana.

Sin embargo, es necesario contextualizar el caso de TM en términos de su contribución al inventario de emisiones para toda la ciudad. Debido al número reducido de buses articulados que conforman este sistema (587 a Julio 2004) la participación en el inventario de emisiones es bastante baja. La Tabla 6 resume el aporte actual de TM al inventario de emi-

siones y el aporte que este sistema tendría suponiendo mejoras en el diesel y un cambio de combustible hacia la opción de gas natural.

Estos resultados muestran que a nivel de la ciudad el sistema TM no es una de las fuentes principales de contaminación, con aportes de 3% y 2% para PM<sub>10</sub> y NO<sub>x</sub> respectivamente. Sin embargo, es necesario tener presente que el sistema TM probablemente será muy importante en 20 años cuando se haya implementado por completo en la ciudad.

Una posible recomendación para las autoridades ambientales es enfocar sus esfuerzos hacia categorías que actualmente presentan aportes significativos al inventario total de emisiones de la ciudad. Adicionalmente, realizar estudios de evaluación a la exposición de las emisiones de categorías como TM que permitan determinar si en este aspecto esta categoría representa una fuente de emisión de contaminantes importante.

Tabla 6. Aporte de buses articulados de Transmilenio al inventario de emisiones de la ciudad bajo diferentes escenarios.

	CO	VOC	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	PM <sub>10</sub>
Total Flota	2500	200	150	7	6
EAT	1	0.1	2	0.1	0.2
Aporte	0.03%	0.1%	2%	2%	3%
TDF	1	0.1	0.1	0.01	0.02
Aporte	0.03%	0.1%	0.1%	0.2%	0.4%
TGNC	1	0.02	0.03	0	0.001
Aporte	0.04%	0.01%	0.02%	0%	0.01%

Las unidades de las emisiones son Ton día<sup>-1</sup>. Total flota = emisiones totales incluyendo todas las categorías; EAT= Estado actual, equivalente a buses articulados con motores diesel con alto contenido de azufre y sin equipos de control; TDF = buses articulados operando con un diesel con bajo contenido de azufre y con filtro de partículas. TCNGCC= buses articulados operando con gas natural y con catalizador.

### 3.6.7 Comparación del inventario de emisiones con estudios previos

Para contextualizar los resultados obtenidos en este estudio, se realizó una comparación con estudios realizados anteriormente en la ciudad. La Tabla 7 presenta los resultados de las emisiones de los principales contaminantes obtenidas en cuatro proyectos diferentes.

Las emisiones de CO para tres de los cuatro estudios realizados son similares. El estudio realizado por la Universidad de Los Andes (Uniandes) en el 2004, parece subestimar las emisiones de CO.

Los valores de PM<sub>10</sub> son similares para este estudio y el estudio de Uniandes en el 2004 al igual que las emisiones de SO<sub>x</sub>. Los resultados para las emi-

siones de NO<sub>x</sub> presentan diferencias importantes para todos los estudios que reportan este valor, la misma situación se presenta para las emisiones reportadas de COV y CH<sub>4</sub>.

Aunque en general se presentan valores del mismo orden de magnitud para la mayoría de los contaminantes, se presentan diferencias importantes en algunos de los resultados lo que indica la necesidad de seguir realizando estudios encaminados a la determinación de emisiones provenientes de fuentes móviles en la ciudad.

Tabla 7. Resultados de diversos estudios de emisiones por fuentes móviles de diferentes contaminantes.

	DAMA-UNAL, 2001 <sup>1</sup>	DAMA-Uniandes, 2004 <sup>2</sup>	START-Uniandes, 2005 <sup>3</sup>	Este estudio ***
No. de vehículos	812,363	869,613	1'100,000	930,000
CO	1'045,387	291,212	230,000*	820,000
PM <sub>10</sub>	N/A	1,552	N/A	2,000
SO <sub>x</sub>	3,947**	2,171**	N/A	2,200
NO <sub>x</sub>	27,100	13,004	12,000*	49,000
COV	N/A	45,557	N/A	69,000
THC	73,554	N/A	25,000*	N/A
CO <sub>2</sub>	N/A	1'780,896	3'000,000	4'600,000
N <sub>2</sub> O	N/A	N/A	90	110
CH <sub>4</sub>	N/A	477	1,400	14,000

Las unidades de todos los valores son Ton año<sup>-1</sup>

1. Plan de gestión del aire para el Distrito Capital 2001-2009, Universidad Nacional-DAMA 2001.

2. Modelo de calidad del aire para Bogotá. Uniandes-DAMA 2004.

3. Estimación de contaminantes y gases efecto invernadero de fuentes móviles en la ciudad. Start-Uniandes 2005.

\* Resultados para vehículos livianos de gasolina únicamente.

\*\*Este resultado es sólo para SO<sub>2</sub>. \*\*\*Todos los valores de emisiones presentados en esta sección se obtienen de multiplicar las emisiones diarias por 329 días año<sup>-1</sup>.

## 4 INCERTIDUMBRE Y REPRESENTATIVIDAD

En esta sección del documento se mencionan diferentes aspectos que pudieron afectar la representatividad de los resultados obtenidos.

En primer lugar, es necesario mencionar que el modelo IVE a pesar de ser un modelo diseñado para suplir las necesidades de países que no cuentan con un modelo de estimación de emisiones propio, utiliza factores de emisión desarrollados bajo condiciones que no necesariamente son representativas de cada ciudad donde se utiliza este modelo.

Adicionalmente, la forma como se desarrolla la campaña de medición para recolectar la información necesaria presenta algunos inconvenientes que pueden afectar la validez de los datos recolectados. Por ejemplo, en Bogotá la selección de los sectores donde se realizaron las mediciones se vio afectada por el factor de seguridad, ya que considerando los costos de los equipos utilizados en las mediciones, los sectores utilizados para la campaña no podían ser zonas que se consideraran peligrosas.

Las encuestas realizadas en diversos parqueaderos de la ciudad pudieron estar sesgadas hacia vehículos relativamente nuevos y en buen estado. Los altos precios de los parqueaderos en Bogotá podrían influir en la decisión de usar estos servicios por parte de los usuarios de los mismos.

La información recolectada con las unidades GPS para buses y camiones en este estudio no se considera representativa de todas las categorías existentes en la ciudad, debido a que cada una de ellas está compuesta por diversas clases de vehículos. Por ejemplo, los buses están conformados por Transmilenio, colectivos, busetas, ejecutivos, entre otros. Utilizar un solo valor de actividad vehicular para la categoría de buses no es la mejor alternativa ya que cada una de las clases que conforman esta categoría presenta patrones de conducción muy diferentes entre sí.

Otra variable que pudo afectar la representatividad de la información recolectada en campo fueron las fechas en las que se realizaron las mediciones: Enero 17 al 28. Esta época del año es reconocida por su relativo bajo nivel de actividad vehicular en Bogotá.

Debido a la falta de información sólida en términos de emisiones de la ciudad de Bogotá así como al gran número de suposiciones y simplificaciones utilizadas en nuestros cálculos, consideramos el inventario de emisión de fuentes móviles presentado en este documento como una aproximación de primer orden que proporciona, en el mejor de los casos, el orden de magnitud de las emisiones para las diferentes categorías vehiculares consideradas. Todos los resultados presentados requieren ser confirmados y validados, una vez se cuente con más y mejor información de la flota vehicular bogotana.

## 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El estudio de actividad vehicular realizado bajo el contexto del proyecto IVE en Bogotá generó información importante que permitió estimar de manera económica y efectiva, el inventario de emisiones de

fuentes móviles en la ciudad. Este modelo se considera una excelente herramienta para evaluar el efecto y las tendencias de diversas medidas enfocadas hacia la prevención y el control de la contaminación atmosférica. Sin embargo se recomienda seguir realizando investigaciones que mejoren y actualicen los resultados obtenidos durante este estudio.

Se estimaron las emisiones totales para contaminantes criterio obteniendo resultados de 6 Ton d<sup>-1</sup> para PM<sub>10</sub>, 2,500 Ton d<sup>-1</sup> para CO, 150 Ton d<sup>-1</sup> para NO<sub>x</sub>, 7 Ton d<sup>-1</sup> para SO<sub>x</sub> y 200 Ton d<sup>-1</sup> para COV.

Se estimaron los aportes de cada categoría vehicular al inventario total de emisiones, siendo los buses la categoría de mayor relevancia, al aportar el 50% de las emisiones de PM<sub>10</sub> a pesar de representar menos del 5% del total de la flota de vehículos en la ciudad.

El ejercicio de análisis de escenarios evidenció el problema asociado con la masiva presencia de motos con motores de dos tiempos y sin ningún sistema de control de emisiones en la ciudad. Esta categoría de vehículos es responsable de alrededor del 20% de las emisiones de PM<sub>10</sub> y COV, convirtiéndola en una de las categorías de mayor relevancia en términos de emisiones demostrando la importancia de implementar medidas que controlen esta situación.

Los aforos vehiculares en las diferentes vías de la ciudad permitieron estimar la participación de cada categoría vehicular en la ocupación de las vías. Los taxis presentaron altos porcentajes (entre 20% y 50%) confirmando el hecho de la sobreoferta existente para esta categoría (entre 45% y 55%). Sin embargo, en términos de emisiones, los taxis no representan aportes significativos al total de emisiones de contaminantes en la ciudad.

Al igual que en el caso de los taxis, las emisiones de contaminantes provenientes del sistema de transporte masivo Transmilenio, no son muy relevantes en términos del inventario total de emisiones de la ciudad. Por lo tanto aunque el uso de gas natural en TM tendría un impacto significativo en las emisiones de este sector, esta estrategia no se reflejaría en los niveles de emisión de contaminantes en toda la ciudad.

En contraste con los taxis, la eliminación de la sobreoferta actual de buses (entre 11% y 22%) generaría una disminución importante en los niveles de emisión de contaminantes en la ciudad. Las reducciones para las emisiones de PM<sub>10</sub> estarían entre 15% y 25% dependiendo si se eliminan buses operando a gasolina y diesel, o sólo buses de motores diesel.

El proceso de chatarrización de buses en la ciudad es una estrategia efectiva en términos de reducción

de emisiones contaminantes, pero debería estar enfocada hacia vehículos que operen con diesel para garantizar una mayor reducción en las emisiones de material particulado.

Los taxis y buses presentan las actividades vehiculares más altas en la ciudad a pesar de representar una fracción pequeña del número total de vehículos registrados. Por esta razón las medidas encaminadas a mejorar la movilidad deberían estar enfocadas a estas categorías.

Las emisiones de material particulado, el contaminante más importante en términos de salud pública, provienen fundamentalmente de la flota vehicular de carga pesada (buses y camiones) y de las motos. Por esta razón, las medidas de protección ambiental deberían estar enfocadas hacia estos vehículos.

A partir de los análisis realizados se determinó que el mejoramiento de la calidad de los combustibles diesel, es la mejor estrategia para la reducción de las emisiones de material particulado en Bogotá.

Se recomienda realizar estudios que complementen los resultados obtenidos en este proyecto y que permitan evaluar la efectividad de las medidas encaminadas hacia la disminución de los niveles de contaminación propuestas desde la perspectiva económica.

## 6 REFERENCIAS

- Behrentz, Eduardo, 2004. *Estimación de contaminantes y gases efecto invernadero de Fuentes móviles en la ciudad*. Universidad de Los Andes.
- Crookes, R., 1996. Systematic assessment of combustion characteristics of biofuels and emulsions with water for use as diesel engine fuels. *PII: S0196-8904 00202-6*.
- Durbin, T., 2003. The effects of diesel particulate filters and a low-aromatic, low-sulfur diesel fuel on emissions for medium-duty diesel trucks. *Atmospheric Environment* 37 2105–2116.
- Gertler, A., 2005. Diesel vs. gasoline emissions: Does PM from diesel or gasoline vehicles dominate in the US?. *Atmospheric Environment* 39 2349–2355.
- Ghose, M., 2004. Assessment of the impacts of vehicular emissions on urban air quality and its management in Indian context: the case of Kolkata (Calcutta). *Environmental Science & Policy* 7 345–351.
- Ibáñez, Martha, 2004. *Evaluación y caracterización del parque automotor de transporte público individual y colectivo en Bogotá D.C y confrontación con la flota necesaria para satisfacer la demanda actual de viajes en este modo*. Tesis especialización en transportes. Universidad Nacional de Colombia.
- Kan, H., 2004. Particulate air pollution in urban areas of Shanghai, China: health-based economic assessment. *Science of the Total Environment* 322 71–79.
- Lents, J., 2004. *Estudio de la actividad vehicular en Sao Paulo*. Internacional Sustainable Systems Research: California, USA.
- Matsumoto, S., 2000. NO<sub>x</sub> storage-reduction catalyst for automotive exhaust with improved tolerance against sulfur poisoning. *Applied Catalysis B: Environmental* 25 115–124.
- Neuberger, M., 2004. Acute effects of particulate matter on respiratory diseases, symptoms and functions: epidemiological results of the Austrian Project on Health Effects of Particulate Matter (AUPHEP). *Atmospheric Environment* 38 3971–3981.
- Neyestanaki, A., 2004. Deactivation of postcombustion catalysts, a review. *Fuel* 83 395–408.
- Saiyasitpanich, P., 2005. The effect of diesel fuel sulfur content on particulate matter emissions for a nonroad diesel generator. *Journal of the Air & Waste Management Association* 55 993-998.
- Sawyer, R., 2000. Mobile sources critical review: 1998 NARSTO assessment. *Atmospheric Environment* 34 2161–2181.
- Schifter, I., 2005. Fuel-based motor vehicle emission inventory for the metropolitan area of Mexico City. *Atmospheric Environment* 39 931–940.
-