

**CARACTERIZACIÓN DE LOS RANGOS DE EXPOSICIÓN A CONTAMINANTES
ATMOSFÉRICOS EN BOGOTÁ: ESTUDIO PILOTO**

MÓNICA ESPINOSA

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

**FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C.
2007**

**CARACTERIZACIÓN DE LOS RANGOS DE EXPOSICIÓN A CONTAMINANTES
ATMOSFÉRICOS EN BOGOTÁ: ESTUDIO PILOTO**

MÓNICA ESPINOSA

**DIRECTOR
EDUARDO BEHRENTZ**

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C.
2007

TABLA DE CONTENIDO

1. Introducción.....	1
2. Objetivo	2
2.1. Objetivo general	2
2.2. Objetivos específicos.....	2
3. Metodología	3
3.1. Mediciones de contaminantes al interior de vehículos	4
3.2. Mediciones de contaminantes en microambientes interiores y exteriores.....	6
3.3. Métodos de recolección y análisis de las muestras	10
3.4. Patrones de actividad humana	11
3.5. Factor de Exposición	11
4. Resultados y Análisis de Resultados	12
4.1. Concentración de contaminantes al interior de vehículos	12
4.1.1. Posición de las ventanas	17
4.1.2. Posición del motor, posición del tubo de escape y edad de los buses	19
4.2. Concentración de contaminantes en microambientes interiores y exteriores.....	21
4.2.1. Paraderos de buses de transporte público colectivo y estaciones de buses de transporte público masivo.....	21
4.2.2. Viviendas y oficinas	25
4.3. Factores de exposición.....	28
4.3.1. Patrón de Actividades	28
4.3.2. Cálculo de los Factores de Exposición.....	29

CONCLUSIONES.....	36
ANEXO 1	37

1. INTRODUCCIÓN

Dadas las elevadas concentraciones atmosféricas de material particulado respirable (PM_{10}) registradas por la red de monitoreo de la calidad del aire de la ciudad, Bogotá es considerada en la actualidad como uno de los centros urbanos más contaminados de América Latina. En algunas zonas de la ciudad, las concentraciones de PM_{10} exceden los valores recomendados por la legislación local más del 70% del tiempo (Cancino, 2006).

Al mismo tiempo, según la autoridad local encargada de velar por la salud pública, la enfermedad respiratoria es la principal causa de mortalidad y morbilidad en niños menores de cinco años. Adicionalmente, este tipo de enfermedades se encuentran dentro de las cinco primeras causas de mortalidad y morbilidad para toda la población de la ciudad.

La documentación existente relacionada con los niveles de contaminación por material particulado así como con las afecciones en salud asociadas con la exposición prolongada a dicho contaminante ha generado una respuesta importante por parte de las entidades ambientales de orden local y nacional. Esta respuesta, sin embargo, aun no ha logrado controlar el problema de contaminación atmosférica en la ciudad por lo que es necesario continuar trabajando en la documentación y análisis del mismo.

Un ejemplo de un fenómeno para el cual no se cuenta con la información apropiada tiene que ver con los niveles de exposición al que se encuentran sujetos los bogotanos en los diferentes ambientes urbanos de la ciudad. Este tipo de información es fundamental ya que es ampliamente reconocido que las concentraciones de contaminantes atmosféricos registradas por las redes fijas de monitoreo no necesariamente son representativas de las condiciones reales de exposición de la población (Vignati et al., 1999; Wu et al., 2002; Gulliver et al., 2004). Más aun, según lo reportado en la literatura científica, es común que los niveles de exposición registrados en los microambientes localizados en cercanías a fuentes de emisión sean bastante más elevados a los que pueden ser determinados a partir de mediciones en estaciones fijas de monitoreo de calidad del aire.

Es importante resaltar que esta investigación representa un estudio piloto así como un primer esfuerzo de documentar los niveles de exposición personal a contaminantes atmosféricos en Bogotá. De esta forma, los resultados aquí presentados no pueden ser considerados representativos para toda la población de la ciudad.

2. OBJETIVO

2.1. Objetivo general

Realizar un estudio piloto de exposición a contaminantes atmosféricos en diferentes microambientes en la ciudad de Bogotá.

2.2. Objetivos específicos

- Identificar patrones de actividad humana para población de Bogotá.
- Identificar microambientes típicos de Bogotá, tanto interiores como exteriores.
- Caracterizar la concentración de contaminantes atmosféricos en los microambientes seleccionados.
- Determinar factores de exposición a contaminantes atmosféricos para los microambientes seleccionados.
- Determinar la exposición diaria total a contaminantes atmosféricos.

3. METODOLOGÍA

Durante la fase de campo, desarrollada entre octubre de 2006 y enero de 2007, se caracterizaron microambientes urbanos incluyendo hogares, oficinas, paraderos del sistema público colectivo, estaciones del sistema de transporte masivo, el interior de vehículos de carga liviana de servicio público y privado, y el interior de buses de la flota de transporte público colectivo (TPC) así como de la flota de transporte masivo TransMilenio (TM). Para cada uno de dichos microambientes se escogieron dos escenarios. Un primer escenario fue asociado con elevados niveles de exposición mientras el otro se encontraba asociado con bajos niveles de exposición (ver Figura 1).

Las mediciones en todos los microambientes se realizaron por duplicado o triplicado. Los monitoreos fueron realizados en días hábiles y de manera continua en todos los microambientes considerados en este estudio (ver Tabla 1). En los microambientes interiores y exteriores, los monitoreos tuvieron una duración aproximada de 10 horas diarias, iniciando alrededor de las 7 a.m. Al interior de vehículos, los períodos de monitoreo tuvieron una duración de dos horas en promedio, en este caso las mediciones se realizaron a diferentes horas de día, incluyendo horas pico.

Previamente a la fase de campo se desarrolló una campaña piloto, en la que se evaluaron los protocolos de manejo de los equipos, los métodos de recolección y de análisis de las muestras.

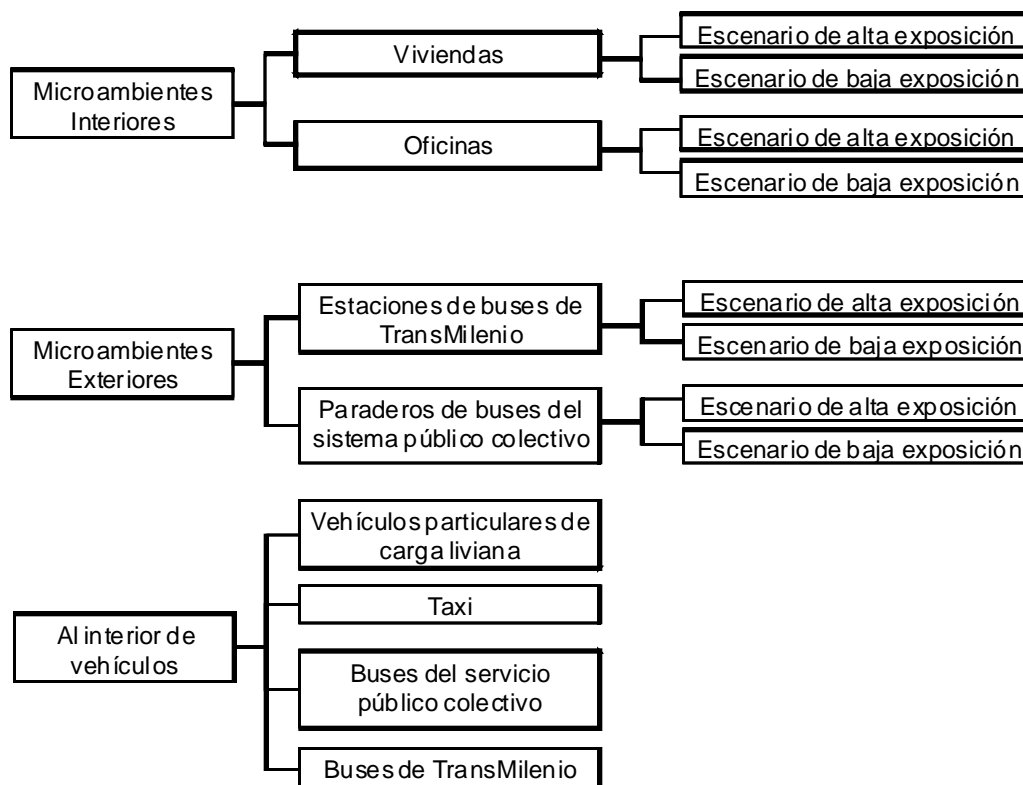


Figura 1. Microambientes considerados en este estudio.

3.1. Mediciones de contaminantes al interior de vehículos

Al interior de los vehículos se caracterizó la concentración de monóxido de carbono (CO), material particulado fino (PM_{2.5}) y material particulado respirable. Estos contaminantes se midieron en tiempo real mientras se realizaba una de dos rutas seleccionadas. De manera simultánea al monitoreo de contaminantes, se realizaron registros filmicos con el fin de documentar las condiciones del tráfico y de las vías. Los equipos de monitoreo los llevaba un investigador ubicado en la mitad de cada vehículo.

Las mediciones en buses de transporte público colectivo, taxis y vehículos particulares, se realizaron siguiendo una misma ruta. El recorrido iniciaba en Suba, en la Transversal 134 con Calle 142 y finalizaba en el Centro de la ciudad, en la Calle 19 con Carrera 10. Para caracterizar la concentración de contaminantes en buses de Transmilenio, se escogió la ruta de este sistema más parecida a la primera seleccionada. Ésta iniciaba en el Portal de Suba y finalizaba en la estación de Las Aguas en la Calle 19 con Carrera 4. Los dos recorridos estaban conformados por diferentes

clases de vías, en las cuales las condiciones de tráfico que se presentaron también fueron variables, se presentaron desde tramos de las vías casi vacíos hasta tramos muy congestionados.

Tabla 1. Fase de campo - días de monitoreo.

Día campo	Microambiente		Fecha
1	Estaciones de TM	EBE	24-oct-06
2		EBE	25-oct-06
3		EBE	26-oct-06
4		EAE	1-nov-06
5		EAE	2-nov-06
6		EAE	3-nov-06
7	Paraderos TPC	EBE	4-dic-06
8		EBE	5-dic-06
9		EBE	6-dic-06
10		EAE	7-dic-06
11		EAE	11-dic-06
12		EAE	14-dic-06
13	Oficinas	EAE	15-nov-06
14		EAE	16-nov-06
15		EAE	17-nov-06
16		EBE	21-nov-06
17		EBE	22-nov-06
18	Viviendas	EBE	22-nov-06
19		EBE	23-nov-06
20		EAE	12-dic-06
21		EAE	13-dic-06
22	Control		30-oct-06
23			31-oct-06
24			24-nov-06
25	Vehículos	Taxi	20-dic-06
26		Taxi	22-dic-06
27		Bus TPC	21-dic-06
28		VP	27-dic-06
29		VP y Bus TPC	28-dic-06
31		Bus TM	15-ene-07
32		Bus TM	16-ene-07

EAE: Escenario de alta exposición, EBE: Escenario de baja exposición

TM: TransMilenio, TPC: Transporte público colectivo.

VP: vehículo particular de carga liviana.

Se realizaron mediciones en tres buses TPC, cuatro buses TM, dos vehículos particulares y en un taxi. En la Tabla 2, se muestran las características de los vehículos seleccionados para medir la concentración de contaminantes en su interior.

Tabla 2. Características de los vehículos utilizados para medir la concentración de contaminantes en su interior.

Muestreo	Categoría	Ensayo	Modelo	Combustible	Posición del motor	Posición del tubo de escape
1	Bus TM	1	2001	Diésel	Centro 1er Cuerpo	Fuelle costado derecho
2		2	2001	Diésel	Trasera	Trasera costado Izquierdo
3		3	2004	Diésel	Centro 1er Cuerpo	Fuelle costado derecho
4		4	2006	Diésel	Trasera	Trasera costado Izquierdo
5	Bus TPC	1	1990	Diésel	Delantera	Trasera superior
6		2	1993	Diésel	Trasera	Trasera inferior
7		3	2003	Diésel	Delantera	Trasera inferior
8	Taxi	1	1995	Gasolina	NA	NA
9		2	1995	Gasolina	NA	NA
10	VP	1	1994	Gasolina	NA	NA
11		2	1999	Gasolina	NA	NA
12		3	1999	Gasolina	NA	NA
13		4	1999	Gasolina	NA	NA
14		5	1999	Gasolina	NA	NA

NA: No aplica.

Bus TM: Bus de TransMilenio, Bus TPC: Bus de transporte público colectivo.

VP: Vehículo particular de carga liviana.

3.2. Mediciones de contaminantes en microambientes interiores y exteriores

En los paraderos de buses de transporte público colectivo, estaciones de TransMilenio, oficinas y viviendas, además de caracterizar la concentración de $PM_{2.5}$, PM_{10} y CO en tiempo real, se llevaron a cabo mediciones en tiempo integrado de dióxido de azufre (SO_2) y PM_{10} . A continuación se da una breve explicación de las características que se tuvieron en cuenta para seleccionar los diferentes microambientes en los que se realizaron las mediciones.

Oficinas

Escenario de alta exposición: se seleccionó una oficina ubicada en Puente Aranda. Esta zona actualmente es considerada como una de las más contaminadas de la ciudad. Además de ser un área industrial, varias vías de alto tráfico vehicular la rodean.

Escenario de baja exposición: esta oficina quedaba en el tercer piso de un edificio de la Universidad de Los Andes, ubicada en el centro de la ciudad. En sus inmediaciones no había vías de transporte principales o industrias, o alguna otra fuente de contaminantes que pareciera influir de manera importante en la concentración de los contaminantes considerados en este estudio.

En ninguno de los dos casos, se observaron fuentes de contaminantes en el interior de las oficinas, que parecieran ser más importantes que las fuentes externas a las mismas.

Viviendas

Escenario de alta exposición: se seleccionó un apartamento en el que todos los gasodomésticos (estufa, calentador de agua y secadora) se encontraban instalados en la cocina, en donde la ventilación no parecía ser suficiente. Además, el diseño del edificio permitía que las emisiones de los vehículos en el estacionamiento, que quedaba al interior del edificio, llegaran hasta los apartamentos.

Escenario de baja exposición: se seleccionó una casa en la que los gasodomésticos (estufa y calentador de agua) estaban instalados en el patio, en donde se observaron mejores condiciones de ventilación, respecto a las condiciones observadas en la vivienda de alta exposición. Además el estacionamiento quedaba fuera de la casa al aire libre, por lo que no se esperaba un importante aporte de las emisiones de los vehículos en la concentración de contaminantes al interior de la vivienda.

Paraderos de buses del sistema público colectivo

El sistema de transporte público colectivo no cuenta en la mayoría de los casos con paraderos específicos. Por esta razón, los paraderos seleccionados para este trabajo estuvieron constituidos por dos puntos de la Carrera 68 en los que se observó que frecuentemente había pasajeros esperando bus. Se escogió esta vía, debido a que constituye una de las más importantes de la ciudad, razón por la cual el volumen de tráfico es considerablemente alto.

Escenario de baja exposición: se seleccionó en la Carrera 68 con Calle 51. En comparación con el paradero seleccionado como escenario de alta exposición, se observó una menor proporción de buses circulando. En este punto la vía tiene 4 carriles en cada sentido, alrededor de la vía hay amplias zonas verdes, por lo que parecería que las emisiones de los vehículos tienen una mayor dispersión en ese punto, en comparación con el punto escogido como escenario de alta exposición (ver Figuras 2 y 3).

Escenario de alta exposición: se seleccionó en Puente Aranda, en la Carrera 68 con Calle 14. En este punto la vía también tiene 4 carriles en cada sentido. Este paradero está ubicado en una zona industrial, se esperaba que las emisiones de las industrias influyeran en la concentración de

contaminantes de este paradero. Por la misma razón, el volumen de buses y camiones es alto, además es un punto de acceso y salida de la ciudad (ver Figuras 4 y 5).

Estaciones de buses de Transmilenio

Escenario de alta exposición: se seleccionó la estación ubicada en la Avenida Caracas con Calle 56 (ver Figura 6). En esta estación la frecuencia de buses es relativamente alta. Además de los carriles de Transmilenio, en cada sentido hay dos carriles para el resto de los vehículos. A ambos lados de la calle hay edificios, por lo que parecería que la dispersión de los contaminantes emitidos por los vehículos es más limitada, en comparación con la estación seleccionada como escenario de baja exposición. Otra razón por la que se consideró un escenario de alta exposición tuvo que ver con la percepción de la calidad del aire de personas que permanecen por largos periodos en esa estación, como son el personal de aseo y policías, quienes comentaron que entre las 4 p.m. y 8 p.m. se formaba una "nube de humo" dentro de la estación.

Escenario de baja exposición: se seleccionó la estación de la Autopista Norte con Calle 146. En esta estación se observó una menor frecuencia de buses de Transmilenio. Esta vía además de los carriles de Transmilenio, tiene 5 carriles en cada sentido. No hay edificaciones altas a los lados de la vía, por lo que parecería que hay una mejor dispersión de los contaminantes emitidos en la vía en comparación con el lugar seleccionado como escenario de alta exposición. Además esta estación se localiza en una zona residencial, por lo que se esperaba que la concentración base de los contaminantes fuera relativamente baja (ver Figura 7).



Figuras 2 y 3. Paradero de servicio público colectivo, escenario de baja exposición.



Figuras 4 y 5. Paradero de servicio público colectivo, escenario de alta exposición.



Figura 6. Estación de TransMilenio, escenario de alta exposición.



Figura 7. Estación de TransMilenio, escenario de baja exposición.

3.3. *Métodos de recolección y análisis de las muestras*

Las mediciones en tiempo real de material particulado fino y respirable, se realizaron con dos equipos DustTrak modelo 8520 (TSI Inc.). Estos equipos de método óptico, registran la concentración de material particulado en intervalos hasta de 1 segundo. Se ha reportado en numerosos estudios (Corburn et al., 2006; Sabin et al., 2005; Yanosky et al., 2002) que las concentraciones de material particulado registradas por el Dusttrak pueden exceder hasta por un factor de tres las concentraciones reales, dependiendo del tamaño predominante de las partículas que se estén midiendo. Según los mismos estudios, el Dusttrak es un equipo preciso, mas no exacto, por lo que sus resultados no deben ser tenidos en cuenta como una medida absoluta, sino relativa.

De manera rigurosa se hicieron verificaciones del flujo de muestreo y del "cero" del monitor durante toda la fase de campo.

La concentración de CO se midió en tiempo real utilizando una celda electroquímica Langan modelo T15V. Esta celda registra la concentración de CO cada 15 segundos. La celda se calibró antes y durante la fase de campo, utilizando gases de calibración de 10 ppm y 100 ppm obteniendo resultados satisfactorios.

Para medir la concentración de PM_{10} en tiempo integrado, se utilizó un muestreador de alto volumen Graseby Andersen/GMW modelo 1200. Periódicamente se realizaron pruebas de fugas y de flujo. La concentración de PM_{10} se determinó siguiendo el método de referencia 40 CFR Parte 50, Apéndice M de la EPA (EPA, 1997). Las muestras se recolectaron en filtros de fibra de vidrio, los cuales fueron acondicionados antes y después de cada medición bajo condiciones de temperatura y humedad relativa controladas.

Las muestras de SO_2 se recolectaron con un muestreador de gases Graseby RAC. La solución para recolectar la muestra y el procedimiento de análisis se realizaron según el método de la Paraosanilina, método de referencia manual: 40 CFR Parte 50, Apéndice A de la EPA (EPA, 1983). El método consiste en recolectar el SO_2 en una solución específica para este contaminante, posteriormente en el laboratorio se determina la concentración de SO_2 de la solución por método colorimétrico.

3.4. *Patrones de actividad humana*

Con el fin de determinar los factores de exposición a $PM_{2.5}$ y CO en los diferentes microambientes, era necesario recolectar información acerca del tiempo que las personas emplean en cada uno de los microambientes. Ésta se recolectó mediante encuestas de patrón de actividades. En esta etapa del estudio, 130 personas registraron información acerca de las actividades y los lugares que frecuentaban durante un día laboral. La información se registraba en un formato cada 30 minutos durante 24 horas. La encuesta se diseñó tomando como modelo una encuesta utilizada en un estudio similar (Georgoulisa et al., 2001). A esta encuesta se le realizaron modificaciones relacionadas con las modalidades de transporte disponibles en la ciudad de Bogotá. En el Anexo 1 se muestra la encuesta que se utilizó para recolectar la información en este estudio.

3.5. *Factor de Exposición*

Utilizando los valores de concentración media de contaminantes de los microambientes y los tiempos que se obtuvieron de los patrones de actividad humana, se cuantificaron los niveles de exposición personal de la población para algunos de los contaminantes muestreados. El factor de exposición se determinó teniendo en cuenta la Ecuación 1.

$$E_{i,j} = \bar{C}_{i,j} \cdot \bar{t}_j \quad \text{Ecuación 1}$$

Según la cual la exposición que experimenta una persona a un contaminante i en un microambiente j , está dada por la concentración media del contaminante i en el microambiente j , multiplicado por el tiempo medio que permanece la persona en el microambiente j .

A partir de los factores de exposición calculados para los diferentes microambientes, se determinaron valores de exposición diaria total bajo diferentes escenarios y se calculó la importancia relativa de los microambientes en términos de la exposición diaria total, según los escenarios evaluados anteriormente.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

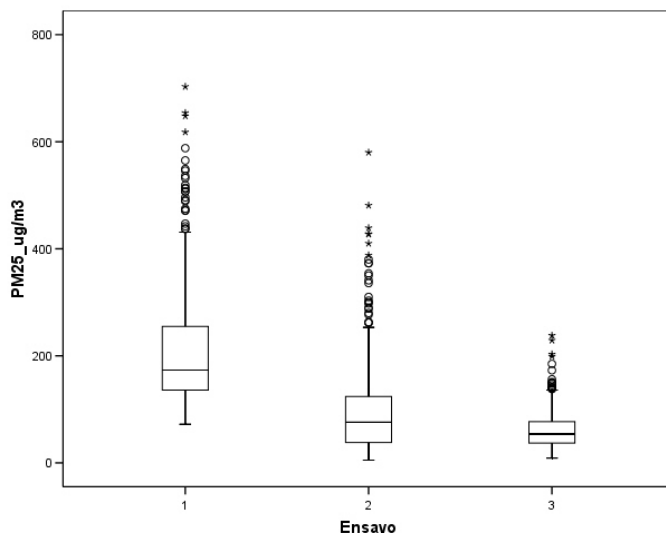
En general los datos de concentración de contaminantes recolectados en tiempo real, no se distribuyeron normalmente, ni aún después de realizar una transformación log-normal de los mismos, que es una de las transformaciones más utilizadas para normalizar los datos de concentraciones de contaminantes atmosféricos. En la mayoría de casos se observaron los datos sesgados hacia la derecha y en otros se presentó una distribución bimodal de los mismos, posiblemente ocasionada por las diferencias en la concentración de los contaminantes bajo las diferentes condiciones en las que se registraron los datos. Aunque los datos no se distribuyeron normalmente, para describir los resultados se utilizaron medidas de tendencia central así como intervalos de confianza para la media y análisis de caja. Para dar contexto a los resultados obtenidos, se compararon las concentraciones medias con valores de concentración máxima recomendados por entidades como la Agencia Ambiental de los Estados Unidos (EPA).

4.1. *Concentración de contaminantes al interior de vehículos*

Se observó una alta variabilidad entre los datos de concentración de contaminantes de un mismo ensayo registrados al interior de los vehículos. La concentración de contaminantes depende de un gran número de factores que varían frecuentemente en las vías, como son la cantidad y tipo de vehículos alrededor y la configuración de la calle. La Gráfica 1 muestra el comportamiento típico en cuanto a la variabilidad de los datos, observado en los ensayos dentro de vehículos. Esta gráfica muestra los resultados del análisis de caja para $PM_{2.5}$ de los ensayos realizados en los buses de TPC. En la cual se observa el amplio rango de concentraciones registradas. Además, muestran un importante número de datos extremos registrados en todos los ensayos.

En todos los casos se observaron altos valores de concentración media de material particulado (ver Tabla 3). En todos los ensayos realizados al interior de vehículos, la concentración media de $PM_{2.5}$ fue mayor a $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$, que corresponde al valor de norma diaria según la EPA. Por otra parte, la concentración media de PM_{10} superó en 8 recorridos $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$, valor máximo diario recomendado por la misma entidad. Según la distribución de los datos, los valores de concentración fueron relativamente altos durante la mayor parte de los recorridos (ver Tabla 4).

Gráfica 1. Análisis de caja para las concentraciones de $PM_{2.5}$ registradas al interior de la cabina de buses del sistema público colectivo.



El rango más amplio de las concentraciones medias de $PM_{2.5}$, se presentó en los ensayos al interior de buses (TPC y TM), con valores entre 50 y 270 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En cuanto a la concentración de material particulado en buses de TM, según lo observado durante la fase de campo, parecería que la emisión de los buses que se ponen en marcha en la estación, aporta a la concentración de contaminantes al interior del bus que seguidamente para en el mismo paradero, la emisión del primer bus no se alcanza a dispersar totalmente cuando un segundo bus está abriendo sus puertas para permitir el ingreso o descenso de los pasajeros.

En los taxis las concentraciones medias de $PM_{2.5}$ se encontraron alrededor de 140 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y en los ensayos realizados en vehículos particulares las concentraciones se encontraron entre 95 y 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Se observó que los picos de concentración de material particulado, en especial al interior de los vehículos livianos, estaban muy relacionados con la presencia de otros vehículos alrededor, y parecería que las emisiones debidas a otros vehículos cercanos pueden ser más importantes que las del mismo vehículo. En la Gráfica 2 se muestra la relación observada entre los picos de concentración de material particulado al interior de un vehículo particular y algunos eventos al exterior.

Tabla 3. Concentración de contaminantes al interior de la cabina de vehículos, media e intervalo para la media al 95%.

Categoría	Ensayo	PM _{2.5} (µg/m ³)			PM ₁₀ (µg/m ³)			CO (ppm)		
		Media	Límite inferior	Límite superior	Media	Límite inferior	Límite superior	Media	Límite inferior	Límite superior
TPC	1	213	204	223	378	364	392	10	9	10
	2	94	88	100	144	137	151	6	6	6
	3	61	57	64	105	99	111	6	6	6
	Global	123	118	128	211	204	218	7	7	7
Taxi	1	139	121	156	177	163	191	32	31	33
	2	150	146	154	208	201	215	63	61	64
	Global	145	137	153	199	191	207	49	47	50
VP	1	204	197	211	296	288	304	56	55	56
	2	111	106	116	148	142	155	13	13	13
	3	99	90	108	128	118	139	10	9	10
	4	120	108	133	155	141	169	10	9	10
	5	128	122	134	180	172	188	12	11	12
	Global	131	127	135	174	169	179	19	18	20
TM	1	270	253	288	323	306	341	6	6	6
	2	49	44	53	71	66	76	4	4	4
	3	95	86	105	121	110	131	4	4	4
	4	139	128	149	178	166	190	4	4	4
	Global	138	130	145	176	168	184	4	4	5

La media aritmética se muestra con el intervalo de confianza al 95%.
 TPC: Buses de transporte público colectivo.
 VP: Vehículo particular de carga liviana.
 TM: Buses de TransMilenio.
 Global: Es la media de todos los ensayos de cada categoría.

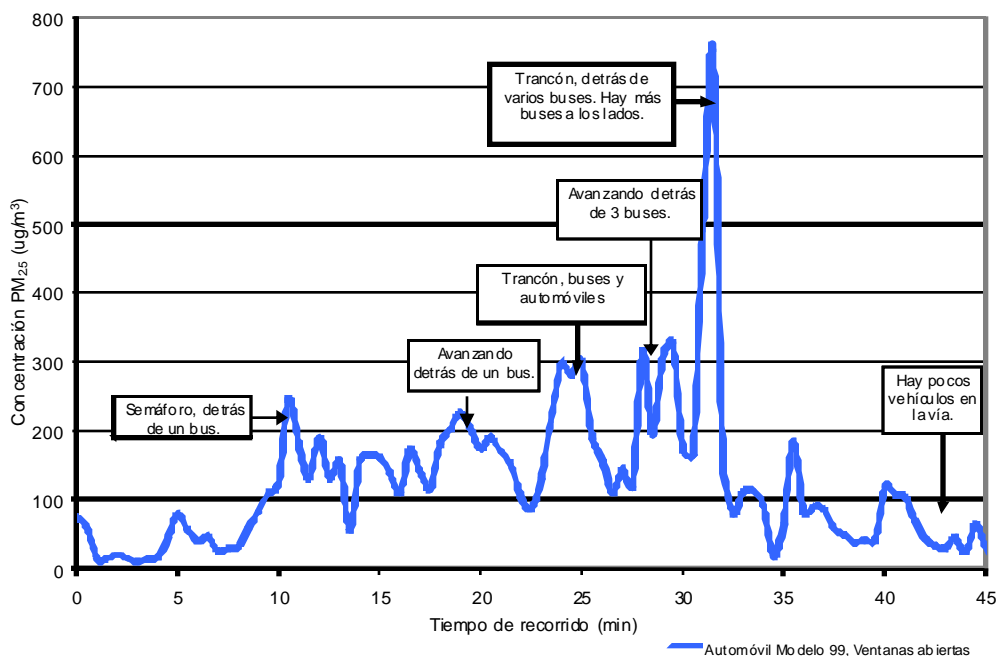
Tabla 4. Concentración de contaminantes al interior de la cabina de vehículos. Gráfica 2. Concentración de material particulado al interior de un vehículo particular y su relación con eventos al exterior.

Categoría	PM _{2.5} (µg/m ³)								PM ₁₀ (µg/m ³)								CO (ppm)							
	N	Mín	Max	Percentiles					N	Mín	Max	Percentiles					N	Mín	Max	Percentiles				
				10	25	50	75	90				10	25	50	75	90				10	25	50	75	90
TPC	2,059	5	703	28	48	96	161	251	2,059	17	897	52	85	154	283	458	1,660	1	19	4	5	7	9	11
Taxi	886	17	2,085	80	106	136	165	194	886	31	1,907	110	139	175	242	288	721	15	93	22	32	50	65	74
VP	1,942	8	957	40	68	114	178	228	1,942	19	1,010	62	98	151	258	320	1,662	2	67	6	9	12	16	57
TM	1,142	6	803	27	48	99	174	322	1,142	16	841	45	72	128	236	376	1,079	1	9	3	3	4	5	7

TPC: Buses de transporte público colectivo; VP: Vehículo particular de carga liviana; TM: Buses de TransMilenio.

EAE: Escenario de alta exposición; EBE: Escenario de baja exposición.

N: número de datos.

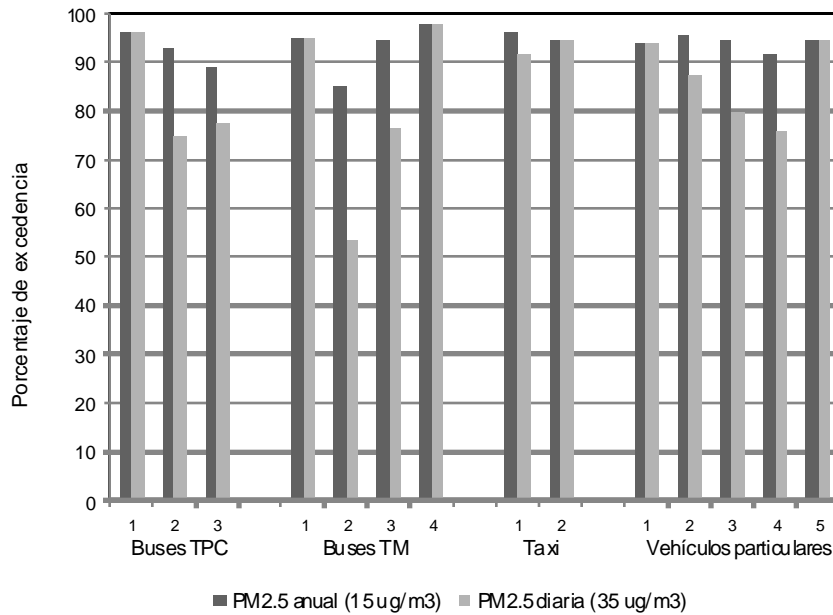
Gráfica 2. Concentración de PM_{2.5} al interior de un vehículo particular de carga liviana.

En uno de los cinco ensayos realizados en vehículos particulares de carga liviana, se presentaron concentraciones de contaminantes significativamente mayores en comparación con los otros ensayos de esta misma categoría. Este ensayo se realizó en un vehículo diferente al vehículo en el que se hicieron los otros recorridos (ver Tabla 2, vehículo particular modelo 1994), este vehículo se encontraba en mal estado de mantenimiento, y durante todo el recorrido fue visible la emisión de humo por el tubo de escape, estas condiciones se reflejaron en las altas concentraciones de contaminantes registradas.

Las concentraciones de PM₁₀ registradas en los ensayos en taxis y vehículos particulares se encontraron entre 130 y 300 µg/m³. En los buses se observó un rango más amplio, se presentaron concentraciones de PM₁₀ entre 70 y 380 µg/m³.

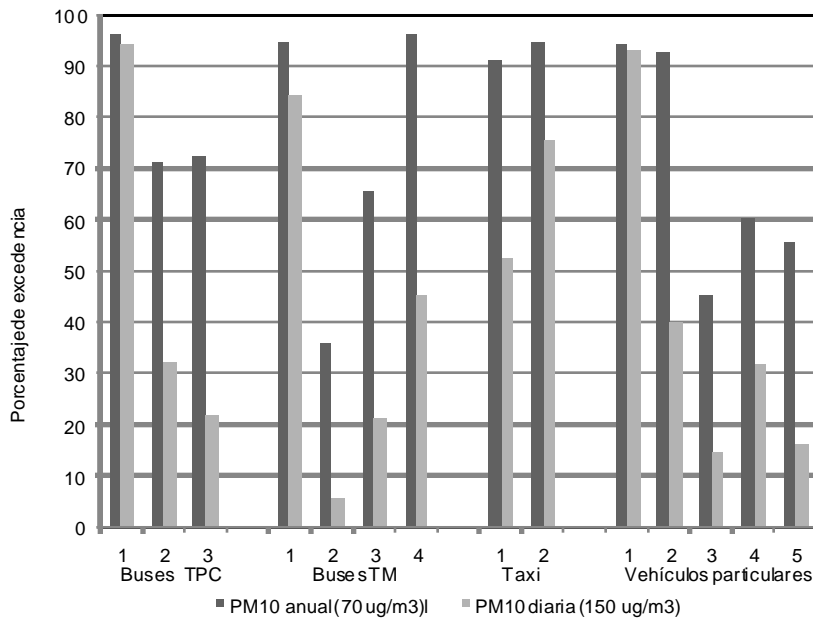
Para todos los ensayos se calculó el porcentaje del tiempo de cada recorrido en que las concentraciones de material particulado al interior de la cabina de los vehículos, excedieron las normas diarias para PM₁₀ (150 µg/m³) y PM_{2.5} (35 µg/m³) según la EPA, los resultados se muestran en las Gráficas 3 y 4.

Gráfica 3. Porcentaje de tiempo de cada recorrido en que se excedieron las normas de la EPA de concentraciones de PM_{2.5}, al interior de la cabina de los vehículos.



TPC: Transporte público colectivo, TM: TransMilenio.

Gráfica 4. Porcentaje de tiempo de cada recorrido en que se excedieron las normas de la EPA de concentraciones de PM₁₀, al interior de la cabina de los vehículos.



TPC: Transporte público colectivo, TM: TransMilenio

Al menos para un recorrido de cada categoría, se presentó una excedencia de la norma de PM₁₀, en más del 90% de las concentraciones registradas durante el ensayo.

La norma para $PM_{2.5}$ ($35 \mu\text{g}/\text{m}^3$), se excedió en más del 80% de la duración del recorrido, en la mayoría de los ensayos. Sólo un recorrido presentó una excedencia de la norma en menos del 60% del tiempo de duración del recorrido.

En todos los ensayos realizados en los buses, el valor de concentración media de CO fue menor a 10 ppm, siendo la categoría en la que se registraron las concentraciones más bajas para este contaminante. En los recorridos realizados en vehículos particulares se observó una gran diferencia entre el valor de concentración registrado en el vehículo más antiguo, cerca de 60 ppm y el valor medio registrado en el resto de ensayos, alrededor de 10 ppm. La diferencia entre los resultados de los vehículos particulares podría ser consecuencia de condiciones más deficientes de aislamiento entre el motor y la cabina de los pasajeros.

La norma horaria de CO de la EPA igual a 35 ppm, nunca fue superada en los buses, contrario a lo que se observó en los recorridos realizados en taxi y en especial en el vehículo particular más antiguo, en donde las concentraciones de CO excedieron hasta el 90% del tiempo la norma (ver Gráfica 5). En el caso de los ensayos realizados en el vehículo particular de mejores condiciones, la excedencia nunca fue mayor al 5 % del tiempo del recorrido.

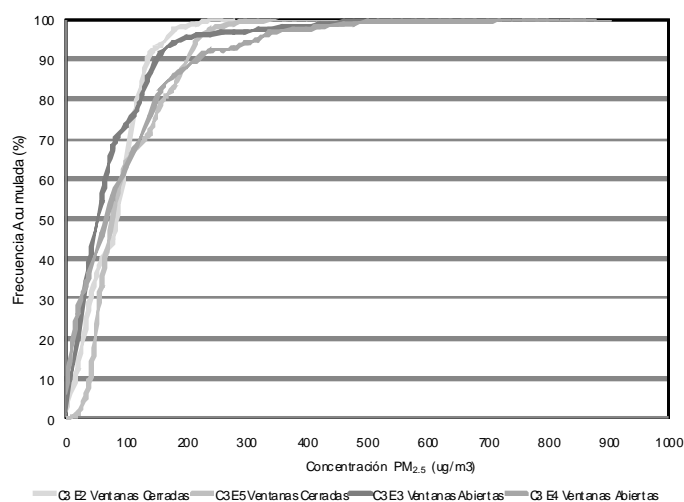
4.1.1. Posición de las ventanas

En los ensayos realizados en un mismo vehículo particular se analizó el efecto que la posición de las ventanas puede tener sobre la concentración de contaminantes al interior del mismo. Se realizaron dos ensayos con las ventanas abiertas y dos con las ventanas cerradas. Los resultados sugieren que la posición de las ventanas es un factor determinante en la cantidad y la magnitud de los picos de concentración que se presentan al interior de la cabina de los vehículos. Para $PM_{2.5}$ y PM_{10} los picos de concentración fueron mayores en los recorridos realizados con las ventanas abiertas mientras que para CO se observó lo contrario, los picos de concentración fueron mayores en los recorridos realizados con las ventanas cerradas. Los resultados de estos ensayos se muestran con curvas de frecuencia acumulada para $PM_{2.5}$ y para CO en las gráficas 5 y 6. En éstas, las curvas que se encuentran más a la derecha, representan los ensayos en los que se registraron las mayores concentraciones de cada contaminante.

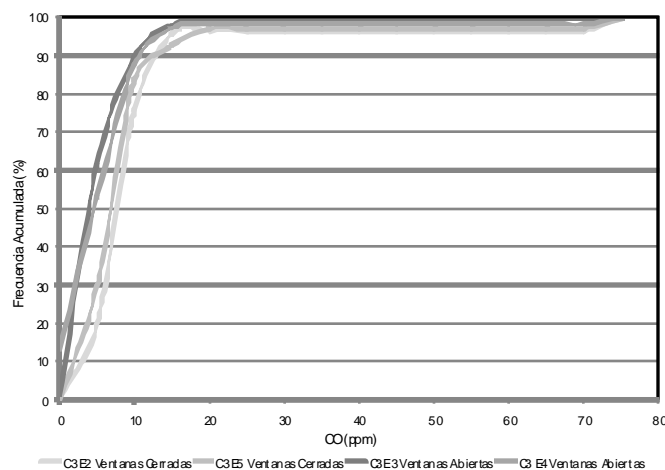
Estos resultados son consistentes con el fenómeno de autocontaminación. Dependiendo del tipo de combustible que utilizan los automóviles, se espera que el aporte de algunos contaminantes sea más importante por las emisiones del mismo vehículo, que por la concentración que pueda ser

aportada por fuentes externas, como son los vehículos que se encuentran alrededor (Behrentz et al., 2004). En el caso de los vehículos que utilizan diésel como combustible, se espera un importante aporte de material particulado por las mismas emisiones del vehículo; en el caso de los vehículos que funcionan con gasolina, se espera un aporte de CO mayor por las emisiones del mismo vehículo que por otras fuentes. En el mismo estudio (Behrentz et al., 2004), se demostró que el fenómeno de autocontaminación se hace mayor cuando las ventanas están cerradas debido a que la ventilación es más limitada.

Gráfica 5. Frecuencia acumulada de la concentración de PM_{2.5} registrada en un vehículo particular, comparación según la posición de las ventanas.



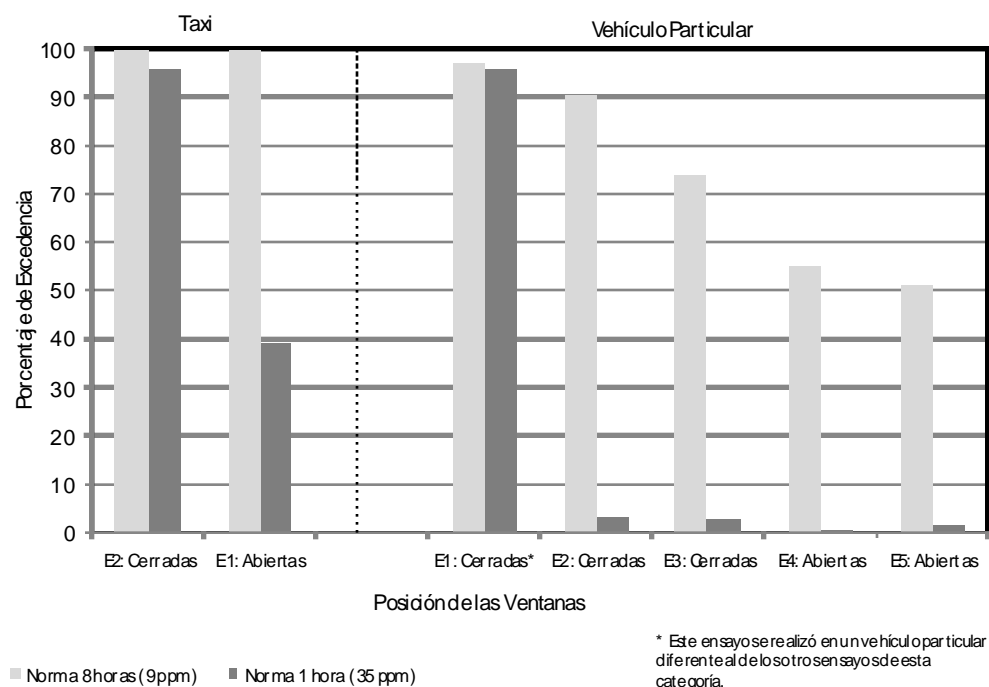
Gráfica 6. Frecuencia acumulada de la concentración de CO registrada en ensayos realizados en un vehículo particular, comparación según la posición de las ventanas.



El efecto que la posición de las ventanas tiene sobre la concentración de CO, también se pudo evaluar en los recorridos realizados en taxi. En éstos se observó una diferencia importante en las concentraciones de CO entre el ensayo

realizado con las ventanas abiertas y el ensayo realizado con las ventanas cerradas. En el recorrido con las ventanas cerradas, se excedió la norma horaria de la EPA de 35 ppm el 90% del tiempo del recorrido, mientras que con las ventanas abiertas la norma se excedió durante el 30% del recorrido. La excedencia para cada uno de los recorridos se muestra en la Gráfica 7.

Gráfica 7. Porcentaje de excedencia de las concentraciones de CO registradas al interior de la cabina de vehículos particulares y taxis, de las normas de la EPA. Comparación según la posición de las ventanas.



Adicionalmente, se observó que los picos de concentración se demoran más tiempo en volver a la concentración base cuando las ventanas están cerradas, que cuando las ventanas están abiertas. Esto es de esperarse debido al menor intercambio de aire entre el exterior y la cabina del vehículo, que dificulta la renovación del aire al interior del mismo. Se ha observado en otros estudios (Chan et al., 2003) que cuando las ventanas están cerradas, debido al espacio limitado los contaminantes se pueden acumular, llevando a una mayor concentración de éstos.

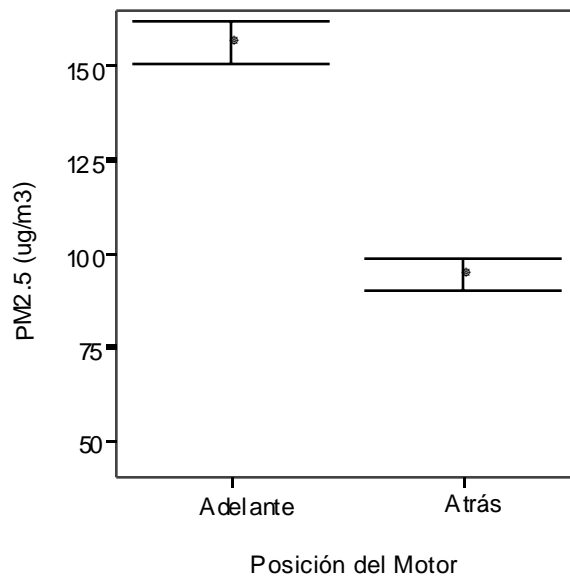
4.1.2. Posición del motor, posición del tubo de escape y edad de los buses

Se analizó el efecto que la posición del motor tiene sobre la concentración de material particulado en la cabina de los pasajeros de los buses. En la Gráfica 8 se muestra la media con el intervalo de

confianza al 95% de los buses de TPC y TM agrupados según la posición del motor en el vehículo. Los resultados sugieren que la concentración de material particulado es más alta al interior de los buses que tienen el motor en la parte de adelante que los que lo tienen en la parte de atrás.

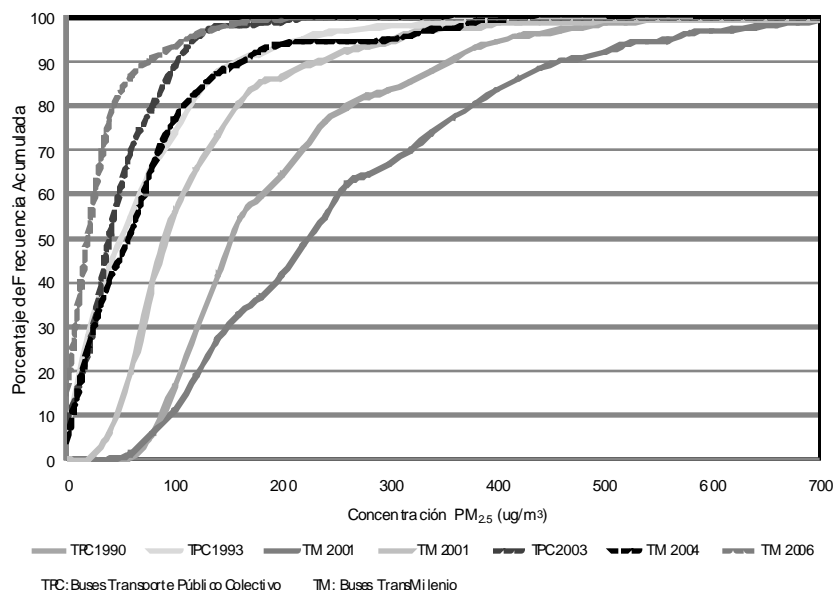
Las dos mayores concentraciones medias de $PM_{2.5}$ se registraron en buses, una en un bus de TPC y otra en un bus de TM, con concentraciones medias de 210 y 270 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. Estos buses tenían ubicado el motor en la parte delantera. Sin embargo se observó un valor más alto en la concentración que se registró al interior del bus de TM respecto al bus de TPC, esta diferencia podría deberse a la posición del tubo de escape, la cual es determinante en la dispersión de los contaminantes. El bus de TPC lo tenía ubicado en la parte superior, mientras que el de TM lo tenía en la parte inferior. La posición del tubo de escape en la parte trasera superior ha sido relacionada con concentraciones más bajas de contaminantes al interior de la cabina de los pasajeros. Por el contrario, la posición del tubo de escape en la parte trasera inferior ha sido relacionada con niveles más altos de concentración de contaminantes dentro de los vehículos.

Gráfica 8. Concentración de $PM_{2.5}$ al interior de buses, concentración media e intervalo de confianza para la media al 95%, análisis según la posición del motor en el vehículo.



Según los resultados pareciera que la edad de los buses podría ser un factor que también determina los niveles de material particulado en su interior. En la Gráfica 9 se muestran las curvas de frecuencia acumulada de la concentración de $PM_{2.5}$ de todos los ensayos realizados en buses incluyendo los de TPC y TM. En ésta se observa que las concentraciones de material particulado fino más altas se presentaron en los vehículos más antiguos.

Gráfica 9. Concentración de $PM_{2.5}$ al interior de la cabina de buses, análisis según el año modelo de los vehículos.



En el estudio desarrollado por Behrentz et al., (2004) se encontró que el fenómeno de autocontaminación se presentó en todos los buses estudiados, pero se encontró que las concentraciones al interior de los vehículos debidas a las emisiones del mismo vehículo podía ser hasta 10 veces mayor en los buses más antiguos en comparación con los más nuevos.

4.2. Concentración de contaminantes en microambientes interiores y exteriores

En la Tabla 5 se muestra la media y el intervalo de confianza para la media al 95% de las concentraciones de contaminantes medidas en tiempo real. En la Tabla 6 se muestran los percentiles de las concentraciones de contaminantes medidos en tiempo real. En la Tabla 7 se muestran los resultados de las concentraciones determinadas a partir de muestras integradas.

4.2.1. Paraderos de buses de transporte público colectivo y estaciones de buses de transporte público masivo

En los paraderos de buses TPC, se observaron diferencias importantes entre las concentraciones medidas en el escenario seleccionado como de alta exposición y el seleccionado como escenario de baja exposición. La concentración media de los contaminantes medidos en el paradero de alta exposición fue aproximadamente tres veces superior a la concentración media observada en el

paradero de baja exposición, esto se presentó en las concentraciones de los cuatro contaminantes medidos SO_2 , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ y CO . En cambio no se observaron grandes diferencias entre las concentraciones de todos los contaminantes del paradero de TM seleccionado como de alta exposición y el de baja exposición. En este caso solo se presentó una diferencia importante en la concentración media de $\text{PM}_{2.5}$, la cual fue más de tres veces superior en la estación de alta exposición comparada con la de baja exposición.

La concentración de SO_2 fue similar a la norma anual de la EPA ($80 \mu\text{g}/\text{m}^3$) durante los 3 días muestreados en el paradero TPC de baja exposición. En el paradero de alta exposición las concentraciones superaron la norma anual pero no fueron mayores a la norma diaria de la EPA ($364 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

La concentración media de CO en los paraderos de buses TM se encontró alrededor de 6 ppm. En los paraderos de buses TPC se registró una concentración media alrededor de 4 ppm para el escenario de baja contaminación y entre 10 y 12 ppm en el escenario de alta contaminación.

Se registraron concentraciones de material particulado relativamente altas en los escenarios seleccionados como de alta exposición de TM y en el paradero TPC. Tanto para $\text{PM}_{2.5}$ como para PM_{10} , los valores de concentración media excedieron en más del 100% las normas diarias de la EPA de $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$ y de $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} .

Tabla 5. Concentración de contaminantes medidos en tiempo real.

Categoría		PM _{2.5} (µg/m ³)			PM ₁₀ (µg/m ³)			CO (ppm)		
		Media	Límite inferior	Límite superior	Media	Límite inferior	Límite superior	Media	Límite inferior	Límite superior
Vivienda	Alta exposición	61	57	64	78	74	82	36	33	39
	Baja exposición	35	34	37	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Oficina	Alta exposición	55	52	58	89	76	101	6	6	6
	Baja exposición	18	14	22	30	25	35	1	1	1
Paraderos TPC	Alta exposición	195	171	219	247	209	284	11	10	12
	Baja exposición	70	62	77	81	73	90	4	3	5
Estaciones TM	Alta exposición	207	196	218	ND	ND	ND	5	5	5
	Baja exposición	61	59	62	ND	ND	ND	6	6	6

La media aritmética se muestra con el intervalo de confianza al 95%.

Paraderos TPC: Paraderos de buses del sistema público colectivo.

Estaciones TM: Estaciones de buses de TransMilenio.

ND: No existe ese dato, por alguna razón no se midió esa concentración.

Tabla 6. Distribución de los datos de concentración de contaminantes medidos en tiempo real en microambientes exteriores e interiores.

Categoría		PM _{2.5} (µg/m ³)							PM ₁₀ (µg/m ³)						CO (ppm)										
		N	Mín	Max	Percentiles					N	Mín	Max	Percentiles					N	Mín	Max	Percentiles				
					10	25	50	75	90				10	25	50	75	90				10	25	50	75	90
TPC	EAE	6,470	2	1,945	41	94	171	266	399	6,470	14	2,190	58	118	230	338	460	103	4	29	6	8	10	14	17
	EBE	10,117	4	1,582	34	44	83	92	146	10,117	9	1,292	42	53	74	105	157	112	1	34	1	1	3	6	8
TM	EAE	10,172	2	10,983	56	83	124	203	366	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	3,918	2	20	3	4	5	6	8	
	EBE	4,470	3	710	19	31	46	75	123	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	4,470	1	15	3	4	6	7	9	
Viviendas	EAE	6,944	21	252	30	39	47	57	72	6,944	28	322	44	52	61	73	90	466	3	134	7	11	24	51	86
	EBE	7,153	2	801	8	11	15	39	62	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	
Oficinas	EAE	6,829	27	156	39	48	63	83	95	6,829	35	239	53	66	82	113	132	814	1	13	4	5	6	7	9
	EBE	6,632	2	72	5	7	11	19	44	6,632	5	101	11	15	22	33	58	64	1	3	1	1	1	2	2

TPC: Buses de transporte público colectivo; VP: Vehículo particular de carga liviana; TM: Buses de TransMilenio.

EAE: Escenario de alta exposición; EBE: Escenario de baja exposición.

N: número de datos.

ND: no se midió.

Tabla 7. Concentración de contaminantes a partir de medidas integradas en microambientes interiores y exteriores.

Categoría		PM ₁₀ (µg/m ³)		SO ₂ (µg/m ³)	
		Media	D.S	Media	D.S
Vivienda	Alta exposición	43	16	183	27
	Baja exposición	40	1	51	4
Oficina	Alta exposición	82	ND	120	56
	Baja exposición	ND	ND	72	3
Paraderos TPC	Alta exposición	294	71	242	31
	Baja exposición	84	42	79	15
Estaciones TM	Alta exposición	173	34	ND	ND
	Baja exposición	119	24	ND	ND

Media aritmética de todas las muestras tomadas en cada microambiente.

Paraderos TPC: Paraderos de buses del sistema público colectivo.

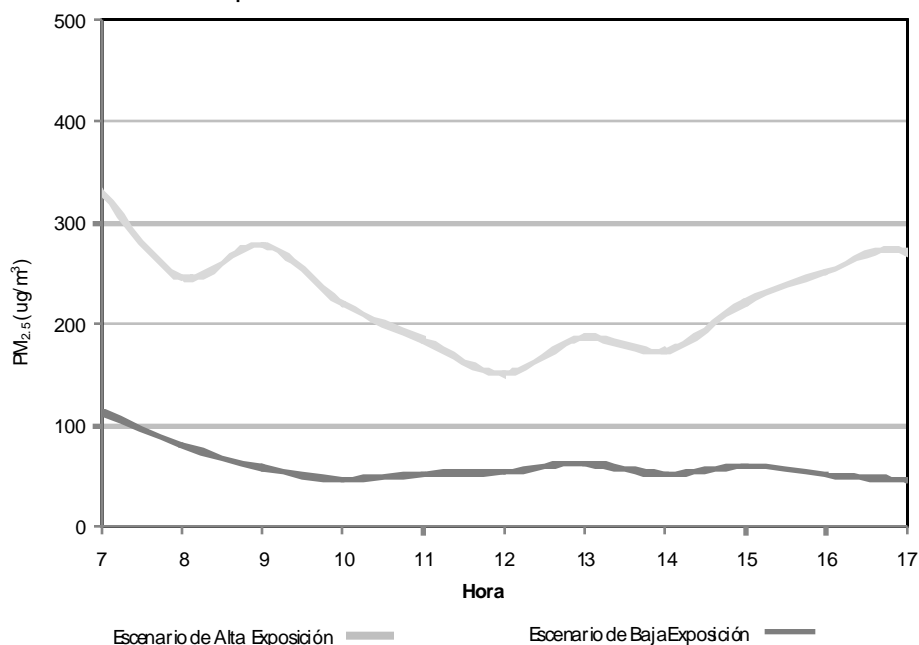
Estaciones TM: Estaciones de buses de TransMilenio.

D.S: Desviación estándar de todas las muestras tomadas en cada microambiente.

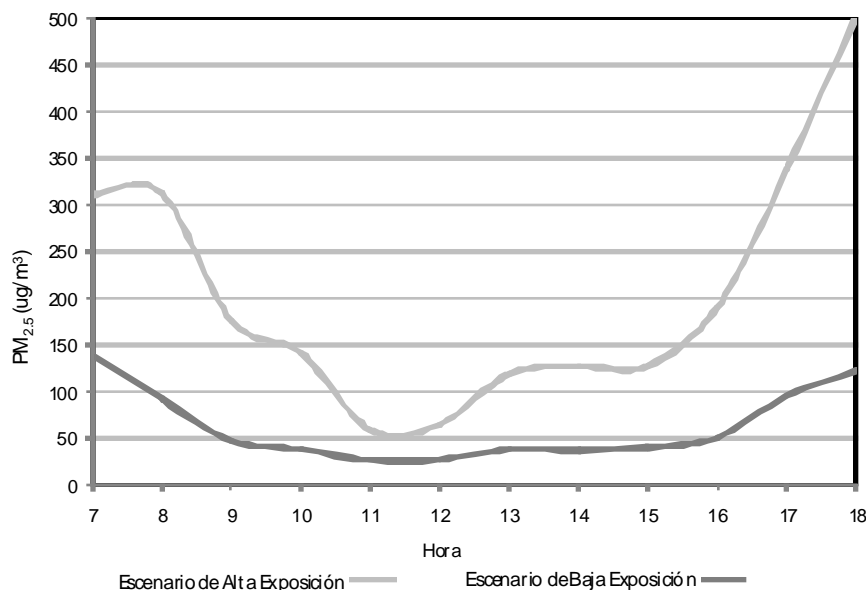
ND: No existe ese dato.

Se observó una variación importante en la concentración de material particulado con la hora del día. Este efecto fue más notable en las estaciones de TM, sin embargo en los paraderos de TPC este comportamiento también se observó. En las Gráficas 10 y 11 se muestra el comportamiento típico observado de la concentración media horaria de PM_{2.5} en cada uno de los paraderos de TPC y en las estaciones de TM.

Gráfica 10. Variación de la concentración de material particulado fino a lo largo del día en paraderos de buses del sistema público colectivo.



Gráfica 11. Variación de la concentración de material particulado fino a lo largo del día en estaciones de buses de TransMilenio.



En estas gráficas se observa que las horas en las que se presenta la mayor concentración de material particulado, son las horas de mayor tráfico en las estaciones y en la vía caracterizada en este estudio. En los paraderos TPC y estaciones TM se observaron los mayores valores de concentración media de material particulado aproximadamente entre las 7 y 9 a.m. y entre las 4 y 6 p.m.

En el paradero de TPC de baja exposición se observó una variación menor en el volumen vehicular a lo largo del día en comparación con el escenario de alta exposición, esto se observó reflejado en el comportamiento de la concentración de material particulado, que también fue más constante en comparación con el comportamiento observado en el paradero de alta exposición de TPC y las estaciones de TM.

4.2.2. Viviendas y oficinas

Los niveles más altos de SO_2 , se registraron en la vivienda seleccionada como escenario de alta exposición con concentraciones entre 160 y 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, seguidos por las concentraciones de las oficinas, que se encontraron entre 80 y 180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Las concentraciones medias de SO_2 en el escenario de alta exposición de las viviendas superaron alrededor de 4 veces los valores

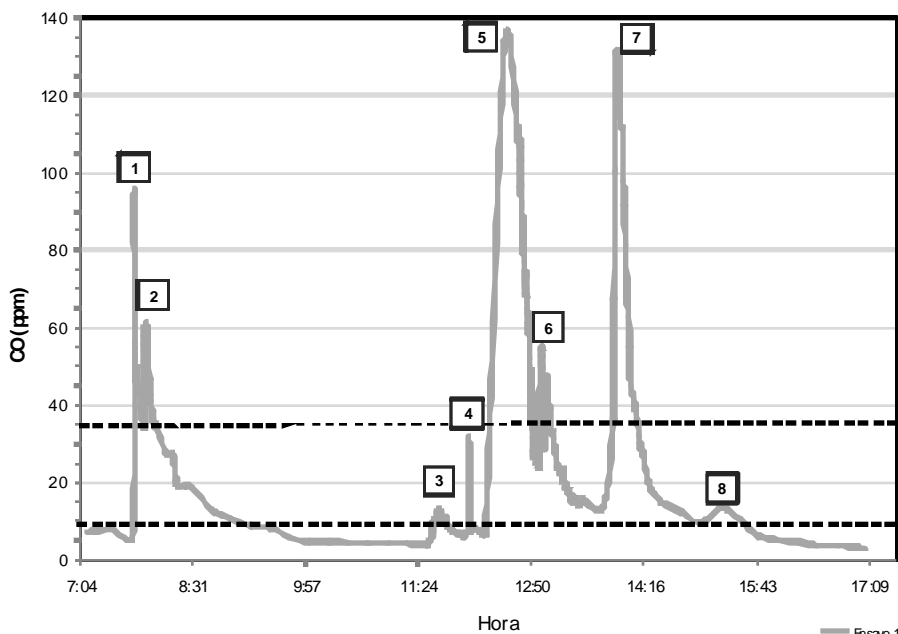
observados en el escenario de baja exposición de este mismo microambiente. En los casos anteriormente mencionados se excedió el valor de la norma anual de la EPA de $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Se observaron altos valores de concentración de CO en la vivienda que representaba el escenario de alta exposición. Los valores de concentración media se encontraron alrededor de 35 ppm, lo que corresponde a la norma de 8 horas de la EPA. En este microambiente se registraron valores instantáneos de concentración muy altos. En la Gráfica 12 se muestra una serie de tiempo que representa el comportamiento de este contaminante durante los días de muestreo en la vivienda de alta exposición. En este caso como principal fuente de CO, se observó el uso de gasodomésticos (calentador de agua, estufa y secadora) ubicados en un espacio con poca ventilación. Adicionalmente se observó que las emisiones de CO producidas por los automóviles en el estacionamiento, se alcanzaban a percibir al interior de la vivienda, aún cuando éste se ubicaba en el sótano del edificio y el apartamento se encontraba varios pisos más arriba. En este caso se observó que aunque los picos de concentración se alcanzaban rápidamente (en minutos), la concentración se demoraba largos periodos (horas) en volver a la concentración base. Como ejemplo se menciona el caso en específico de un pico de concentración ocasionado por un vehículo puesto en marcha, en el que pasaron más de dos horas para que la concentración disminuyera hasta alcanzar el valor inicial. En la vivienda de alta exposición, la concentración de CO excedió de manera significativa las normas para 1 y 8 horas de la EPA.

En Bogotá se ha observado que las altas concentraciones de CO en las viviendas son un problema. Según un informe de la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME, 2006), durante el 2006 en Bogotá se presentaron 51 casos de personas intoxicadas por CO, de los cuales 6 fallecieron. Según el mismo informe, entre las causas de altas concentraciones de CO en las viviendas, se encuentran deficiencias en la instalación de gasodomésticos, rejillas de ventilación y ductos de evacuación de gases insuficientes o mal instalados.

La concentración de $\text{PM}_{2.5}$ fue casi dos veces superior en la vivienda seleccionada como escenario de alta exposición, en donde se encontró una concentración media de $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$, comparado con la concentración media registrada en el escenario de baja exposición.

Gráfica 12. Serie de tiempo de la concentración de CO registrada al interior de la vivienda seleccionada como escenario de alta exposición.



1,2 Vehículo puesto en marcha en el estacionamiento.
3,5,6 Uso del calentador (gas natural).

4,8 Uso de la estufa (gas natural).
7 Uso de la secadora y la estufa (gas natural).

Por otra parte, se encontró que la concentración de $PM_{2.5}$ fue tres veces superior en la oficina seleccionada como escenario de alta exposición en comparación con la concentración media de este contaminante registrada en el escenario de baja exposición, en donde la concentración media fue de aproximadamente $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Mientras que las concentraciones de material particulado fueron relativamente altas en las oficinas y en especial en los paraderos TPC y estaciones TM, los niveles de CO fueron significativamente altos en la vivienda de alta exposición.

4.3. Factores de exposición

4.3.1. Patrón de Actividades

Las características de la población que participó llenando la encuesta sobre patrón de actividades se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Características de la población encuestada – patrones de actividad humana.

Característica		% Población
Ocupación	Estudiante	63
	Empleado	34
	Otro	3
Género	Mujeres	61
	Hombre	39
Edad	Entre 16 y 67	100
	Menor de 20	27
	Entre 20 - 30	48
	Entre 30 - 40	10
	Mayor de 40	15
Estrato	Estratos 1 - 3	55
Socioeconómico	Estratos 4 - 6	45

Según las encuestas, las personas permanecen aproximadamente el 85% del tiempo diario en microambientes interiores, el 5% en microambientes exteriores y el 10% del tiempo diario en transporte. Estos resultados son similares a los reportados en estudios de exposición de otras ciudades del mundo (Quintana et al., 2001; Berubé et al., 2004).

El 85% correspondiente a los microambientes interiores se reparte de la siguiente manera: 50% del tiempo diario en la vivienda, 30% en el lugar de trabajo o estudio y el restante 5% en otros microambientes interiores, como restaurantes y almacenes.

Adicionalmente, las encuestas proporcionaron información acerca de la cantidad de tiempo que las personas emplean en las diferentes modalidades de transporte. Estos tiempos, que se presentan en la Tabla 9, fueron los valores que se utilizaron en la determinación de los factores de exposición.

Tabla 9. Tiempo empleado en diferentes microambientes según la información recolectada en las encuestas.

Categoría	Tiempo (horas) ¹	Incertidumbre (horas) ²
Vehículos		
VP	1.8	0.4
TM	1.8	0.4
TPC	1.6	0.2
Taxi	0.7	0.3
Vivienda ³	12.8	0.6
Trabajo y/o universidad ⁴	7.1	0.7

¹ Corresponde a la media aritmética de todos los valores de las encuestas para cada categoría.

² La incertidumbre corresponde al intervalo de confianza al 95% para la media.

^{3,4} El tiempo de vivienda y trabajo, corresponde al tiempo que las personas emplean en los espacios interiores de éstas categorías.

TM: buses de TransMilenio, TPC: buses de transporte público colectivo.

VP: vehículos particulares de carga liviana.

El tiempo que las personas emplean en los paraderos de buses de TPC y en las estaciones de TM no se halló mediante las encuestas, debido a que los intervalos de tiempo de las encuestas eran superiores al tiempo que la gente pasa en estos microambientes. Para los cálculos de factores de exposición se utilizó un valor de 4 minutos de espera en las estaciones de TM y un valor de 7 minutos de espera en paraderos de buses TPC. Esta información fue suministrada por el grupo de investigaciones de transportes de la Universidad de los Andes (Lleras, 2007).

4.3.2. Cálculo de los Factores de Exposición

A partir de los tiempos que se obtuvieron de las encuestas y con las concentraciones medias de contaminantes encontradas en los diferentes microambientes se hallaron los factores de exposición para CO y para PM_{2.5}, los resultados se muestran en la Tabla 10. Estos factores constituyen una primera aproximación acerca del aporte de diferentes microambientes en la exposición diaria a CO y a PM_{2.5} en microambientes de Bogotá.

Tabla 10. Factores de exposición para CO y PM_{2.5}.

Categoría		Factores de Exposición	
		PM _{2.5} (µg/ m ³ .h)	CO (ppm. h)
Vehículos	TPC	202 ± 26	12 ± 1
	Taxi	97 ± 40	32 ± 13
	VP	229 ± 51	33 ± 7
	TM	252 ± 51	8 ± 2
Oficinas	EBE	127 ± 30	10 ± 1
	EAE	392 ± 43	43 ± 4
Paraderos TPC	EBE	8 ± 1	1 ± 1
	EAE	23 ± 3	1 ± 1
Estaciones TM	EBE	4 ± 1	1 ± 1
	EAE	14 ± 1	1 ± 1
Viviendas	EBE ¹	450 ± 29	26 ± 1
	EAE	780 ± 58	460 ± 43
Exterior ²		40 ± 3	1 ± 1

EAE Escenario de alta exposición, EBE: Escenario de baja exposición.

TPC: Buses de transporte público colectivo, TM: Buses de TransMilenio.

VP: Vehículos particulares de carga liviana.

¹ La concentración de CO no se midió en este microambiente, para hallar el factor de exposición se supuso CO de 2 ppm, el valor más bajo de CO que se encontró entre los microambientes caracterizados en este estudio.

² Se tomaron valores de la Red de monitoreo de calidad del aire de Bogotá.

Como se esperaba, el valor de exposición más alto para PM_{2.5} se encontró en la vivienda de alta exposición. Debido a que las personas emplean una fracción importante del tiempo diario en este microambiente (50% del tiempo diario), se esperaba que así mismo el aporte de este microambiente fuera significativo. Teniendo en cuenta el mismo criterio, se encontró que la exposición a PM_{2.5} en los vehículos fue muy alto comparado con el poco tiempo que las personas emplean al interior de vehículos (10% del tiempo diario). Estudios sobre exposición (Adams et al., 2001; Gulliver et al., 2004), sugieren que la exposición a altas concentraciones de contaminantes durante 1 hora, puede ser más relevante en términos de sus efectos sobre la salud, que la exposición durante 24 horas a los valores recomendados por la legislación y que los efectos sobre la salud debido a la exposición crónica a contaminantes pueden ser el resultado de repetidas exposiciones a altos niveles de contaminantes.

Se determinó la exposición diaria total a CO y a PM_{2.5} para todas las combinaciones de escenarios según la información recolectada en este estudio. La exposición diaria total a cada contaminante se calculó como la suma de la exposición aportada por todos los microambientes en los que están las personas en un día. En las Tablas 11 y 12 se muestran los resultados de exposición diaria total, en orden de mayor a menor exposición. Para dar contexto a los resultados, se muestra en amarillo el

valor de la exposiciónn diaria equivalente a estar expuesto durante las 24 horas del día a los valores de la norma según la EPA. Para $PM_{2.5}$ los valores son $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como norma anual y $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como norma diaria. Para CO la norma de 8 horas es de 9 ppm y la norma horaria es de 35 ppm.

La incertidumbre asociada a los factores de exposición y a la exposición diaria total de CO y de $PM_{2.5}$, se halló teniendo en cuenta los intervalos de confianza para la media al 95% tanto de las concentraciones medidas en los microambientes, como de los tiempos hallados a partir de las encuestas de patrón de actividades. En los factores de exposición de los contaminantes en las estaciones de TransMilenio y en los paraderos de TPC, únicamente se tuvo en cuenta la incertidumbre de la concentración de los contaminantes, debido a que los tiempos utilizados en estos casos se supusieron y por lo tanto no tenían una incertidumbre asociada.

La exposición diaria a $PM_{2.5}$ bajo todas las combinaciones de escenarios fue superior a la calculada a partir de la norma anual y solo en un caso fue menor a la calculada para la norma diaria. La exposición al CO no fue tan crítica en comparación con la obtenida para las concentraciones según las normas. Todos los casos fueron menores a la exposición calculada para la norma horaria y en la mitad de los escenarios la exposición fue menor a la calculada para la norma de 8 horas.

A partir de la información consignada en las Tablas 11 y 12 se realizaron las siguientes comparaciones:

- La diferencia entre la exposición diaria total a $PM_{2.5}$ en el mejor caso y el peor caso de combinación de escenarios, fue más del doble. Esta diferencia fue mucho mayor en el caso de la exposición diaria total a CO, en la cual la exposición en el peor de los casos fue más de diez veces superior a la exposición total experimentada en el mejor de los casos evaluados.
- Para la combinación de escenarios en la que se presentó la mayor exposición a $PM_{2.5}$, la vivienda de alta exposición aportó el 50% de la exposición diaria total, siendo el microambiente de mayor aporte diario a la exposición de éste contaminante. En la combinación de escenarios en la que se encontró la mayor exposición diaria a CO, la vivienda de alta exposición también fue el microambiente que aportó en mayor proporción a la exposición a éste contaminante. Aunque en la vivienda se pasa aproximadamente la

mitad del tiempo diario, este microambiente aportó más del 80% de la exposición diaria total a CO.

- Aunque la concentración de $PM_{2.5}$ fue mayor en la estación de TM de alta exposición que al interior de los buses de TM, la exposición en la estación fue el 20% de la exposición que se calculó para el interior de los buses articulados.
- El recorrido en bus de TM puede aportar hasta 30% de la exposición diaria total al $PM_{2.5}$, mientras que la exposición en la estación no supera el 6% de la exposición diaria total.
- Entre los microambientes estudiados se encontró que el que menos aporta a la exposición diaria total de $PM_{2.5}$ es el paradero TPC de baja exposición y que los paraderos de buses TPC y estaciones de TM son los microambientes que menos aportan a la exposición diaria total a CO.
- Aunque las mayores concentraciones de CO y $PM_{2.5}$ no se presentaron en la vivienda de alta exposición, los factores de exposición más altos para los dos contaminantes fueron los correspondientes a este microambiente. Debido al tiempo que las personas pasan en las viviendas, estas son un microambiente crítico en términos de exposición.
- La exposición a $PM_{2.5}$ en la vivienda de baja exposición fue similar a la exposición al interior del bus en el que se registró la mayor concentración media de este contaminante, mientras que la exposición en la vivienda de alta exposición fue casi dos veces mayor a la de éste mismo bus.
- La exposición a CO en la vivienda de alta exposición fue 11 veces más importante que la exposición a este mismo contaminante al interior del vehículo en el que se midió la mayor concentración media de éste contaminante.
- La vivienda (escenario alta exposición), puede aportar hasta el 50% de la exposición diaria total a $PM_{2.5}$ y el 80% de la exposición diaria total a CO.

Tabla 11. Exposición diaria total a PM_{2.5} para diferentes escenarios, valores de exposición ordenados de mayor a menor exposición.

Escenario	Exterior	Bus TPC	Bus TM	Taxi	VP	Paradero TPC		Estación TM		Vivienda		Oficina		E _{PM2.5} (µg/m ³ .h)
						EAE	EBE	EAE	EBE	EAE	EBE	EAE	EBE	
9	x		x					x		x		x		1516 ± 166
1	x	x					x			x		x		1446 ± 142
21	x				x					x		x		1441 ± 164
5	x	x					x			x		x		1425 ± 139
17	x			x						x		x		1308 ± 152
10	x		x					x		x			x	1250 ± 153
14	x		x						x	x			x	1214 ± 151
11	x		x					x			x	x		1186 ± 137
2	x	x					x			x			x	1180 ± 129
22	x				x					x			x	1175 ± 151
6	x	x					x			x			x	1160 ± 127
15	x		x						x		x	x		1150 ± 135
3	x	x					x				x	x		1116 ± 113
23	x				x						x	x		1111 ± 135
7	x	x					x				x	x		1095 ± 111
13	x		x						x	x				1087 ± 121
18	x			x						x			x	1043 ± 139
19	x			x							x	x		979 ± 123
12	x		x					x			x		x	921 ± 125
16	x		x						x		x		x	884 ± 122
4	x	x					x				x		x	851 ± 101
24	x				x						x		x	846 ± 122
8	x	x					x				x		x	830 ± 98
														799
20	x			x							x		x	713 ± 111
														343

Bus TPC: Bus del sistema público colectivo, Bus TM: Bus de TransMilenio, VP: Vehículo particular de carga liviana.

Paradero TPC: Paradero de buses del sistema público colectivo, Estación TM: Estación de buses de TransMilenio.

EAE: Escenario de alta exposición, EBE: Escenario de baja exposición.

E_{PM2.5}: Exposición diaria total a PM_{2.5}, I_{PM2.5}: Incertidumbre de la exposición.

Tabla 12. Exposición diaria total a CO para diferentes escenarios, valores de exposición ordenados de mayor a menor exposición.

Escenario	Exterior	TPC	TM	Taxi	VP	Paradero TPC		Estación TM		Vivienda		Oficina		E _{CO} (ppm.h)
						EAE	EBE	EAE	EBE	EAE	EBE	EAE	EBE	
														799
21	x				x					x		x		537 ±55
17	x			x						x		x		537 ±61
1	x	x					x			x		x		518 ±49
5	x	x					x			x		x		517 ±49
13	x		x						x	x		x		514 ±49
9	x		x					x		x		x		514 ±49
22	x				x					x			x	503 ±52
18	x			x						x			x	503 ±58
2	x	x					x			x		x		484 ±46
6	x	x					x			x			x	483 ±46
10	x		x					x		x			x	480 ±46
14	x		x						x	x			x	480 ±46
														206
23	x				x						x	x		103 ±13
19	x			x							x	x		102 ±19
3	x	x					x				x	x		83 ±7
7	x	x						x			x	x		82 ±7
15	x		x						x		x	x		79 ±7
11	x		x					x			x	x		79 ±7
24	x				x						x		x	69 ±10
20	x			x							x		x	68 ±16
4	x	x					x				x		x	49 ±4
8	x	x									x		x	48 ±4
12	x		x					x			x		x	45 ±4
16	x		x						x		x		x	46 ±4

Bus TPC: Bus del sistema público colectivo, Bus TM: Bus de TransMilenio, VP: Vehículo particular de carga liviana.

Paradero TPC: Paradero de buses del sistema público colectivo, Estación TM: Estación de buses de TransMilenio.

EAE Escenario de alta exposición, EBE Escenario de baja exposición.

E_{CO}: Exposición diaria total a monóxido de carbono.

Tabla 13. Combinación de escenarios en los cuales se observaron los mayores y menores valores de exposición diaria a CO y PM_{2.5}.

Exposición	Escenario
Mayor exposición a PM _{2.5}	Transporte: TransMilenio + Estación de TransMilenio de alta exposición + Oficina de alta exposición + Vivienda de alta exposición.
Menor exposición a PM _{2.5}	Transporte: Taxi + Oficina de baja exposición + Vivienda de baja exposición.
Mayor exposición a CO	Transporte: Vehículo particular + Oficina de alta exposición + Vivienda de alta exposición.
Menor exposición a CO	Transporte: TransMilenio + Estación de TransMilenio de baja exposición + Oficina de baja exposición + Vivienda de baja exposición.

Alta/baja exposición: se refiere a los microambientes seleccionados en este estudio como escenarios de alta y baja exposición en los que se midió la concentración de contaminantes.

En la Tabla 13 se muestran las combinaciones de escenarios para las cuales se obtuvieron los mayores y los menores valores de exposición para CO y para $PM_{2.5}$. La combinación de escenarios en la que se presentó la mayor exposición a $PM_{2.5}$ fue diferente a la combinación en la que se dio la mayor exposición a CO. La diferencia entre los dos casos estuvo dada por el tipo de transporte. Para el escenario más crítico de $PM_{2.5}$, el mayor aporte en transporte estuvo dado por la categoría de buses de TM más la exposición debida a la espera en la estación de TM de alta exposición, mientras que para el escenario más crítico de CO, la mayor exposición en transporte estuvo dada por la categoría de vehículos particulares.

CONCLUSIONES

- En la mayoría de microambientes caracterizados, se observaron niveles de contaminantes relativamente altos comparados con la legislación internacional. En particular se registraron altas concentraciones de material particulado.
- Se observaron altos niveles de CO al interior de viviendas, asociadas principalmente al uso de gasodomésticos en lugares con condiciones de ventilación deficiente.
- La posición de las ventanas, la posición del motor, la posición del tubo de escape y la edad de los vehículos parecen ser factores determinantes en las concentraciones de contaminantes al interior de los mismos.
- La concentración de contaminantes al interior de la cabina de los vehículos livianos, se vio fuertemente afectada por las emisiones de los vehículos que se encontraban alrededor del mismo.
- Las encuestas son un medio práctico y económico para recolectar información acerca de los patrones de actividad de la población. Es necesario utilizar intervalos de tiempo que permitan registrar adecuadamente todos los lugares en los que las personas pasan su día, aún en los que emplean fracciones de tiempo relativamente pequeñas, debido a la importancia que pueden tener en términos de exposición.
- La vivienda es un microambiente determinante en la exposición diaria total a contaminantes atmosféricos, debido a la cantidad de tiempo que las personas pasan en este espacio.
- La concentración de contaminantes varió en un rango amplio entre los diferentes microambientes. Así mismo, se determinó una variación importante en la exposición diaria total a los contaminantes bajo los diferentes escenarios evaluados. Según los microambientes caracterizados en este estudio, la diferencia en la exposición diaria total puede ser más del doble entre el mejor y el peor de los casos para $PM_{2.5}$ y para el CO la diferencia entre el mejor y el peor caso puede ser más de 10 veces.

ANEXO 1

Encuesta utilizada para recolectar la información acerca de los patrones de actividad de la población.

DIARIO DE ACTIVIDADES

Por favor diligencie este formato, registrando cada media hora las actividades desarrolladas por usted a lo largo de un día.

Edad: _____

Fecha: _____

Género:

F M

Nivel de educación:

Primaria Secundaria Superior

Estrato socioeconómico:

1 2 3 4 5 6

Ocupación: _____

HORA	UBICACIÓN											ACTIVIDADES		
	EN TRANSPORTE					NO TRANSPORTE						Breve descripción de la actividad *	FUMANDO	
	Caminando /Bicicleta	Moto	Taxi	Carro	Bus	Casa		Trabajo		Otro	Adentro		Afuera	Usted
					Adentro	Afuera	Adentro	Afuera	Cuál?	Adentro	Afuera			
0 a.m	0													
	30													
1 a.m	0													
	30													
2 a.m	0													
	30													
3 a.m	0													
	30													
4 a.m	0													
	30													
5 a.m	0													
	30													
6 a.m	0													
	30													
7 a.m	0													
	30													
8 a.m	0													
	30													
9 a.m	0													
	30													

* Ejemplo: corriendo, cocinando, estudiando, etc.

REFERENCIAS

- Adams, H.S., Nieuwenhuijsen, M.J., Colvile, R.N., McMullen, M.A.S., Khandelwal, P. (2001). Fine particle personal exposure levels in transport microenvironments, London, UK. *The Science of the Total Environment*, 279, 29-44.
- Agencia de protección ambiental de Estados Unidos. Estándares nacionales de calidad de aire. Consultado en: <http://www.epa.gov/air/criteria.html>
- Agencia de protección ambiental de Estados Unidos. 1983. Método de referencia manual: 40 CFR Parte 50, Apéndice A. Método de referencia para determinar la concentración de dióxido de azufre en la atmósfera, método de la Para-rosanilina.
- Agencia de protección ambiental de Estados Unidos. 1997. Método de referencia manual: 40 CFR Parte 50, Apéndice M. Método de referencia para la determinación de material particulado como PM₁₀ en la atmósfera.
- Behrentz, E., Fitz, D., Pankratz, D., Sabina, L., Colome, S., Fruin, S., Winer, A. (2004). Measuring self-pollution in school buses using a tracer gas technique. *Atmospheric Environment*, 38, 3735–3746.
- Bérubé, K.A., Sexton, K.J., Jones, T.P., Moreno, T., Anderson, S., Richards, R.J. (2004). The spatial and temporal variations in PM₁₀ mass from six UK homes. *Science of the Total Environment*, 324, 41-53.
- Cancino, Juliana. (2006). Validación y análisis de la información de la red de calidad del aire de Bogotá. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Universidad de los Andes.
- Chan, A., Chung, M. (2003). Indoor-outdoor air quality relationships in vehicle: effect of driving environment and ventilation modes. *Journal of Atmospheric Environment*, 37, 3795–3808.
- Corburn, J., Oslee, J., Porter, M. (2006). Urban asthma and the neighbourhood environment in New York City. *Health & Place*, 12, 167–179.

Georgoulisa, L.B., Hanninenb, O., Samolia, E., Katsouyannia, K., Polanskad, L., Bruinen, Y., de Bruine, S., Jantunen, M. (2001). Personal carbon monoxide exposure in five European cities and its determinants. *Journal of Atmospheric Environment*, 36, 963–974.

Grupo de investigaciones en transporte de la Universidad de los Andes, Entrevista con el profesor Germán Lleras, Julio 2007.

Gulliver, J., Briggs, D. (2004). Personal exposure to particulate air pollution in transport Microenvironments. *Atmospheric Environment*, 38, 1–8.

Sabin, L., Behrentz, E., Winer, A., Jeong, S., Fitz, D., Pankratz, D., Colome, S., Fruin, S. (2005). Characterizing the range of children's air pollutant exposure during school bus commutes. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 15, 377–387.

Quintana, P., Valenzia, J., Liu, L. (2001). Monitoring of 1-min personal particulate matter exposures in relation to voice-recorded time activity Data. *Environmental Research, Section A* 87, 199 – 213.

Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), Ministerio de Minas y Energía de Colombia. Noticias Sectoriales de Hidrocarburos, Noviembre de 2006. Consultado en: http://www.upme.gov.co/GroupWare/Portals/0/Sipg_21112006.pdf.

Vignati, E. Berkow ics, R., Palmgrem, F., Lyck, E., Hummelshoi, P. (1999). Transformation of size distributions of emitted particles in streets. *The science of the total environment*, 235, 37-49.

Wu, Y., Hao, J., Fu, L., Wang, Z., Tang, U. (2002). Vertical and horizontal profiles of airborne particulate matter near major roads in Macao, China. *Journal of Atmospheric Environment*, 36, 4907-4918.

Yanosky, J., Williams, P. MacIntosh, D. (2002). A comparison of two direct-reading aerosol monitors with the federal reference method for PM_{2.5} in indoor air. *Atmospheric Environment*, 36, 107–113.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer al director del proyecto, el Profesor Eduardo Behrentz, por haberme dado la oportunidad de realizar este estudio y ante todo por los aportes y enseñanzas que constantemente recibí de su parte.

De manera especial quiero darles las gracias a los estudiantes que me apoyaron durante la fase de campo de este trabajo, en particular a Ricardo Mendoza y a Jorge Maldonado.

Adicionalmente, quiero darle las gracias a las empresas que colaboraron en la logística del estudio con personal y mediante permisos para realizar mediciones en sus instalaciones y/o vehículos: TRANSMILENIO S.A. y UCOLBUS S.A.