

Niveles de material particulado en colegios distritales ubicados en vías con alto tráfico vehicular en la ciudad de Bogotá: estudio piloto

Particulate matter concentrations at public schools located near major urban roads in Bogota, Colombia: a pilot study

Juan Felipe Franco¹, Néstor Yesid Rojas², Olga Lucía Sarmiento³, Luis Jorge Hernández⁴, Elizabeth Zapata², Andrea Maldonado⁵, Leonardo Matiz⁵, Eduardo Behrent^{1}*

¹Grupo de Estudios en Sostenibilidad Urbana y Regional (SUR), Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes. Carrera 1 Este N.º 19A-40 (Piso 6), Bogotá, Colombia.

²Grupo Interuniversitario de Calidad del Aire. Departamento de Ingeniería Química y Ambiental, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Carrera 30 N.º 45-03, Edificio 453 Aulas de Ingeniería, Bogotá, Colombia.

³Área de Medicina Social, Facultad de Medicina, Universidad de los Andes, Carrera 1 N.º 18A-10 Edificio Q (Piso 8). A.A. 4976, Bogotá, Colombia.

⁴Secretaría Distrital de Salud de Bogotá. Carrera 32 N.º 12-81 (Piso4), Bogotá, Colombia.

⁵Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental (CIIA), Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes. Carrera 1 Este N.º 19A-40 (Piso 6), Bogotá, Colombia.

(Recibido el 9 de septiembre de 2008. Aceptado el 26 de mayo de 2009)

Resumen

Se presenta un estudio piloto en el que se caracterizaron los niveles de material particulado respirable (PM_{10}) en cuatro colegios distritales (CD) en Bogotá. Tres de estos CD estaban ubicados en inmediaciones de vías consideradas de alto tráfico vehicular, por las que circulan diferentes tipos de transporte público (colectivo convencional y masivo). El CD restante (utilizado como sitio control para el experimento) se encontraba ubicado sobre una vía en una zona semi-rural de la ciudad. La determinación de las concentraciones atmosféricas

* Autor de correspondencia: teléfono: + 57 + 1 + 339 49 49 ext. 3014, fax: + 57 + 1 + 332 43 13, correo electrónico: ebehrent@uniandes.edu.co (E. Behrent)

de PM_{10} se realizó utilizando técnicas de medición gravimétricas y en tiempo real. Los niveles medios de PM_{10} registrados en los CD se encuentran en un rango entre 55 y 91 $\mu g m^{-3}$. Estas cifras indican que las concentraciones del contaminante al interior de las instituciones educativas exceden los valores considerados como nocivos para poblaciones sensibles por la Organización Mundial de la Salud. Se encontraron diferencias significativas entre las concentraciones de PM_{10} encontradas en el CD seleccionado como control y las concentraciones encontradas en los otros CD. Los resultados aquí presentados corresponden a la línea base de un estudio longitudinal que aún está en desarrollo y evidencian la necesidad de continuar con investigación orientada a caracterizar el rango de concentraciones de material particulado en las inmediaciones de las principales vías de la ciudad de Bogotá.

----- *Palabras clave:* Contaminación atmosférica, mediciones en tiempo real, fuentes móviles.

Abstract

A pilot study, in which we conducted inhalable particulate matter (PM_{10}) measurements in four public elementary schools in Bogotá, is presented. Three of these schools are located alongside major urban roads with different types of public transportation. The remainder school is located alongside a rural road. PM_{10} measurements were carried out using both gravimetric and real time techniques. Average PM_{10} concentrations found in the schools ranged from 55 $\mu g m^{-3}$ to 91 $\mu g m^{-3}$. These pollutant concentrations are above the World Health Organization reference values. Significant differences in PM_{10} concentrations were observed between the schools located in urban roads and the school located in the semi-rural area. The present work corresponds to the base line results of a longitudinal study that is still being conducted. These results demonstrate the importance of continuing developing research aimed at characterizing the range of atmospheric pollutants at major city roads environs in Bogota.

----- *Keywords:* Air pollution, real-time measurements, mobile sources.

Introducción

Bogotá es reconocida como el tercer centro urbano con mayor contaminación atmosférica en América Latina [1]. El material particulado (PM) es el contaminante que presenta los niveles de concentración más altos en la ciudad, excediendo con frecuencia los estándares de calidad del aire [2, 3]. Esta situación ha generado gran preocupación en las autoridades distritales y en la comunidad local, quienes la reconocen como un problema de salud pública. Existe gran cantidad

de evidencia sobre la asociación positiva entre la exposición a altas concentraciones de PM y efectos negativos en la salud respiratoria y cardiovascular de las personas [1, 4, 5]. Estudios previos han relacionado la contaminación atmosférica por material particulado con síntomas respiratorios [6, 7], alteración de la función pulmonar [8, 9] y enfermedad pulmonar obstructiva crónica [10]. Asimismo, se considera a la población infantil como altamente vulnerable a los efectos negativos asociados con la contaminación atmosférica [11, 12, 13]. El número de estudios epide-

miológicos y de exposición relacionados con la contaminación debida al tráfico vehicular es cada vez mayor. Sin embargo, son pocos los estudios de este tipo llevados a cabo en países latinoamericanos. Gómez et al. [14], publicaron recientemente un estudio donde se evaluó la exposición a la contaminación atmosférica en el interior de diferentes sistemas de transporte urbano en la Ciudad de México. Otro estudio desarrollado en Sao Paulo [15], documentó el efecto de la exposición a la contaminación atmosférica sobre la morbilidad debida a enfermedades respiratorias en esa ciudad del Brasil. Asimismo, Bell et al. [16] realizaron una investigación en la que se cuantificaron los efectos negativos debidos a la exposición a contaminación atmosférica en tres ciudades latinoamericanas. Entre estas ciudades se encontraba, además de Ciudad de México y Sao Paulo, Santiago de Chile. Para Bogotá, el trabajo desarrollado por la Secretaría Distrital de Salud ha sido importante aunque se ha limitado a las localidades más problemáticas desde el punto de vista de contaminación atmosférica [17-19]. En 1999, Solarte [20] evaluó la asociación entre las concentraciones atmosféricas de PM_{10} y la presencia de síntomas de enfermedades respiratorias en un grupo de escolares de dos localidades de Bogotá, durante un período de tres meses. El estudio mostró que un incremento de $10 \mu g m^{-3}$ en PM_{10} estaba asociado con un incremento del 8% en las visitas hospitalarias debido a enfermedad respiratoria aguda (ERA).

Dado que las emisiones de material particulado obedecen, en gran medida, a la combustión en motores de vehículos que utilizan combustible diésel [21, 22], son de especial preocupación las concentraciones de PM encontradas en inmediaciones de vías con alto flujo vehicular. La evidencia científica ha reportado que menores de edad cuyas viviendas y colegios están ubicados cerca de vías altamente transitadas muestran una reducción en el desarrollo de su función pulmonar así como un incremento en la presencia y severidad de síntomas respiratorios [23-25]. En el caso de Bogotá, las altas concentraciones de material particulado en inmediaciones de los corredores

viales de la ciudad son debidas en un porcentaje importante a las emisiones causadas por el transporte público que opera con combustible diésel [26]. Grandes nubes de humo emitidas por los buses, camiones y vehículos, son parte de una imagen diaria en las principales vías de la ciudad. En 2006, la Cámara de Comercio de Bogotá [27] desarrolló un estudio en donde se caracterizaron los niveles de concentración de PM_{10} en la calzada de una importante y congestionada vía de la ciudad. Se reportaron valores medios de concentración que van desde los $25 \mu g m^{-3}$ hasta los $210 \mu g m^{-3}$.

Las altas concentraciones de contaminantes encontradas en las calzadas de vías con alto tráfico vehicular son entonces uno de los aspectos de mayor impacto en la contaminación del aire en Bogotá. Esta situación persiste hoy en día a pesar del cambio en el sistema de transporte público y en la calidad de los combustibles en la ciudad.

El objetivo de este estudio es caracterizar los niveles de concentración de PM_{10} a los que están expuestos los menores en edad escolar en Colegios Distritales (CD) ubicados sobre corredores viales considerados de alto tráfico en la ciudad de Bogotá. Los resultados de este trabajo constituyen el estudio piloto de un proyecto longitudinal en el que se está evaluando si los recientes cambios en el sistema de transporte público en la ciudad presentan alguna asociación con los niveles de contaminación del aire en las inmediaciones de las vías y su subsiguiente efecto sobre la calidad de vida, salud respiratoria, acondicionamiento cardiorespiratorio y función pulmonar de la población infantil escolarizada de la ciudad.

Metodología

Zonas geográficas de muestreo

Se seleccionaron cuatro colegios distritales ubicados en diferentes localidades de la ciudad. Tres de estas instituciones estaban ubicadas sobre vías principales de la ciudad, consideradas de alto tráfico vehicular y una sobre una vía de bajo flujo vehicular en zona semi-rural. La primera institu-

ción se encuentra ubicada sobre un eje vial con relativamente bajo flujo vehicular en un área con baja contaminación atmosférica (CD1); la segunda, sobre un eje vial (Avenida Boyacá) con circulación de transporte público colectivo (buses y busetas) (CD2); la tercera, sobre un eje vial con circulación de transporte público colectivo (Calle 26), que será convertido al sistema de transporte público masivo TransMilenio durante la tercera fase de su construcción (CD3); la cuarta institución se localizó sobre un eje vial (Calle 80) en el que ya circula el sistema de transporte público masivo TransMilenio (CD4). Los CD que participaron en el estudio se seleccionaron a partir de un análisis cuidadoso de las 737 instituciones pertenecientes al programa distrital de Escuelas Generadoras de Calidad de Vida, de la Secretaría Distrital de Salud de Bogotá. Cada institución fue geocodificada utilizando un sistema de información geográfica (ArcGis 9.1; ESRI®, USA). Del total de instituciones con que se contaba, se preseleccionaron 23 colegios localizados a menos de 100 metros de las vías de interés. Se realizaron recorridos de reconocimiento a dichos CD, con el fin de identificar la cercanía a la vía de interés (la entrada a los CD debería estar entre 0 y 10 metros de distancia de la vía) y el género y el grado escolar (a los CD deberían acudir estudiantes de ambos sexos y contar con grados académicos de primaria y secundaria). Adicionalmente los CD a seleccionar no deberían estar ubicados en las localidades Puente Aranda, Kennedy y Fontibón. Esto se debe a que dichas localidades son consideradas, según los registros históricos de la Secretaría Distrital de Ambiente, como las de mayor contaminación atmosférica en la ciudad. Asimismo, no se deberían estar realizando construcciones o reparaciones físicas a las edificaciones de ninguna de las instituciones seleccionadas.

Una vez realizados los recorridos de reconocimiento se procedió a realizar la selección de las cuatro instituciones que hicieron parte de este estudio. La figura 1 presenta un mapa de Bogotá en donde se encuentra la ubicación geográfica de los cuatro CD seleccionados. Adicionalmente en la tabla 1 se resumen las características propias de cada CD.

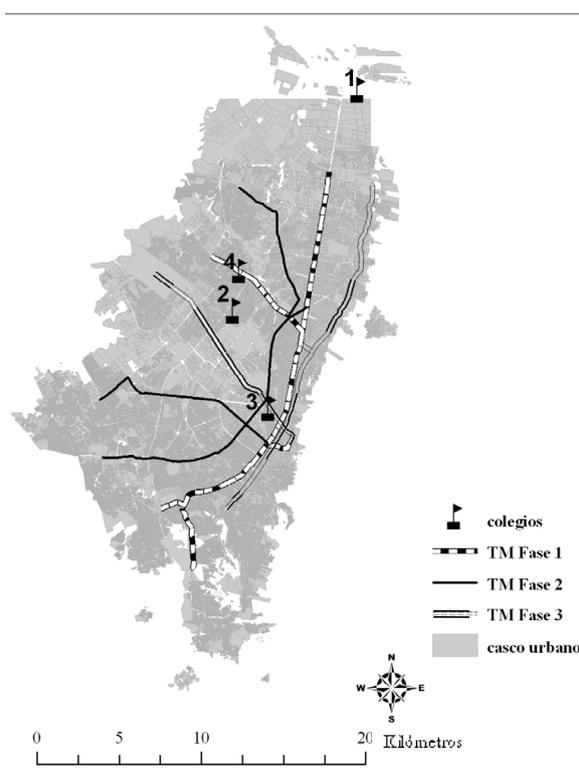


Figura 1 Mapa de Bogotá con la ubicación de los colegios distritales seleccionados. Las líneas en el mapa representan los corredores viales de las primeras tres fases del sistema de transporte masivo TransMilenio

Métodos de muestreo de calidad del aire

Se desarrollaron dos campañas de medición: de agosto a noviembre de 2006 y de febrero a mayo de 2007. Las mediciones se realizaron en períodos de 8 horas, correspondientes a la jornada escolar de los menores. Los equipos de medición se ubicaron en el punto más cercano a la vía de interés dentro de cada CD y se determinaron concentraciones de material particulado respirable PM_{10} utilizando tanto técnicas de lectura directa (en tiempo real) como de muestras integradas (haciendo uso de métodos gravimétricos). Las concentraciones en tiempo real se obtuvieron con un fotómetro portátil DustTrak modelo 8520 (TSI Inc., St. Paul, MN, USA). Este equipo opera a un flujo de $1,7 \text{ l min}^{-1}$, tiene una resolución

temporal ajustable hasta de 1 segundo y un límite de detección inferior a $2 \mu\text{g m}^{-3}$. Procedimientos de revisión de flujo de operación y verificación del cero se realizaron todos los días de muestreo antes y después de finalizada la medición. Periódicamente se efectuaron las operaciones de mantenimiento especificadas en el manual del equipo. Las mediciones con muestras integradas se realizaron utilizando muestreadores de área conocidos como impactadores tipo Harvard (MS&T area sampler; Air. Diagnostics Inc., Harrison, USA), operando a un flujo de 10 l min^{-1} . El flujo de operación se midió antes y después de realizada la medición con un rotámetro Matheson de alta precisión modelo FM-1050. La muestra fue recolectada en un filtro de teflón de 37 mm

de diámetro y 2 micras de poro. La determinación gravimétrica de la concentración de PM_{10} se efectuó pesando los filtros antes y después de la medición en una balanza analítica Sartorius modelo M5P-000V001 de seis dígitos, ubicada en un cuarto especialmente acondicionado para este tipo de procedimientos. Los filtros fueron acondicionados antes de ser pesados en el laboratorio a una temperatura de $23 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ y a una humedad relativa de 45%. El montaje y desmontaje de los filtros en los portafiltros fue realizado en el laboratorio con todas las medidas necesarias para evitar daños en los filtros y la pérdida o contaminación de las muestras. Se utilizaron blancos de campo dos veces por semana en cada punto de muestreo y blancos de laboratorio cada semana.

Tabla 1 Caracterización de los CD participantes en el estudio*

	<i>Área (m²)</i>	<i>Eje vial</i>	<i>Condición de flujo vehicular</i>	<i>Ubicación geográfica en la ciudad</i>	<i>Número de alumnos</i>	<i>Jornada de estudio</i>
CD1	10.100	semi-rural	Bajo	Norte	640	Mañana
CD2	3.700	Avenida Boyacá	Alto	Noroccidente	325	Mañana y Tarde
CD3	2.800	Calle 26	Alto	Centro oriente	826	Mañana y Tarde
CD4	10.000	Calle 80	Alto	Noroccidente	405	Mañana y Tarde

* Los cuatro CD seleccionados estaban ubicados en zonas de la ciudad correspondientes a estrato socio-económico tres.

Aforos vehiculares

Se llevaron a cabo aforos vehiculares en las vías sobre las que están ubicados los CD participantes de este estudio. Estos aforos tenían el objetivo de clasificar y cuantificar el tráfico de vehículos que circula por dichos corredores viales. Para ello se realizaron grabaciones con una cámara digital de video con la que se documentó el tráfico vehicular que circulaba por cada vía durante cuatro horas diarias, por tres días diferentes. En total se obtuvieron 12 horas de video por cada institución educativa. Los vehículos fueron separados en cinco categorías: vehículos particulares, camiones, buses, motos y buses articulados de transporte masivo. Con las categorías de vehí-

culos establecidas, se realizaron los conteos por categoría, calzada y colegio. Todos los aforos fueron realizados por duplicado con el propósito de incrementar la confiabilidad de los resultados. Se analizó la confiabilidad entre los conteos independientes a través del cálculo del coeficiente de correlación intraclásica (ICC).

Análisis estadístico

El proceso de análisis estadístico de la información de concentración de PM_{10} inició con la evaluación de la distribución y la identificación de valores extremos y no plausibles. Se realizó un análisis descriptivo de la información de concentraciones PM_{10} en tiempo real así como la prove-

niente de muestras integradas. Dado el efecto de conglomerado existente en los datos de cada CD, la prueba de comparación de medias de concentración de PM_{10} se realizó utilizando el procedimiento PROC MIXED en el paquete estadístico SAS 9.1 (SAS Institute, Cary, NC, USA).

Resultados y discusión

Clasificación del tráfico vehicular

En la tabla 2 se presentan los resultados del conteo y clasificación de los vehículos que circulan por las distintas vías sobre las que están localizados los CD de estudio. Para todos los conteos realizados el ICC estuvo en un rango comprendido entre el 72% y el 100%. La información aquí presentada permite contextualizar lo que significa un corredor vial de alta congestión vehicular en la ciudad de Bogotá. El flujo total de vehículos para las vías definidas como de alto tráfico se situó entre los 5.200 y los 7.500 vehículos por hora. De

la clasificación realizada se observó que los vehículos de transporte público representan entre el 9 y el 12% del tráfico total en las vías por donde circula transporte público colectivo (vías sobre las que se encuentran ubicados los CD2 y CD3). Por otra parte los buses articulados del sistema de transporte masivo TransMilenio representan tan solo el 3% del total de vehículos por hora que circulan por el corredor vial sobre el que se encuentra localizado el CD4.

A partir de los resultados mostrados de la tabla 2 se concluye la diferencia (en cantidad de vehículos por hora y su clasificación) entre la vía sobre la que se encuentra localizada la institución seleccionada como control CD1 y las vías sobre las que están ubicadas los CD restantes (CD2, CD3, CD4). Como se discutirá más adelante, se sugiere que esta diferencia en flujo y clasificación de los vehículos, es determinante de la magnitud de las concentraciones de PM encontradas en cada institución educativa.

Tabla 2 Clasificación del tráfico vehicular (vehículos / hora) que circula por la vía sobre la que está localizado cada CD

<i>Categoría</i>	<i>CD1</i>	<i>CD2*</i>	<i>CD3</i>	<i>CD4</i>
Buses y busetas	34	858	614	271
Buses articulados	N/A	N/A	N/A	163
Camiones	52	247	213	266
Vehículos de pasajeros**	221	5.808	5.810	3.954
Motos	25	543	664	570
Total vehículos	332	7.456	7.301	5.224

* Información de aforos realizados por la Secretaría Distrital de Movilidad

** La categoría vehículos de pasajeros incluye taxis

Comparación entre colegios: información en tiempo real

La figura 2 presenta un ejemplo de concentraciones de PM_{10} en tiempo real para los cuatro CD que fueron estudiados. En ésta se comparan las concentraciones obtenidas durante un período de medición (equivalente a una jornada escolar de los menores) en cada uno de los CD. Esta figura

permite apreciar el dinámico comportamiento de la concentración de PM_{10} , el cual es propio de este contaminante cuando se registra su concentración en puntos de relativa cercanía a una fuente de emisión. Los resultados ilustrados en la figura 2 muestran que las concentraciones encontradas en CD2, CD3 y CD4 (instituciones ubicadas sobre vías con alto tráfico vehicular) presentan valores

extremos de concentración que superan incluso los $100 \mu\text{g m}^{-3}$. Estas concentraciones extremas superan en magnitud a las registradas en el CD1, lo que permite sugerir que hay una diferencia entre los niveles de contaminación presente en los CD ubicados sobre corredores viales con alto flujo vehicular y el CD control.

A partir del análisis de los instantes en donde se presentan estos valores de concentración considerados como extremos, se puede demostrar como para CD2 y CD3 el 20% del tiempo de medición se obtuvieron concentraciones de PM iguales o superiores a los $100 \mu\text{g m}^{-3}$. Mientras tanto, en CD4 sólo el 10% del tiempo de monitoreo se registraron concentraciones superiores a este valor de referencia. Esta primera aproximación demuestra lo que podría ser una consecuencia directa de la diferencia en la cantidad y clasificación de los vehículos que circulan por la vía sobre la que se encuentra cada institución (Tabla 2). Esta situación se ejemplifica claramente en las horas finales del período de medición que se muestra en la figura 2. Durante este tiempo las concentraciones registradas en CD4 son menores que las registradas para CD2 y CD3.

La diferencia en niveles de contaminación por PM que se sugiere ya fue identificada previamente en otro estudio para Bogotá [27]. En éste los autores reportan una diferencia significativa entre las concentraciones de PM_{10} registradas al lado de una vía donde predomina el transporte público colectivo (Carrera Séptima) y las registradas en inmediaciones de un corredor vial de uso exclusivo del sistema de transporte masivo TransMilenio (Avenida Caracas).

La figura 2 también muestra que, durante un porcentaje significativo de la jornada escolar, las concentraciones de PM_{10} registradas en las instituciones educativas superan los valores de referencia dictados por la Organización Mundial de la Salud (OMS) ($20 \mu\text{g m}^{-3}$ para un período de referencia de 1 año y $50 \mu\text{g m}^{-3}$ para un período de referencia de 24 horas). Esta situación es particularmente recurrente en aquellas instituciones

que se encuentran sobre vías con alto tráfico vehicular.

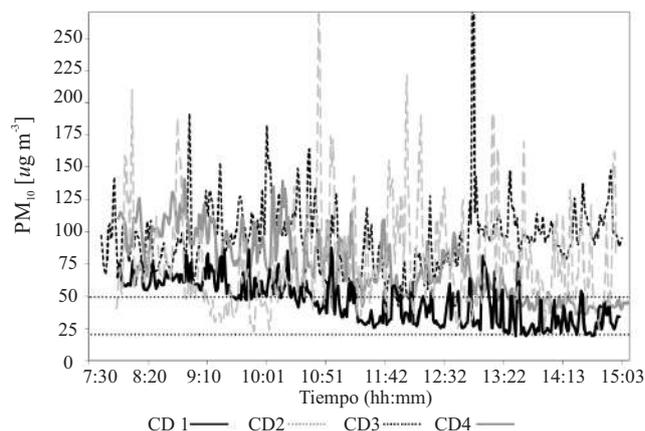


Figura 2 Concentraciones de PM_{10} ($\mu\text{g m}^{-3}$) para los cuatro CD participantes del estudio. CD1 ubicado en zona control de bajo flujo vehicular. CD2 y CD3 ubicados en inmediaciones de vía con transporte público colectivo convencional. CD4 ubicado en inmediaciones de vía con transporte público mixto (colectivo y masivo). Las líneas punteadas representan los valores límite considerados por la OMS como nocivos para poblaciones sensibles ($20 \mu\text{g m}^{-3}$ y $50 \mu\text{g m}^{-3}$)

A pesar de que no se ha identificado un valor de concentración de PM debajo del cual no haya efectos adversos en la salud de las personas, la OMS propone que concentraciones de PM_{10} que se encuentren entre los 20 y $50 \mu\text{g m}^{-3}$ deben ser consideradas nocivas para poblaciones sensibles, tales como los menores de edad.

Comparación entre colegios

La figura 3 presenta la media y el intervalo de confianza del 95% para todas las concentraciones de PM_{10} encontradas a partir de las mediciones gravimétricas, en el punto más próximo a la vía de interés al interior de cada CD. La figura 3 muestra también la media y el intervalo de confianza del 95% para las concentraciones de PM_{10} reportadas por la estación de la red de monitoreo de calidad del aire de Bogotá más cercana a cada

CD. Este valor medio corresponde al obtenido para las ocho horas de los mismos días en que fueron llevadas a cabo las mediciones integradas en cada CD. Se aprecia que las concentraciones medias de PM_{10} obtenidas en las instituciones ubicadas sobre vías con alto tráfico vehicular (CD2, CD3 y CD4) son significativamente mayores ($p=0,012$) que las registradas en el CD 1 (institución control). Sin embargo, no se aprecian diferencias significativas entre éstas. Los valores diarios obtenidos gravimétricamente estuvieron entre los 87 y 91 $\mu g m^{-3}$ para los colegios ubicados sobre vías con alto tráfico vehicular, en el punto más cercano a la vía de interés dentro de cada CD. Mientras tanto, el valor medio para la institución ubicada en la zona con bajo flujo de vehículos fue de 55 $\mu g m^{-3}$. Estas diferencias pueden estar asociadas con el tipo y cantidad de tráfico vehicular que circula por las vías de interés (Tabla 2).

Las concentraciones medias reportadas por la estación de la red de monitoreo de la calidad del aire más próxima a cada colegio son menores que las concentraciones medias obtenidas por las mediciones gravimétrica realizadas para este estudio, excepto para la CD1. De la misma manera, para CD2 y CD3 la diferencia entre la concentración base (reportada por la estación de monitoreo más cercana) y la concentración media de los ensayos realizados en este estudio, es mayor que para CD4. Esta evidencia puede ser un indicador de la importancia y el impacto que las emisiones de los vehículos que circulan por la vía, tienen sobre las concentraciones de PM registradas en cada CD. Siendo dicho impacto de mayor magnitud en las instituciones ubicadas sobre vías donde el número de buses del transporte público colectivo es mayor (CD2 y CD3).

Al igual que para las series de tiempo analizadas anteriormente, al comparar las concentraciones gravimétricas registradas en cada colegio, los valores medios de material particulado son superiores a los valores de referencia que la OMS considera como perjudiciales para poblaciones sensibles. Esta situación es de especial preocupación si se considera que para en los cuatro CD participantes en este estudio, los menores per-

manecen cerca de ocho horas diarias y siendo el punto más cercano a la vía de interés en el interior del colegio una zona recreativa o un patio de juegos.

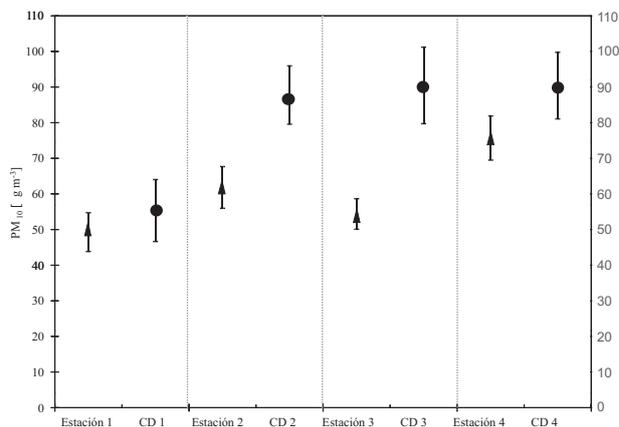


Figura 3 Media e intervalo de confianza del 95% para las concentraciones de PM_{10} ($\mu g m^{-3}$) registradas en cada CD a partir de muestras integradas en cada institución (●) y para las concentraciones obtenidas de la estación de la red de monitoreo más cercana a cada colegio (▲). CD2 y CD3 ubicados en inmediaciones de vías con transporte público colectivo convencional. CD4 ubicado en inmediaciones de una vía con transporte público mixto (colectivo y masivo), CD1 ubicado en una zona control de bajo flujo vehicular

Representatividad y precisión de las técnicas analíticas utilizadas

Con el objetivo de comparar los resultados obtenidos con las dos técnicas de medición utilizadas para la determinación de las concentraciones de PM_{10} en este estudio se llevaron a cabo 31 experimentos de ocho horas continuas con ambos equipos operando simultáneamente. Se determinó además la proporción entre la concentración media del DustTrak y el valor medio de la muestra integrada. Esta proporción varía en un rango entre 0,3 y 4,8. Quince de los experimentos realizados tienen un valor para dicha proporción cercano a la unidad (1 ± 0.2). En 19 de los ensayos realizados la concentración obtenida con el Impactador Harvard fue mayor al valor medio reportada por el

DustTrak. Así entonces, se aprecia una diferencia notable en algunos de los experimentos realizados, entre la información registrada en tiempo real y los datos gravimétricos. Es por esta razón que según lo reportado en la literatura, el DustTrak es un instrumento para obtener medidas de concentración relativas que se consideran útiles en la determinación de tendencias y en la caracterización de eventos específicos de contaminación [28]. Además, se ha reconocido plenamente una importante ventaja en el uso de estos equipos para monitoreo en espacios intramurales, dadas sus dimensiones y principio de operación. Sin embargo, es significativo resaltar que, debido a las limitaciones antes mencionadas se deben validar las mediciones establecidas con este tipo de equipos.

Conclusiones y recomendaciones

El análisis realizado en este estudio piloto sugiere que los niveles de concentración de material particulado en las inmediaciones de los colegios distritales evaluados son elevados y superiores a los valores de referencia que han sido considerados como nocivos para la salud de poblaciones sensibles por la OMS. Las concentraciones registradas son de especial preocupación teniendo en cuenta que los menores permanecen en sus instituciones educativas por periodos de ocho horas o más.

Se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre las concentraciones de PM_{10} encontradas en el colegio distrital seleccionado como control y las concentraciones encontradas en los otros tres colegios. Esta situación está relacionada con la diferencia en la cantidad de tráfico vehicular que circula por la vía sobre la que se encuentra ubicado el CD (en especial de vehículos que operan con diésel como combustible). A partir de la información en tiempo real se pudo sugerir que esta diferencia es mayor para los CD ubicados en vías con presencia predominante de transporte público colectivo.

A partir de los aforos vehiculares se pudo contextualizar el significado de una vía de alto tráfico para Bogotá. La cantidad de vehículos que circulan por la vía de interés se sugirió como ele-

mento determinante de las diferencias entre las concentraciones de PM registradas en los CD estudiados.

Los resultados aquí presentados hacen parte de la información de línea de base para una investigación diseñada longitudinalmente que aún está en desarrollo. Esta información constituirá evidencia científica para Bogotá que permita establecer la magnitud de la posible asociación entre el tipo de transporte público que circula por la vía y la calidad del aire percibida en inmediaciones de ésta. Los autores consideran que los esfuerzos conjuntos que permitan darle continuidad a proyectos de caracterización de las concentraciones de contaminantes atmosféricos, así como de los niveles de exposición a éstos, se verán reflejados en beneficios importantes y de impacto directo en las políticas de salud pública para la ciudad.

Agradecimientos

Este estudio fue financiado por COLCIENCIAS (código del proyecto 1204-04-18148), la convocatoria conjunta del año 2007 del Centro de Estudio en Información en Salud de la Fundación Santa Fe de Bogotá y la Facultad de Medicina de la Universidad de Los Andes, la Universidad Javeriana, la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá y el Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental (CIIA) de la Universidad de Los Andes. Los autores agradecen a los cuatro colegios distritales participantes (CD Panamericano, CD Torca, CD La Palestina y CD Robert F. Kennedy). Se agradece a las personas y entidades que aportaron en el desarrollo de este estudio, al Dr. Gustavo Aristizábal de la Secretaría Distrital de Salud, al Dr. Juan Carlos Correa de la Fundación Santa Fe de Bogotá, a la Dra. Marisol Téllez de la Universidad del Bosque y al Dr. Iván Solarte de la Universidad Javeriana. Un reconocimiento especial a los estudiantes del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad Nacional sede Bogotá y a los estudiantes de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Los Andes, quienes participaron como asistentes de investigación en las campañas de medición del estudio.

Referencias

1. Organización Panamericana de la Salud. *Evaluación de los Efectos de la Contaminación del Aire en la Salud de América Latina y el Caribe*. Washington. 2005. pp. 24.
2. Alcaldía Mayor de Bogotá. Secretaria Distrital de Ambiente. *Informe anual de calidad del aire de Bogotá 2006*. 2007. Bogotá D.C. pp. 2-18.
3. M. Gaitán, J. Cancino, E. Behrentz. "Análisis de la calidad del aire en Bogotá". *Revista de Ingeniería Universidad de Los Andes*. Vol. 26. 2007. pp. 81-92.
4. L. Neas. "Fine particulate matter and cardiovascular diseases". *Fuel Processing Technology*. Vol. 65-66. 2000. pp. 55-67.
5. World Health Organization (WHO). *Air quality guidelines global update*. Copenhagen. 2005. pp. 57-92.
6. L. Calderón-Garciduenas, A. Mora-Tiscareno, L.A. Fordham, C.J. Chung, A. Rodríguez-Alcaraz, R. Paredes, D. Variakojis, A. Villareal-Calderon, L. Flores-Camacho, A. Antunez-Solis, C. Henríquez-Roldán, M. J. Hazucha. "Respiratory damage in children exposed to urban pollution". *Pediatric Pulmonology*. Vol. 36. 2003. pp. 148-161.
7. J. M. Peters, E. Avol, W. Navidi, S.J. London, W.J. Gauderman, F. Lurmann, W. Linn, H. Margolis, E. Rappaport, H. Gong, Jr. y D.C. Thomas. "A study of twelve Southern California communities with differing levels and types of air pollution. I. Prevalence of respiratory morbidity". *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*. Vol. 159. 1999. pp. 760-767.
8. L. Calderón-Garciduenas, A. Mora-Tiscareno, L.A. Fordham, C.J. Chung, G. Valencia-Salazar, Silvia Flores-Gómez, Anna C. Solt, Alberto Gómez-del Campo, R. Jardón-Torres, C. Henríquez-Roldán, M. J. Hazucha, W. Reed. "Lung radiology and pulmonary function of children chronically exposed to air pollution". *Environmental Health Perspectives*. Vol. 114. 2006. pp. 1432-1437.
9. J. M. Peters, E. Avol, W. J. Gauderman, W. S. Linn, W. Navidi, S. J. London, H. Margolis, E. Rappaport, H. Vora, H. Gong, Jr., D.C. Thomas. "A study of twelve Southern California communities with differing levels and types of air pollution". II. Effects on pulmonary function". *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*. Vol 159. 1999. pp. 768-775
10. F. Holguin, S. Flores, Z. Ross, M. Cortez, M. Molina, L. Molina, C. Rincón, M. Jerrett, K. Berhane, A. Granados, I. Romieu. "Traffic-related exposures, airway function, inflammation, and respiratory symptoms in children". *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*. Vol. 176. 2007. pp. 1236-1242.
11. J. J. Kim. "Ambient air pollution: health hazards to children". *Pediatrics*. Vol. 114. 2004. pp. 1699-1707.
12. J. Schwartz. "Air pollution and children's health". *Pediatrics*. Vol. 113. 2004. pp. 1037-1043.
13. World Health Organization (WHO). *Children at risk: Main health effects of exposure to environmental risk factors*. Copenhagen. 2003. pp 1-5.
14. J. E. Gómez-Perales, R.N. Colvile, A. A. Fernández-Bremauntz, V. Gutiérrez-Avedoy, V. H. Páramo-Figueroa, S. Blanco-Jiménez. E. Bueno-López, R. Bernabé-Cabanillas, F. Mandujano, M. Hidalgo-Navarro, M. J. Nieuwenhyjsen. "Bus, minibús, metro inter-comparison of commuters' exposure to air pollution in Mexico City". *Atmospheric Environment*. Vol. 41. 2007. pp. 890-901.
15. F. L. T. Goncalves, L. M. V. Carvalho, F. C. Conde, M. R. Latorre, P. H. Saldiva, A. L. Braga. "The effects of air pollution and meteorological parameters on respiratory morbidity during the summer in Sao Paulo City". *Environment International*. Vol. 31. 2005. pp. 43-349.
16. M. L. Bell, D. L. Davis, N. Gouveia, V. H. BorjaAburto, L. A. Cifuentes. "The avoidable health effects of air pollution in three Latin American cities: Santiago, Sao Paulo, and Mexico City". *Environmental Research*. Vol. 100. 2006. pp. 431-440.
17. Alcaldía Mayor de Bogotá. Secretaría Distrital de Salud de Bogotá (SDS). *Boletín ERA*. No. 17. 2005. pp. 1-6.
18. N. Lozano. "Air pollution in Bogota, Colombia: A concentration-response approach". *Desarrollo y Sociedad*. Vol. 54. 2004. pp. 133-177.
19. A. Arciniégas, C. Rodríguez, J. Pachón, H. Sarmiento, L. J. Hernández. Estudio de la morbilidad en niños menores a cinco años por enfermedad respiratoria aguda y su relación con la concentración de partículas en una zona industrial de la ciudad de Bogotá. *Acta Nova*. Vol. 3. 2006. pp 145-154.
20. I. Solarte, M. Caicedo, S. Restrepo. "Contaminación atmosférica y enfermedad respiratoria en niños menores de 14 años en Santa Fe de Bogotá". *Revista Médica Sanitas*. Vol. 5. 2002. pp. 2-21.
21. D. Westerdahl, S. Fruin, T. Sax, C. Sioutas. «Mobile platform measurements of ultrafine particles and

- associated pollutant concentrations on freeways and residential streets in Los Angeles». *Atmospheric Environment*. Vol. 39. 2005. pp. 3597-3610.
22. L. T. Baldassarri, C. L. Battistelli, L. Conti, R. Crebelli, B. De Berardis, A. L. Iamiceli, M. Gambino, S. Iannaccone. "Evaluation of emission toxicity of urban bus engines: Compressed natural gas and comparison with liquid fuels". *Science of the Total Environment*. Vol. 355. 2006. pp. 64-77.
23. W. J. Gauderman, E. Avol, F. Gilliland, H. Vora, D. Thomas, K. Berhane, R. McConnell, N. Kuenzli, F. Lurmann, E. Rappaport, H. Margolis, D. Bates y J.Peters. "The effect of air pollution on lung development from 10 to 18 years of age". *The New England Journal of Medicine*. Vol. 351. 2004. pp. 1057-1067.
24. J. J. Kim, S. Smorodinsky, M. Lipsett, B. C. Singer, A. T. Hodgson, B. Ostro. "Traffic-related air pollution near busy roads: the East Bay Children's Respiratory Health Study". *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*. Vol. 170. 2004. pp. 520-526.
25. S. Van Roosbroeck, J. Wichmann, N.A.H. Janssen, G. Hoek, J.H. van Wijnen, E. Lebret y B. Brunekreef. "Long-term personal exposure to traffic-related air pollution among school children, a validation study". *Science of the Total Environment*. Vol. 368. 2006. pp. 565-573.
26. L. Giraldo, A. Ardila, E. Behrentz. "Estimación del inventario de fuentes móviles para la ciudad de Bogotá e identificación de variables pertinentes". Ed. Universidad de los Andes. Bogotá. 2006. pp. 19-44.
27. Cámara de Comercio de Bogotá. Programa Acercar Transporte. *Concentraciones de material particulado respirable suspendido en el aire en inmediaciones de una vía de transporte público colectivo*. Bogotá. 2006. pp.12-37.
28. L. Morawska, C. He, J. Hitchins, D. Gilbert, S. Parappukkaran. "The relationship between indoor and outdoor airborne particles in the residential environment". *Atmospheric Environment*. Vol. 35. 2001. pp. 3463-3473.