

Concentraciones de material particulado fino en microambientes comunitarios e intradomiciliarios en Bucaramanga, Colombia

Víctor M. Herrera,
MD, PhD*
Laura A. Rodríguez-Villamizar,
MD, PhD**
Kento T. Mágara Gómez,
Ing. PhD***



Resumen

El material particulado fino ($PM_{2.5}$) es el contaminante criterio del que se han reportado asociaciones estadísticas más consistentes con efectos adversos sobre la salud. En Colombia, el material particulado es el contaminante extra-domiciliario de mayor preocupación, sin embargo, los estudios nacionales han sido limitados en estudiar las concentraciones de $PM_{2.5}$ dado que su medición es limitada en ciudades diferentes a Bogotá. El objetivo del estudio fue caracterizar el nivel y la variación de la exposición a $PM_{2.5}$ intradomiciliario y comunitario en dos zonas de Bucaramanga, Colombia. Se realizó un estudio observacional de corte transversal en el que se evaluó una muestra de población adulta no fumadora residente en dos sectores de la ciudad de Bucaramanga. Para el monitoreo de aire comunitario se instaló un muestreador de volumen

medio en cada uno de los dos sectores del estudio. Para la medición de la concentración de $PM_{2.5}$ intradomiciliario se utilizaron bombas de monitoreo atmosférico para microambientes por dos días consecutivos. El nivel promedio de contaminación comunitaria por $PM_{2.5}$ medido en el sector del barrio La Joya fue $18.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (rango: $10.9 - 38.0$) y en el sector correspondiente a los barrios La Concordia, San Miguel y Ricaurte el promedio de contaminación ambiental fue $22.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (rango: $15.2 - 108.6$). En relación a la exposición intradomiciliaria a $PM_{2.5}$ la concentración media fue $20.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (rango: $10.9 - 38.0$) después de excluir mediciones con tiempo de muestreo <8 horas/día, sin diferencias estadísticamente significativas entre los dos sectores. En el barrio La Joya los promedios intradomiciliarios semanales superaron a los comunitarios ($23.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ versus $19.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $p=0.003$). La media de las concentraciones diarias de $PM_{2.5}$ a nivel comunitario en los dos sectores de estudio están por debajo de los límites permitidos por la norma de calidad de aire colombiana

*Facultad de Ciencias de la Salud, Universidad Autónoma de Bucaramanga (UNAB)

**Departamento de Salud Pública, Universidad Industrial de Santander (UIS)

***Escuela de Ingeniería Ambiental, Universidad Pontificia Bolivariana (UPB)

pero en el límite de los niveles límites permisibles de las guías de la Organización Mundial de la Salud. La media de las concentraciones diarias de $PM_{2.5}$ a nivel intradomiciliario con frecuencia exceden el límite permisible por las dos normas y en el sector de La Joya las concentraciones de $PM_{2.5}$ intradomiciliarias exceden las comunitarias de manera significativa, probablemente relacionadas con actividades específicas al interior de las viviendas.

Introducción

La contaminación del aire se define como la contaminación del ambiente interior o exterior por cualquier agente químico, físico o biológico que modifique las características naturales de la atmósfera⁽¹⁾. Las fuentes de la contaminación del aire exterior pueden ser naturales o antropogénicas. Dentro de las fuentes naturales se encuentran las emisiones volcánicas, la erosión y los incendios forestales. Las fuentes antropogénicas se clasifican según su proveniencia en fuentes fijas y fuentes móviles. Las primeras están relacionadas principalmente con la industria y las segundas con el tráfico vehicular. La contaminación proveniente del desarrollo industrial, el comportamiento humano, el desarrollo urbano y el tráfico vehicular representan la principal fuente de contaminación del aire exterior⁽¹⁾. En Colombia, el desarrollo industrial y el tráfico vehicular son las causas principales de la contaminación del aire en las ciudades principales⁽²⁾.

Existe un grupo de contaminantes denominados contaminantes criterio del aire (CAP, por sus siglas en inglés) que representan riesgo para la salud humana, razón por la cual son monitoreados en los sistemas de vigilancia de calidad de aire, los CAP son: monóxido de carbono (CO), ozono troposférico (O_3), óxidos de nitrógeno (NOx), dióxido de azufre (SO₂) y partículas con un diámetro aerodinámico medio de 10 micras (PM_{10}), o de 2.5 micras ($PM_{2.5}$)⁽³⁾. La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA)⁽⁴⁾ y la Organización Mundial de la Salud (OMS)⁽⁵⁾ han definido unas guías y estándares de calidad del aire a nivel internacional para los CAP, con el fin de minimizar los efectos adversos sobre la salud relacionados con la contaminación del aire. En Colombia, la resolución 610 de 2010 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial establece la actualización de la Norma de Calidad del Aire o Nivel de Inmisión y define los niveles máximos permisibles para los CAP en el país⁽⁶⁾.

La contaminación del aire exterior ha sido asociada con el aumento en la incidencia, exacerbación y mortalidad por enfermedades cardiovasculares y respiratorias

como asma, enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC), cáncer de pulmón, infarto agudo de miocardio, insuficiencia cardíaca y enfermedad cerebrovascular⁽⁷⁻¹⁴⁾.

El material particulado fino ($PM_{2.5}$) es el contaminante criterio del que se han reportado asociaciones estadísticas más consistentes con efectos adversos sobre la salud, lo cual se explica en gran parte por su capacidad de penetrar las vías aéreas inferiores y de despertar una respuesta inflamatoria y oxidativa local y sistémica^(7, 9, 15). Adicionalmente, la contaminación por material particulado ha sido identificada por la Agencia Internacional de Investigación en Cáncer (IARC, por sus siglas en inglés) como un agente cancerígeno para los humanos⁽¹⁶⁾.

Desde la década de los ochenta se han desarrollado estudios para evaluar la exposición a material particulado en diferentes microambientes (comunidad, extradomicilio, intradomicilio) y la exposición personal⁽¹⁷⁻²⁰⁾. Estos estudios han mostrado que la exposición personal a material particulado excede las concentraciones del extradomicilio e intradomicilio, que las correlaciones entre la exposición personal y extradomiciliaria son débiles, y que las relaciones entre las concentraciones de los diferentes microambientes varían de manera importante dependiendo de la localización geográfica, el tipo de población, la distribución del tamaño de las partículas y los patrones de actividad humana.

En Colombia, el material particulado es el contaminante extra-domiciliario de mayor preocupación dadas sus altas concentraciones. De acuerdo con el informe del estado de la calidad de aire en Colombia 2007-2010⁽²¹⁾, la concentración promedio anual de PM_{10} en 2010 varió entre ciudades con un rango entre 25 y 60 $\mu g/m^3$. Estudios en diferentes ciudades del país han demostrado la asociación entre el incremento de los niveles de PM_{10} y los efectos respiratorios^(22, 23), cardiovasculares⁽²⁴⁾ y la mortalidad^(25, 26). Hasta ahora, sin embargo, los estudios nacionales han sido limitados en establecer asociaciones entre efectos adversos en salud y concentraciones de $PM_{2.5}$ dado que el monitoreo de este contaminante se introdujo recientemente en los sistemas de vigilancia de calidad de aire y su medición es limitada en ciudades diferentes a Bogotá. Adicionalmente, no se dispone en el país de estudios que evalúen las relaciones entre las concentraciones de $PM_{2.5}$ en diferentes microambientes. La disponibilidad de esta información sería de gran utilidad para determinar la contribución de las fuentes extradomiciliarias en las concentraciones intradomiciliarias y personales, y apoyar la toma de decisiones en materia regulatoria y en la aplicación a intervenciones de protección de la salud.

El presente trabajo se enmarca en el proyecto titulado «Efecto de la exposición extra- e intra-domiciliaria a

contaminación por material particulado con diámetros aerodinámicos menores de 2.5 micras en los niveles de presión arterial de 24 horas y de aterosclerosis subclínica en población adulta residente en Bucaramanga». En este artículo se presentan los hallazgos relacionados con el subestudio correspondiente al monitoreo de la concentración de $PM_{2.5}$ que tuvo como objetivo caracterizar el nivel y la variación de la exposición a $PM_{2.5}$ intradomiciliario y extradomiciliario, denominado en adelante «comunitario».

la persona que permaneciera mayor tiempo dentro de la vivienda acorde con los objetivos del proyecto general.

El cálculo del tamaño de la muestra se basó en la probabilidad de detectar diferencias relevantes en el nivel de presión arterial según los niveles de exposición a $PM_{2.5}$ reportados en la literatura, de acuerdo con el objetivo principal del proyecto marco. De esta manera se determinó un tamaño muestral medio de 500 participantes (con mediciones repetidas de presión arterial por monitoreo ambulatorio y $PM_{2.5}$).

Métodos

Diseño y población del estudio

Se realizó un estudio observacional de corte transversal en el que se evaluó una muestra de población adulta no fumadora residente en dos sectores de la ciudad de Bucaramanga, caracterizados por niveles históricos bajos y elevados de contaminación atmosférica por PM según la información de la red de monitoreo de la ciudad a cargo de la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB). La identificación de los participantes se realizó mediante una estrategia de muestreo radial, no probabilístico, a partir de los puntos de monitoreo atmosférico comunitarios instalados en cada uno de los sectores.

Elegibilidad, criterios de exclusión y tamaño de muestra

Los elegibles como participantes del estudio fueron aquellos individuos mayores de 40 años, de ambos sexos, que reportaron haber residido durante al menos los últimos 5 años en cualquiera de los dos sectores de la ciudad de Bucaramanga seleccionados para la caracterización de niveles de contaminación atmosférica por $PM_{2.5}$. Se excluyeron del estudio potenciales participantes que tuvieran: a) expectativa de cambio de lugar de residencia durante el año siguiente al contacto inicial, b) embarazo en curso, c) antecedente de enfermedad cardiovascular (incluyendo, angina, infarto de miocardio, enfermedad cerebrovascular y enfermedad vascular periférica), d) antecedente de enfermedad psiquiátrica, abuso de alcohol o sustancias psicoactivas, y d) enfermedad terminal con expectativa de vida menor a un año. Se seleccionó dentro de cada vivienda un solo participante y en caso de existir más de un elegible en la misma vivienda se seleccionó

Monitoreo comunitario e intradomiciliario de $PM_{2.5}$

El monitoreo extradomiciliario de $PM_{2.5}$ se realizó durante un año, con el fin de abarcar periodos secos y lluviosos, y obtener datos representativos acorde a variaciones diferentes a las climáticas, asociadas a factores como temporadas de vacaciones. Los dos sectores de estudio fueron seleccionados con base en diferentes factores, el principal fue la disponibilidad de una estación de monitoreo de calidad del aire de la red local, que proporcionara suficientes datos actuales e históricos de variables meteorológicas y concentraciones de PM. Debido a que al momento de iniciar el estudio solamente una estación de la red tenía la capacidad de medir concentraciones de $PM_{2.5}$, los valores de PM_{10} se tomaron como una aproximación a los niveles de $PM_{2.5}$ para escoger los puntos de muestreo. De esta manera, para la selección de los dos sectores de muestreo se tomaron como base los datos de la red de monitoreo de calidad del aire de la CDMB, que contaban con información histórica de PM_{10} en 8 puntos de monitoreo en Bucaramanga y su área metropolitana desde 2001. Teniendo en cuenta los reportes de PM_{10} de los últimos dos años (2010-2012) de monitoreo, se registró que el punto de monitoreo con mayor concentración de PM_{10} correspondía a la zona centro de la ciudad (monitor ubicado en calle 34 con diagonal 15) con niveles promedio diarios de $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y la zona de menor concentración correspondió a la ubicada al occidente de la ciudad, específicamente en el barrio La Joya con concentraciones promedio diarios de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$; estos sectores históricamente tenían consistencia en los niveles promedio diarios registrados en temporada seca y lluviosa manteniendo en promedio una diferencia mínima de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ entre las dos zonas señaladas, por lo cual se seleccionaron como los sectores de muestreo y comparación para el estudio. En la zona centro el punto de monitoreo de referencia para este estudio fue el ubicado en la Seccional de la Dirección de Tránsito de Bucaramanga, localizada en la diagonal 15 con calle 50, debido a que a diferencia de la zona comercial del monitoreo de la calle 34, esta zona corresponde a un lugar

residencial en el que era posible identificar participantes para el estudio.

Para el monitoreo de aire comunitario se instaló un muestreador de volumen medio (URG-3000ABC) en el techo de las instalaciones de la Dirección de Tránsito de Bucaramanga, ubicada en el barrio San Miguel sobre la diagonal 15 (sector 1), y otro en el techo de una vivienda de tres pisos del barrio La Joya (sector 2). Cada muestreador comunitario permitió coleccionar muestras de $PM_{2.5}$ simultáneamente en cuatro filtros con un flujo individual de aire de 8 litros por minuto en ciclos de muestreo de seis días. De los cuatro filtros que coleccionaron muestras de $PM_{2.5}$, dos fueron de fibra de cuarzo y los otros dos de membrana de teflón. Los filtros de membrana de teflón fueron analizados para determinar masa de PM, elementos en trazas, especies iónicas y especies reactivas oxigenadas; los filtros de fibra de cuarzo fueron analizados para determinar carbono orgánico total y carbono negro (BC por su sigla en inglés). Se mantuvieron secciones de cada filtro en caso de requerir análisis posteriores o control de calidad y estimación de reproducibilidad. Los filtros se coleccionaron cada sexto día y se almacenaron en condiciones específicas de temperatura y humedad, para asegurar que la muestra se mantuviera libre de interferencias por volatilidad de algunos de los componentes del PM. Todos los filtros fueron mantenidos en condiciones óptimas y su peso fue registrado mediante la asignación de códigos para cada filtro. El pesaje de los filtros antes y después del muestreo comunitario se realizó por parte de una persona con experiencia de más de 10 años en estas mediciones en una microbalanza de alta precisión del Laboratorio de Estudios Ambientales de la Universidad Pontificia Bolivariana - Seccional Bucaramanga, laboratorio certificado para dicho proceso por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Para cada filtro se registraron por medio de un código, las siguientes mediciones: peso inicial, peso final, peso neto, caudal inicial de la bomba, caudal final de la bomba y tiempo total de muestreo. Para el cálculo de la concentración de $PM_{2.5}$ los valores de flujo volumétrico fueron normalizados a condiciones estándar (1 atm de presión y 25°C de temperatura) para calcular las concentraciones de masa en unidades de $\mu g/m^3$.

Para la medición de la concentración de $PM_{2.5}$ intradomiciliario se utilizaron bombas de monitoreo atmosférico para microambientes (Casela Tuff), que tienen capacidad de flujo hasta de tres litros por minuto para realizar un registro continuo de 24 horas. Estas bombas de monitoreo se ubicaron al interior de la vivienda (sala o comedor) manteniendo las indicaciones de instalación y seguridad del fabricante con el fin de garantizar la calidad de la medición. Con el fin de captar posibles variaciones intradomiciliarias por efecto de

menor concentración externa de $PM_{2.5}$ durante días de la semana o cambio en patrones habituales de la vivienda entre los días, se tomaron dos registros diarios sucesivos en la vivienda de cada participante, es decir, un máximo de 48 horas de monitoreo por vivienda. Las instalaciones de las bombas de monitoreo intradomiciliario fueron realizadas por personal con experiencia en manejo de equipos de medición de aire y entrenado para la finalidad del presente estudio.

La medición intradomiciliaria fue programada para comenzar siempre a una hora fija entre las 8 am y 11 am; cumplidas las 24 horas de muestreo el personal de campo realizó el reemplazo de la bomba en el mismo lugar de la vivienda para continuar el monitoreo por las siguientes 24 horas, registrando en el momento de cambio y de retiro final del monitoreo el estado de la bomba y el tiempo total de monitoreo almacenado automáticamente por el equipo. Todas las bombas de monitoreo fueron calibradas diariamente antes del muestreo. Para cada ciclo de muestreo de 24 horas en cada vivienda se registró la siguiente información: fecha y hora de inicio, código de la vivienda, código del filtro, peso inicial, caudal inicial, fecha y hora de finalización, caudal final, tiempo total de muestreo en horas y peso final. El análisis gravimétrico de los filtros de las bombas de monitoreo intradomiciliario se llevó a cabo tal y como fue descrito anteriormente para los filtros del muestreo comunitario, obteniendo concentraciones diarias en $\mu g/m^3$ ajustadas a condiciones atmosféricas estándar.

Análisis estadístico

La concentración de $PM_{2.5}$ intradomiciliaria se estimó como el promedio de mediciones con duración de muestreo ≥ 8 horas/día. Para la comparación de las concentraciones de $PM_{2.5}$ comunitario e intradomiciliario estimamos la media de las concentraciones intradomiciliarias de las viviendas evaluadas por semana, para cada sector, concatenándolas posteriormente con la concentración comunitaria del ciclo de muestreo correspondiente. Empleamos la prueba t de student para contrastar medias de las concentraciones de $PM_{2.5}$ comunitarias e intradomiciliarias en cada sector, así como entre sectores. Evaluamos adicionalmente la correlación entre las concentraciones de $PM_{2.5}$ comunitario para ciclos de muestreo concurrentes mediante el coeficiente de correlación de Spearman. Definimos un nivel de significancia estadística del 5% (a dos colas) para todas las pruebas estadísticas. Todos los análisis se realizaron en el programa estadístico Stata/MP 12.1.

Resultados

Se realizó monitoreo de contaminación comunitario por $PM_{2.5}$ en el periodo comprendido entre el 26 de octubre de 2014 y el 15 de febrero de 2016, correspondiente a 58 semanas efectivas de medición distribuidas así: 44 semanas en el sector del barrio La Joya (2 de marzo de 2015 a 27 de enero de 2016) y 57 semanas en el sector comprendido por los barrios La Concordia, San Miguel y Ricaurte (26 de octubre de 2014 a 15 de febrero de 2016). En estos mismos sectores se hicieron 879 mediciones de $PM_{2.5}$ intradomiciliario entre el 28 de octubre de 2014 y el 18 de febrero de 2016, correspondientes a 71 viviendas con medición en un solo día y 404 con mediciones en dos días. De estas mediciones 781 (88,9%) fueron estimadas a partir de muestreos de ≥ 8 horas/día, así: 149 en viviendas con un día de medición y 316 en viviendas con dos días de medición.

El nivel promedio de contaminación comunitaria por $PM_{2.5}$ medido en el sector del barrio La Joya fue $18,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (rango: $10,9 - 38,0$) con 7 de 44 semanas de muestreo en las que superó $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En el caso del sector correspondiente a los barrios La Concordia, San Miguel y Ricaurte el promedio de contaminación

ambiental fue $22,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (rango: $15,2 - 108,6$) con 17 de 57 semanas de muestreo en las que superó $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Al comparar las concentraciones de $PM_{2.5}$ entre los dos sectores durante las 43 semanas de medición simultánea se observó una diferencia estadísticamente significativa equivalente a $4,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (ver figura 1). Adicionalmente, se evidenció una alta correlación temporal entre los niveles de contaminación comunitaria medidos en ambos sectores ($r=0,80$; $p<0,01$).

En relación a la exposición intradomiciliaria a $PM_{2.5}$ la concentración media fue $21,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (rango: $2,3 - 99,2$) al considerar la totalidad de las mediciones y $20,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (rango: $10,9 - 38,0$) después de excluir aquellas mediciones con tiempo de muestreo < 8 horas/día. No se observó diferencia en los niveles de $PM_{2.5}$ intradomiciliario entre los dos sectores: $24,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (IC95%: $22,9 - 26,1$) en las viviendas del barrio La Joya, comparado con $22,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (IC95%: $21,3 - 24,4$) en las viviendas de los barrios La Concordia, San Miguel y Ricaurte. Por otra parte, se evidenció diferencia entre los niveles de contaminación intradomiciliaria y comunitaria al considerar mediciones durante semanas concurrentes, aunque solo en el barrio La Joya, donde los promedios intradomiciliarios semanales superaron a los comunitarios ($23,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ versus $19,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $p=0,003$; ver figura 2).



Discusión

Los resultados de este estudio muestran que el promedio y las variaciones de las concentraciones de $PM_{2.5}$ en un periodo de un año presentan un patrón similar en dos comunidades de la ciudad de Bucaramanga, caracterizadas por niveles históricamente diferentes de PM_{10} . Adicionalmente, este estudio es pionero en realizar mediciones de $PM_{2.5}$ al interior de las viviendas, encontrando que las concentraciones de $PM_{2.5}$ a nivel intradomiciliario se correlacionan con las concentraciones comunitarias, siendo similares e incluso mayores.

Los promedios de las concentraciones de $PM_{2.5}$ en el microambiente comunitario en los dos sectores de estudio estuvieron consistentemente por debajo de los niveles permisibles de la norma de calidad de aire en Colombia, que esta definida en $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ⁽⁶⁾. Sin embargo, si se tiene en cuenta como criterio de comparación la guía de la OMS para calidad de aire que establece un nivel límite diario de $PM_{2.5}$ de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ⁽⁶⁾, los dos sectores mantienen promedios por debajo de este límite pero con excedencias de promedios semanales del 16% y 30% durante el tiempo del estudio en el sector de La Joya y San Miguel, respectivamente. La diferencia promedio de concentraciones de $PM_{2.5}$ entre los dos sectores fue de aproximadamente $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, que si bien puede parecer una pequeña diferencia, fue estadísticamente significativa e implica que el sector más central de la ciudad presentó concentraciones aproximadamente 25% mayores que las registradas en el barrio La Joya.

Con base en los niveles comunitarios de $PM_{2.5}$ descritos anteriormente para los dos sectores, es importante notar que el criterio de comparación que se use (norma colombiana resolución 610 de 2010 versus guía OMS) puede tener diferentes implicaciones en términos de salud pública. La norma colombiana es evidentemente más amplia en sus límites permisibles y de esta manera podrían interpretarse como admisibles niveles diarios de $PM_{2.5}$ que ya han demostrado tener efectos negativos sobre la salud en otras poblaciones^(27, 28).

En estudios anteriores que incluyeron estas mismas zonas se había reportado diferencias de hasta $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en concentraciones de PM_{10} ⁽²²⁾. Estas diferencias son coherentes respecto al potencial aporte de $PM_{2.5}$ a las concentraciones de PM_{10} en la ciudad y sugiere que mayores gradientes de concentraciones de PM_{10} entre sectores pueden estar explicadas por la presencia de partículas de mayor tamaño, pero que el aporte de $PM_{2.5}$ a las mezclas de PM_{10} mantienen un patrón similar entre sectores aunque de menor gradiente.

Los dos sectores estudiados tienen en general condiciones comunitarias distintas que pueden explicar sus niveles

diferentes de $PM_{2.5}$. El sector de los barrios La Concordia, San Miguel y Ricaurte está ubicado en la zona centro y bordeado por vías de alto flujo vehicular y presencia de una importante actividad comercial. El sector de La Joya, por su parte, se encuentra bordeado por zonas de escarpa y en la parte inferior por una zona forestal. A pesar de las condiciones comunitarias distintas de los dos sectores, el gradiente de concentraciones de $PM_{2.5}$ no supera los $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y existe una alta correlación temporal de sus mediciones, lo que sugiere un patrón de comportamiento homogéneo de $PM_{2.5}$ en estos sectores de la ciudad. Este hallazgo tiene importantes implicaciones para la vigilancia de la calidad del aire en Bucaramanga, especialmente porque sugiere que las mediciones de $PM_{2.5}$ en puntos específicos definidos por la red de monitoreo pueden estimar bien las variaciones temporales de $PM_{2.5}$ a corto y largo plazo en la ciudad.

Las concentraciones promedio diarias de $PM_{2.5}$ intradomiciliario fueron mayores en el sector de La Joya pero no fueron estadísticamente diferentes entre los dos sectores y estuvieron altamente correlacionadas con las concentraciones de $PM_{2.5}$ comunitario en mediciones concurrentes. Resultados semejantes se han descrito en estudios similares en otras poblaciones, donde además se ha demostrado que estas dos mediciones se correlacionan muy bien con la exposición personal a $PM_{2.5}$ ⁽²⁹⁾. De esta manera, los resultados de este estudio también pueden tener importantes implicaciones para investigaciones en aire y salud en la ciudad, dado que sugieren la hipótesis de que las mediciones de masa de $PM_{2.5}$ en monitores centrales comunitarios pueden servir como una medición aproximada de exposición intradomiciliaria en estudios epidemiológicos.

La correlación entre las mediciones de $PM_{2.5}$ de los dos microambientes (comunitario e intradomiciliario) en ambos sectores fue alta, lo cual puede explicarse por una alta tasa de intercambio de aire entre extra e intradomicilio. Esta explicación puede resultar muy factible debido a la costumbre local de mantener puertas y ventanas abiertas durante largos periodos de tiempo durante el día como respuesta adaptativa a las condiciones tropicales de la ciudad.

Contrario a lo esperado, el promedio de las concentraciones intradomiciliarias en el sector de La Joya fue mayor que el de las concentraciones de $PM_{2.5}$ a nivel comunitario. Una posible explicación para este hallazgo es la presencia al interior de viviendas de este sector de pequeñas microempresas y trabajo de maquila de empresas de calzado y confecciones. Este hallazgo es importante, inusual en la literatura de contaminación del aire intradomiciliario y merece un estudio con mayor detalle dado que sugiere la hipótesis que actividades específicas en el intradomicilio de este sector pueden ser determinantes de exposiciones

a altos niveles de $PM_{2.5}$. La caracterización del tipo de actividades y su influencia sobre los niveles de $PM_{2.5}$ intradomiciliario permitirán además orientar intervenciones para mitigar la exposición y posibles efectos sobre la salud.

Conclusiones

Las medias de las concentraciones diarias de $PM_{2.5}$ a nivel comunitario en los dos sectores de estudio están por debajo de los límites permitidos por la norma de calidad de aire colombiana pero en el límite de los niveles permisibles de las guías de la OMS. Las medias de las concentraciones diarias de $PM_{2.5}$ a nivel intradomiciliario con frecuencia exceden el límite permisible por las dos normas y en el sector de La Joya las concentraciones de $PM_{2.5}$ intradomiciliarias exceden las comunitarias de manera significativa, probablemente relacionadas con actividades específicas al interior de las viviendas.

Agradecimientos

Los autores agradecen la colaboración de las Juntas de Acción Comunal de los barrios La Joya, La Concordia y San Miguel como facilitadoras de la presentación y ejecución del estudio en sus comunidades, así como a cada uno de los residentes que con su participación hicieron posible este proyecto. Adicionalmente, los autores extienden su gratitud al ingeniero Manuel Campos, la enfermera Rocío Noriega y el estudiante de maestría en epidemiología Óscar Rojas por su contribución en la conducción de las actividades de recolección y procesamiento de datos. El presente estudio fue cofinanciado con recursos de la Universidad Autónoma de Bucaramanga (UNAB), la Universidad Pontificia Bolivariana – Seccional Bucaramanga (UPB), la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB), la Fundación Oftalmológica de Santander (FOSCAL), Radiólogos Especializados de Bucaramanga S.A. y Colciencias mediante contrato No. 457 de 2012.

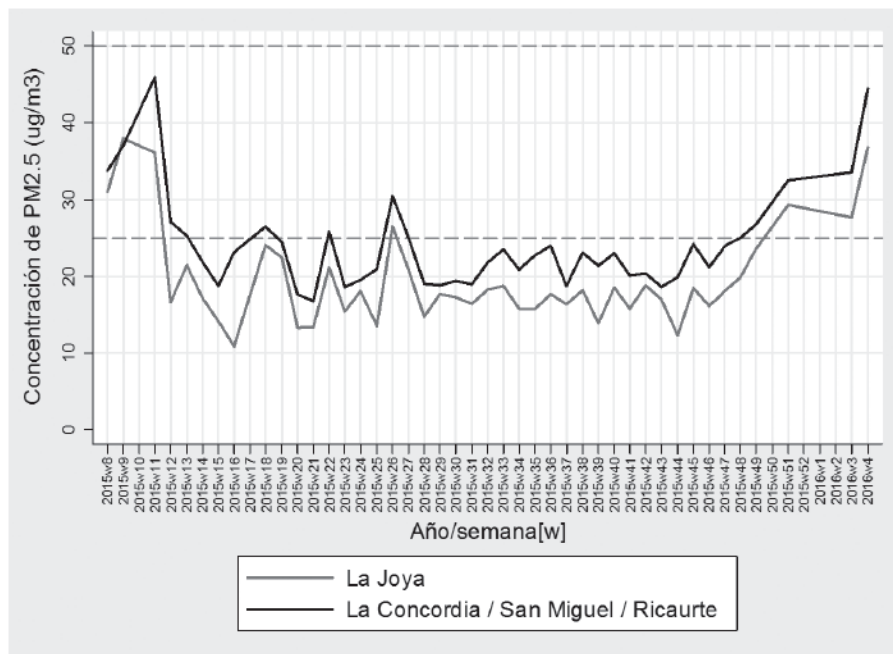


Figura 1. Niveles de contaminación ambiental por $PM_{2.5}$ en dos sectores de la ciudad de Bucaramanga durante un periodo de 43 semanas de monitorización simultánea

Nota: Periodo de muestreo comprendido entre el 2 de Marzo de 2015 y el 27 de Enero de 2016. Las líneas rojas de trazos cortos representan los niveles máximos permisibles de exposición a $PM_{2.5}$ (promedio de 24 horas) de acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2005; $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y la resolución 610 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia (2010; $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

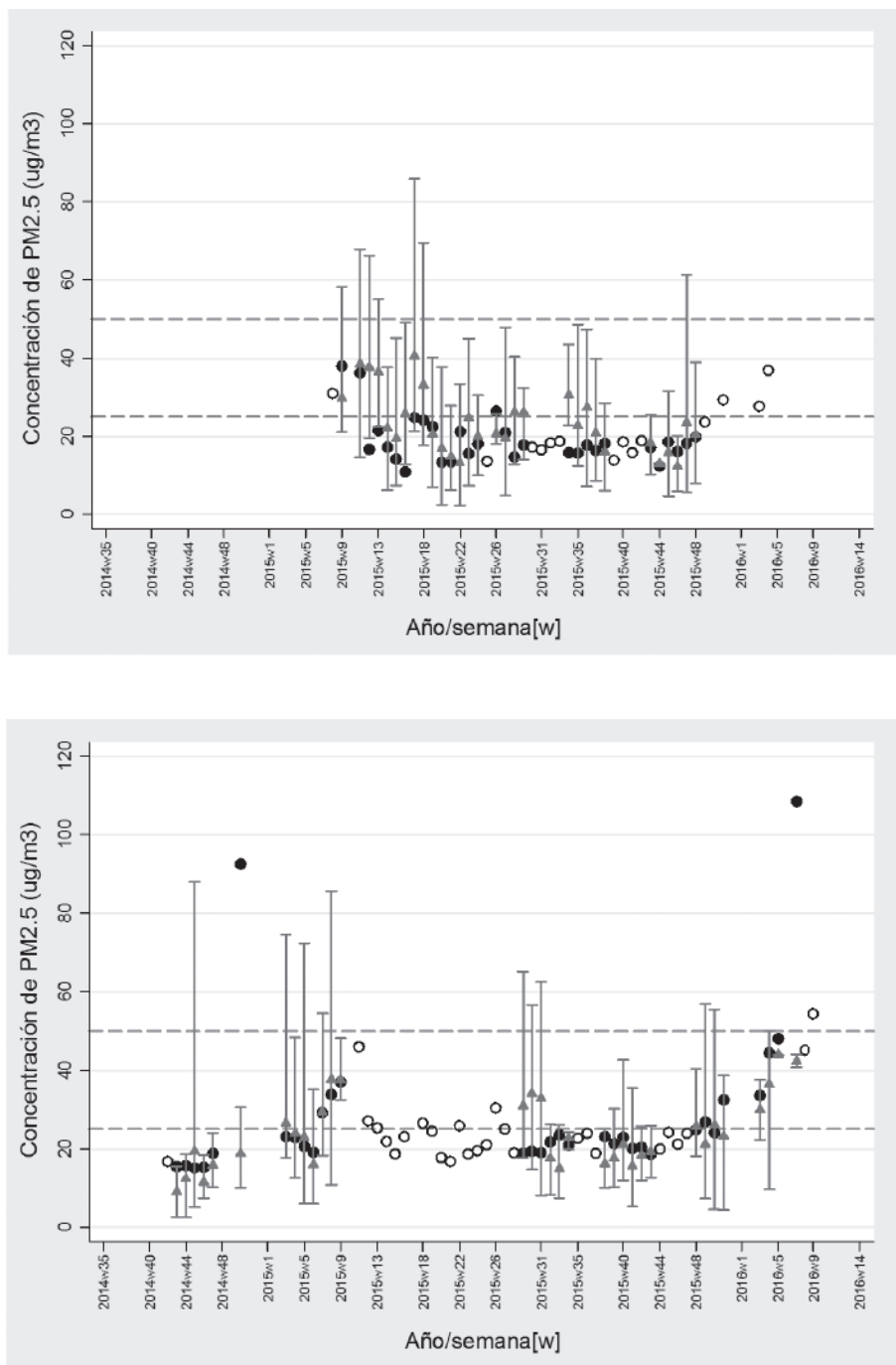


Figura 2. Distribución de los niveles de contaminación ambiental comunitaria e intradomestica por $PM_{2.5}$ en dos sectores de la ciudad de Bucaramanga

Panel izquierdo: Barrio La Joya. Panel derecho: Barrios La Concordia, San Miguel y Ricaurte.

Nota: Los círculos negros rellenos representan la concentración de $PM_{2.5}$ comunitaria para aquellas semanas en las que simultáneamente se obtuvieron mediciones intradomesticas, mientras que los círculos negros vacíos corresponden a la concentración de $PM_{2.5}$ extradomestico durante las semanas en las que no se obtuvieron mediciones intradomesticas. Los triángulos y las líneas verticales de color gris corresponden a la media y los percentiles 5 y 95 de la concentración de $PM_{2.5}$ intradomestico de las viviendas evaluadas semanalmente. Las líneas rojas de trazos cortos representan los niveles máximos permisibles de exposición a $PM_{2.5}$ (promedio de 24 horas) de acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2005; $25 \mu g/m^3$) y la resolución 610 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia (2010; $50 \mu g/m^3$).

Referencias

- 1 World Health Organization. Air pollution 2013. Available from: http://www.who.int/topics/air_pollution/en/.
- 2 República de Colombia Consejo Nacional de Política Económica y Social. Documento CONPES No. 3550. Bogotá 2008.
- 3 United States Environmental Protection Agency. Criteria air pollutants [March 17, 2016]. Available from: <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants>
- 4 United States Environmental Protection Agency. National Ambient Air Quality Standards (NAQSS) 2011. Available from: <http://www.epa.gov/air/criteria.html>.
- 5 World Health Organization. WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. 2005.
- 6 República de Colombia Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. Resolución No. 610. Bogotá 2010.
- 7 Brunekreef B, Holgate ST. Air pollution and health. *Lancet*. 2002;360(9341):1233-42.
- 8 Dockery DW, Pope CA, Xu X. An association between air pollution and mortality in six US cities. *N Engl J Med*. 1993;329:1753-59.
- 9 Pope CA, 3rd, Ezzati M, Dockery DW. Fine-particulate air pollution and life expectancy in the United States. *N Engl J Med*. 2009;360(4):376-86.
- 10 Anderson HR FG, Atkinson RW. Long-term exposure to air pollution and the incidence of asthma: Meta-analysis of cohort studies. *Air Qual Atmos Heal*. 2013;6:47-56.
- 11 Brauer M, Hoek G, Smit HA, de Jongste JC, Gerritsen J, Postma DS, et al. Air pollution and development of asthma, allergy and infections in a birth cohort. *Eur Respir J*. 2007;29(5):879-88.
- 12 Holguin F. Traffic, outdoor air pollution, and asthma. *Immunology and allergy clinics of North America*. 2008;28(3):577-88, viii-ix.
- 13 Brook RD. Cardiovascular effects of air pollution. *Clin Sci (Lond)*. 2008;115(6):175-87.
- 14 Pope CA, 3rd, Burnett RT, Thun MJ, Calle EE, Krewski D, Ito K, et al. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. *JAMA*. 2002;287(9):1132-41.
- 15 Esposito S, Tenconi R, Lelii M, Preti V, Nazzari E, Consolo S, et al. Possible molecular mechanisms linking air pollution and asthma in children. *BMC pulmonary medicine*. 2014;14(1):31.
- 16 International Agency for Research on C. Outdoor air pollution a leading environmental cause of cancer deaths. 2013.
- 17 Wallace L, Nelson W, Ziegenfus R, Pellizzari E, Michael L, Whitmore R, et al. The Los Angeles TEAM Study: personal exposures, indoor-outdoor air concentrations, and breath concentrations of 25 volatile organic compounds. *J Expo Anal Environ Epidemiol*. 1991;1(2):157-92.
- 18 Koistinen KJ, Kousa A, Tenhola V, Hanninen O, Jantunen MJ, Oglesby L, et al. Fine particle (PM2.5) measurement methodology, quality assurance procedures, and pilot results of the EXPOLIS study. *J Air Waste Manag Assoc*. 1999;49(10):1212-20.
- 19 Weisel CP, Zhang J, Turpin BJ, Morandi MT, Colome S, Stock TH, et al. Relationship of Indoor, Outdoor and Personal Air (RIOPA) study: study design, methods and quality assurance/control results. *J Expo Anal Environ Epidemiol*. 2005;15(2):123-37.
- 20 Zhou J, Han B, Bai Z, You Y, Zhang J, Niu C, et al. Particulate exposure assessment for community elderly (PEACE) in Tianjin, China: mass concentration relationships. *Atmos Environ*. 2012;49:77-84.
- 21 Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM. Estado de la Calidad del Aire en Colombia 2007-2010. Bogotá, D.C. 2012.
- 22 Rodríguez-Villamizar LA, Castro-Ortiz H, Rey-Serrano JJ. The effects of air pollution on respiratory health in susceptible populations: a multilevel study in Bucaramanga, Colombia. *Cad Saude Publica*. 2012;28(4):749-57.
- 23 Quiroz-Arcentales L, Hernandez-Florez LJ, Agudelo Calderon CA, Medina K, Robledo-Martinez R, Osorio-Garcia SD. [PM10 exposure-related respiratory symptoms and disease in children living in and near five coal-mining areas in the Cesar department of Colombia]. *Rev Salud Publica (Bogota)*. 2013;15(1):66-79.
- 24 Ramirez A, Sarmiento OL, Duperly J, Wai Wong T, Rojas N, Arango CM, et al. Should they play outside? Cardiorespiratory fitness and air pollution among schoolchildren in Bogota. *Rev Salud Publica (Bogota)*. 2012;14(4):570-83.
- 25 Romero-Lankao P, Qin H, Borbor-Cordova M. Exploration of health risks related to air pollution and temperature in three Latin American cities. *Soc Sci Med*. 2013;83:110-8.
- 26 Blanco-Becerra LC, Miranda-Soberanis V, Barraza-Villarreal A, Junger W, Hurtado-Diaz M, Romieu I. Effect of socioeconomic status on the association between air pollution and mortality in Bogota, Colombia. *Salud Publica Mex*. 2014;56(4):371-8.
- 27 Baldasano JM, Valera E, Jiménez P. Air quality data from large cities. *The Science of the total environment*. 2003;307(1-3):141-65.

²⁸ Stieb DM, Szyszkowicz M, Rowe BH, Leech JA. Air pollution and emergency department visits for cardiac and respiratory conditions: a multi-city time-series analysis. *Environmental health : a global access science source*. 2009;8(2):25.

²⁹ Williams R, Creason J, Zweidinger R, Watts R, Sheldon L, Shy C. Indoor, outdoor, and personal exposure monitoring of particulate air pollution: the Baltimore Elderly epidemiology-exposure pilot study. *Atmos Environ*. 2000;34:4193-204.