

Análisis climático de la concentración de metales pesados asociados al sedimento depositado sobre vías urbanas

Climatic analysis of heavy metal concentration associated with urban road-deposited sediment

Carlos Zafra-Mejía, Diana M. Santamaría-Galindo y Cristian D. Torres-Galindo

Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Universidad Distrital F.J.C. Grupo de Investigación en Ingeniería Ambiental-GIIAUD. Bogotá, Colombia. czafra@udistrital.edu.co; dmsantamariag@correo.udistrital.edu.co; cdtorresg@correo.udistrital.edu.co

Recibido 5 Mayo 2013/Enviado para Modificación 16 Julio 2014/Aceptado 9 Diciembre 2014

RESUMEN

Objetivo Realizar una evaluación climática (diaria) de la concentración de metales pesados (Pb y Cu) asociada con el sedimento depositado sobre las superficies viales de las localidades de Kennedy y Puente Aranda (Bogotá D.C., Colombia). Adicionalmente, se evaluarán las concentraciones detectadas con respecto a la legislación seleccionada como de referencia para la protección de la salud humana en suelo urbano.

Métodos La concentración se determinó mediante espectrometría de absorción atómica con llama; previamente las muestras fueron digeridas en una mezcla de ácido clorhídrico y nítrico (3:1; agua regia).

Resultados Se evidencia con respecto a la fracción de tamaño del sedimento vial más cercana a la potencialmente inhalable desde el punto de vista de la salud pública ($\leq 10 \mu\text{m}$), que las concentraciones metálicas en promedio tienden a aumentar en tiempo seco (29 %). Al respecto, las concentraciones durante estos períodos de tiempo son en promedio 1,69 veces superiores al valor límite más bajo fijado por la normatividad de referencia. No obstante, se sugiere que las concentraciones metálicas están dominadas por el uso del suelo antes que por las condiciones climáticas.

Conclusiones Los hallazgos se constituyen en un punto de referencia a nivel colombiano para la discusión y publicación de normatividad ambiental asociada con la protección de la salud humana por metales pesados, y para visualizar futuras líneas de investigación acerca del efecto del cambio climático sobre las concentraciones metálicas en ambientes urbanos.

Palabras Clave: Contaminación ambiental, escorrentía pluvial, metales pesados, salud pública, sedimento (*fuentes: DeCS, BIREME*).

ABSTRACT

Objective To climatically assess (daily) the concentration of heavy metals (Pb and Cu) in sediment deposited on road surfaces of the localities of Kennedy and Puente Aranda (Bogota, D.C., Colombia). Additionally, the detected concentrations are to be evaluated with respect to the legislation chosen as reference point for the protection of human health in urban areas.

Methods The concentration was determined by flame atomic absorption spectrometry. The samples were previously digested in a mixture of hydrochloric and nitric acid (3:1; aqua regia).

Results The results show, with respect to road sediment closest to the size that could be potentially inhaled from the point of view of public health ($\leq 10 \mu\text{m}$), that the metal concentrations on average tend to increase in dry weather (29 %). In this regard, the concentrations during these time periods are on average 1.69 times higher than the lowest limit value set by the reference legislation. However, it is suggested that the metal concentrations are mostly due to the use of the land rather than weather conditions.

Conclusions The findings are a reference point in Colombia for the discussion and publication of environmental regulations associated with the protection of human health from heavy metals and for visualizing future lines of research about the effect of climate change on metal concentrations in urban environments.

Key Words: Environmental pollution, heavy metals, public health, sediment, stormwater runoff (*source: MeSH, NLM*).

La contaminación difusa generada por la escorrentía superficial fue reconocida como una de las principales causas del deterioro de la calidad del agua de los cuerpos hídricos en áreas urbanas (1,2). En este sentido, la escorrentía vial ha despertado gran interés debido a que las investigaciones reportaron elevadas concentraciones de metales pesados asociadas con la fracción soluble de este tipo de aguas (3,4).

Por otra parte, se ha considerado el aporte de metales pesados desde la fracción sólida de la escorrentía superficial, es decir, por parte de los sedimentos acumulados en tiempo seco sobre las superficies viales; los cuales fueron probablemente removidos y transportados por la escorrentía durante los períodos de aumento de la precipitación (5). Adicionalmente, los sedimentos acumulados en tiempo seco pudieron afectar la calidad del aire, el suelo y la vegetación del entorno vial cuando fueron suspendidos por el viento y la turbulencia inducida por el tráfico (6,7).

La ciudad de Bogotá D.C. (Colombia) fue reportada por la Organización Panamericana de la Salud como el tercer centro urbano de mayor contaminación atmosférica en América Latina (8). Al respecto, Giraldo (9)

reportó que en la ciudad las fuentes móviles (el tráfico) aportaron el 65 % de los principales contaminantes atmosféricos; los cuales por deposición atmosférica podrían ser transferidos hacia la superficie. Se ha reportado que la deposición atmosférica total (seca y húmeda) contribuyó con más de la mitad del Pb, Zn, Ni, Cu, As, Cd, Cr, Hg, Sb y V detectado en la escorrentía de las superficies impermeables de áreas urbanas (10,11). A partir de lo anterior, el incremento local de las investigaciones sobre los entornos viales urbanos está asociado con el interés de evaluar el comportamiento temporal del material atmosférico en suspensión, hidrocarburos y metales pesados (12-14); sus efectos tóxicos sobre la salud pública, las estrategias de limpieza de las fuentes de polución, y las cargas descargadas en los sistemas acuáticos, el suelo y la atmósfera. Es por esto, que en algunas investigaciones se han utilizado a los sedimentos viales como indicadores de la presencia de metales pesados en la superficie de ambientes urbanos (15,16).

Las superficies viales representaron sólo una pequeña porción del paisaje urbano, no obstante, descargaron significativas cargas de metales pesados sobre los cuerpos de agua durante las épocas de aumento de la precipitación (17). La magnitud y duración del lavado por escorrentía de los contaminantes acumulados sobre las superficies viales aumentó con la intensidad de la precipitación (18,19). Adicionalmente, el lavado vial de la carga contaminante tendió a aumentar cuando el período seco previo fue prolongado (2,20,21). De esta manera, los resultados sugirieron que la frecuencia de los eventos de precipitación en un área determinada probablemente influyó en el lavado de la carga contaminante presente sobre las vías.

El objetivo del estudio fue realizar una evaluación climática (diaria) de la concentración de metales pesados asociada con el sedimento depositado sobre las superficies viales de las localidades de Kennedy y Puente Aranda de la ciudad de Bogotá, Colombia. Los metales pesados a valorar son: Pb y Cu. Adicionalmente, se estudiará la relación entre el contenido metálico en el sedimento vial y la variable climatológica de precipitación. Finalmente, se evaluarán las concentraciones detectadas con respecto a la legislación seleccionada como de referencia para la protección de la salud humana en suelo urbano.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción de los lugares de investigación

Los lugares de investigación se localizaron sobre superficies viales de

las localidades de Kennedy (Zona 1) y Puente Aranda (Zona 2) en la ciudad de Bogotá D.C., en el centro de Colombia (Tabla 1 y Figura 1). Los datos climatológicos fueron obtenidos de estaciones operadas por la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de la Secretaría Distrital de Ambiente de la ciudad de Bogotá (RMCAB), localizadas a 194 y 38 metros de distancia con respecto del bordillo de las superficies viales de investigación, respectivamente.

Tabla 1. Características de las superficies viales en estudio

Característica	Zona 1 Kennedy	Zona 2 Puente Aranda
Coordenadas	04°35'45" N 74°08'48" O	04°37'49" N 74°07'06" O
Elevación (m.s.n.m.)	2560	2557
Precipitación anual (mm) ^a	1236	854
Velocidad promedio diaria del viento (km/h) ^a	6,8	9,4
Temperatura promedio anual (°C) ^a	15	14
Densidad poblacional (habitantes/ha)	480 (media)	160 (baja)
Uso del suelo ^b	R-I	I-C
Impermeabilización (%)	80	45
Líneas de tráfico/parqueo	2/ninguna	4/ninguna
Longitud vial (m)	105	215
Pendiente (S) longitudinal/transversal (%)	0,3/4	1/4
Tipo/textura del pavimento	Asfalto/rugoso	Asfalto/suave
Tráfico promedio diario (Vehículos/día)	12300	13500
Velocidad promedio (km/h)	50	40
Composición del tráfico (%) Zona 1/Zona 2	Carros: 77/83; camiones ligeros: 4/3; camiones sin remolque: 2/2; camiones con remolque: 0/1; buses: 17/114/Suave-Ádo del tra sentido e estudio en Puente Aranda	

^aDurante el periodo de investigación; ^bR-residencial, I-industrial, C-comercial; ^cAparcamiento no autorizado; ^dAparcamiento no autorizado y mantenimiento automatizado

La actividad industrial predominante en la Zona 1 corresponde a la de elaboración de bebidas carbonatadas (gaseosas) para consumo humano. Adicionalmente, es importante mencionar que a 170 m se localiza la intersección entre las autopistas Avenida del Sur y Avenida Boyacá de la ciudad de Bogotá, con un tráfico promedio diario de 40 100 y 24 900 vehículos/día, respectivamente. La actividad industrial predominante en la Zona 2 corresponde a la farmacéutica y de televisión; adicionalmente, existe un lote aledaño de 26 000 m² en construcción (20 m de distancia).

Sistema de muestreo

Las muestras de las superficies viales se tomaron en tiempo seco, a un costado del bordillo (0,50 m), a la misma hora y durante un periodo de un año (08/05/2010-08/05/2011). La frecuencia promedio de muestreo fue de 10 días, no obstante, se presentaron ligeras variaciones debido a

la ocurrencia de eventos de precipitación que impidieron la recolección del sedimento vial en seco. La superficie de muestreo tuvo un área de $0,49 \text{ m}^2$ ($0,70 \text{ m} \times 0,70 \text{ m}$); las dimensiones del área de recolección se garantizaron colocando sobre la superficie un marco de madera de idénticas dimensiones que las del área de muestreo. Adicionalmente, se controló el lugar de muestreo para evitar repetir y estar cerca de anteriores puntos de recolección del sedimento vial.

Figura 1. Superficies viales de investigación. a) Kennedy-Zona 1, y b) Puente Aranda-Zona 2



Para la recolección del sedimento vial se utilizó una escobilla de fibras plásticas y un recogedor de mano. La superficie de muestreo fue barrida ligeramente para evitar el desprendimiento de partículas pertenecientes al pavimento e intentando aplicar el mismo esfuerzo sobre la escobilla durante todo el período de investigación. La cantidad total de muestras recolectadas sobre las calzadas fue de 72; 36 muestras por cada zona de investigación.

Análisis de laboratorio

La distribución por tamaños ($63 \mu\text{m}$ - $2800 \mu\text{m}$) de las partículas del sedimento vial se determinó usando el método ISO-11277 (22). Por otro lado, el análisis climático de la concentración de metales pesados del sedimento vial se realizó para la fracción de tamaño inferior a $250 \mu\text{m}$. Lo anterior, debido a que las investigaciones han reportado que esta fracción tendió a registrar las mayores concentraciones metálicas (5,16,19,20,23,24).

Finalmente, la concentración de los metales pesados asociados con el sedimento vial se determinó por medio de espectrometría de absorción atómica con llama (ISO-11047) (22). Las muestras de sedimento fueron

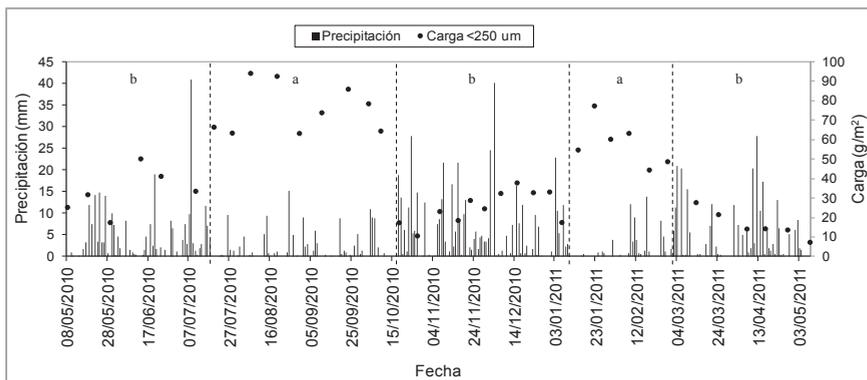
previamente digeridas en una mezcla de ácido clorhídrico y ácido nítrico (3:1; agua regia), método ISO-11466 (22). Los metales pesados analizados fueron Pb y Cu.

RESULTADOS

Caracterización climática del área de investigación

Los registros de precipitación obtenidos durante el período de muestreo (08/05/2010-08/05/2011) permitieron evidenciar la existencia de dos épocas de aumento de las lluvias: (i) desde inicios del mes de marzo hasta el inicio de julio, y (ii) desde mediados de octubre hasta finales de diciembre; lo anterior, coincidiendo con el comportamiento reportado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia para el fenómeno climático de “La Niña” (23). La precipitación total durante el período de muestreo fue un 75,1 % y 42,3 % mayor con respecto de la precipitación promedio anual de las Zonas 1 y 2, respectivamente. Los registros mostraron que los meses con predominio de tiempo seco fueron enero, febrero, agosto y septiembre. De esta manera, los resultados sugirieron la existencia de dos épocas para el análisis climático de las concentraciones metálicas asociadas con el sedimento vial: tiempo de aumento y tiempo de disminución de la precipitación (Figura 2). A partir de lo anterior, se observó que durante la caracterización realizada en la Zona 1 (Kennedy) se identificaron dos períodos donde la precipitación tendió a disminuir: (i) entre 18/07-17/10/2010 y (ii) entre 10/01-01/03/2011 (Figura 2). La Zona 2 (Puente Aranda) presentó un comportamiento climático similar.

Figura 2. Variación climática de la carga de sedimento vial con respecto a la precipitación (Zona 1). a) Disminución y b) aumento de la precipitación



Análisis climático del sedimento vial

Carga de sedimento vial. El análisis se enfocó en la determinación y estudio de la cantidad o carga de sedimento acumulado sobre las superficies viales (g/m^2) a partir de la variación climática de la precipitación. Al respecto, se asumió que la época de disminución de la precipitación estuvo dominada principalmente por el fenómeno de acumulación de la carga vial, y que la época de aumento de la precipitación estuvo dominada por el fenómeno de remoción de la carga vial; este último representado principalmente por el lavado generado por la escorrentía superficial. Adicionalmente, la determinación y análisis de la carga de sedimento vial se realizó para la fracción de tamaño seleccionada como representativa desde el punto de vista de la concentración metálica ($<250 \mu\text{m}$).

La carga promedio de sedimento durante los periodos en los cuales se identificó una disminución en la precipitación fue de 67,1 y 92,2 g/m^2 sobre las superficies viales de las Zonas 1 y 2, respectivamente (Figura 2). Los resultados evidenciaron un aumento (1,37 veces) de la carga superficial de sedimento en la Zona 2 (Puente Aranda), probablemente debido al desarrollo de actividades de construcción en cercanías a la superficie vial (predio de 26 000 m^2); es por esto que la zona en evaluación presentó una impermeabilización del 45 % (Tabla 1). A partir de los periodos identificados con respecto de la precipitación, se procedió a realizar una estimación preliminar de la pérdida promedio de sedimento sobre las calzadas de las zonas en estudio en época de lluvia; asumiendo que la diferencia en la carga de sedimento vial entre las épocas de aumento y disminución de la precipitación equivalía a la cantidad de sedimento removido en época de lluvia desde las superficies viales hacia los sistemas de drenaje pluvial. La carga promedio de sedimento durante los periodos de aumento en la precipitación fue de 25,1 y 36,9 g/m^2 en las Zonas 1 y 2, respectivamente (Figura 2). Por otro lado, la carga de sedimento vial durante los periodos de disminución de la precipitación fue de 67,1 g/m^2 (2,67 veces mayor) y 92,2 g/m^2 (2,50 veces mayor) sobre las superficies viales de las Zonas 1 y 2, respectivamente. Los resultados sugirieron que en tiempo de lluvia existió una pérdida promedio de sedimento vial del 62,6 y 60,0 % en las Zonas 1 y 2, respectivamente (promedio: 61,1 %). Lo anterior fue valido para la fracción de tamaño representativa del sedimento vial ($<250 \mu\text{m}$).

Concentración de metales pesados en el sedimento vial. En las calzadas de investigación la fracción más fina del sedimento vial presentó las mayores concentraciones de Pb y Cu ($<63 \mu\text{m}$). Se probaron varios modelos de

regresión para evaluar la tendencia en el aumento de la concentración metálica a medida que disminuyó la fracción de tamaño del sedimento. Los resultados mostraron que los modelos de tipo exponencial y potencial fueron los que mejores resultados produjeron ($R^2 \geq 0,84$). Al respecto, Zhao y Li (19), Deletic y Orr (24), y Zafra et al. (25) encontraron resultados similares. Es importante mencionar para la presente investigación, que esta fracción de tamaño fue la más cercana a la fracción potencialmente inhalable desde el punto de vista de la salud pública (i.e., $\leq 10 \mu\text{m}$) y, además, la más susceptible de ser suspendida por altas velocidades del viento o por la turbulencia inducida por el tráfico en las vías de investigación.

La Zona 1 tendió a presentar las mayores concentraciones de Pb y Cu durante la totalidad del período de investigación. En promedio para Pb, el 100 % de las concentraciones de la Zona 1 fueron mayores que las determinadas en la Zona 2; con respecto al valor medio de la concentración para cada fracción de tamaño (Tabla 2). Por lo tanto, los resultados mostraron que las concentraciones de Pb en la Zona 1 fueron en promedio 2,22 veces superiores a las registradas en la Zona 2. Por otro lado, las concentraciones de Cu presentaron una tendencia similar; se registraron mayores concentraciones en la Zona 1: el 85,7 % de las concentraciones fueron mayores con respecto de la Zona 2. En promedio fueron 1,30 veces superiores.

Tabla 2. Concentración de metales pesados con un 95 % de intervalo de confianza (materia seca)

Metal		Fracción de tamaño (μm)						
		<63	63-125	125-250	250-500	500-1000	1000-2000	2000-2800
Época seca ^a								
Pb ^b	1 ^c	97±17	88±17	51±10	40±10	29±8	18±6	7±4
	2	69±12	45±9	31±7	30±8	27±7	13±5	9±4
Cu	1	147±22	119±19	84±13	46±11	18±8	14±7	11±5
	2	105±15	62±9	54±7	39±7	25±6	22±6	19±5
Época de lluvia								
Pb	1	79±17	73±15	46±13	33±12	20±11	18±8	10±4
	2	52±11	50±9	37±9	36±8	27±7	5±3	2±1
Cu	1	134±21	112±17	64±11	37±9	25±7	18±6	11±4
	2	71±11	67±10	53±8	33±7	12±4	9±4	6±3
Totalidad del período de muestreo								
Pb	1	88±19	80±15	54±12	49±11	45±9	33±8	24±5
	2	61±13	48±10	34±9	33±9	27±7	9±4	6±3
Cu	1	141±22	116±20	74±16	42±9	22±8	16±5	11±5
	2	88±14	64±11	53±9	36±7	19±6	15±5	12±5

^a: época de disminución de la precipitación; ^b: metal pesado; ^c: zona de estudio

En el presente estudio, los resultados sugirieron que la zona con una mayor densidad de tráfico no tendió a registrar las mayores concentraciones

de Pb y Cu (Zona 1: 12 300; Zona 2: 13 500 vehículos/día). La diferencia en la densidad de tráfico entre las dos zonas de investigación no fue significativa; es decir, la Zona 2 registró una densidad de tráfico 1,10 veces superior con respecto de la Zona 1. De esta manera, los resultados insinuaron un aporte de elementos metálicos por parte de fuentes adicionales al tráfico en la Zona 1.

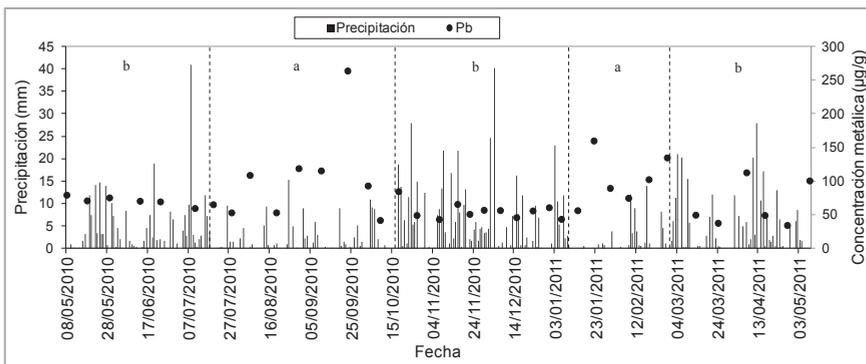
Es importante mencionar la existencia de una planta para la fabricación de bebidas carbonatas (localizada a 25 m) que probablemente aportó elementos metálicos sobre la superficie vial de la Zona 1; lo anterior probablemente debido a los procesos de combustión desarrollados en su interior. Adicionalmente, se debe considerar el aporte de metales pesados sobre la Zona 1 por parte de la intercepción vial de las avenidas Autopista Sur y Boyacá (localizada a 170 m), la cual contó con un tráfico promedio diario total de 65 000 vehículos/día. A partir de lo anterior, se realizó un análisis de correlación entre las concentraciones de Pb y Cu asociadas con la fracción de tamaño representativa del sedimento vial ($<250 \mu\text{m}$) para evaluar su afinidad en el origen (i.e., la fuente de contaminación). Los resultados mostraron para las Zonas 1 y 2 unos coeficientes de correlación lineal de 0,65 y 0,87, respectivamente. Por lo tanto, los resultados sugirieron la probable existencia de unas fuentes comunes o dominantes para los metales pesados acumulados sobre las superficies viales en estudio.

Como se pudo observar, el sedimento acumulado sobre la superficie vial de la Zona 2 registró la mejor correlación entre Pb y Cu ($r=0,87$), sugiriendo un aporte de elementos metálicos por parte de una fuente dominante de contaminación; es decir, probablemente el tráfico. De esta manera, la distribución temporal y espacial en el sedimento vial de los elementos metálicos emitidos por parte de la fuente dominante de contaminación fue más uniforme. Por el contrario, en la Zona 1 se registró una menor correlación entre Pb y Cu ($r=0,65$); esto sugirió un aporte de elementos metálicos por parte de varias fuentes de contaminación, es decir, no asociadas exclusivamente con el tráfico que circuló sobre la superficie vial.

Al respecto, existieron una planta para la fabricación de bebidas carbonatas (localizada a 25 m) y una intercepción vial entre las avenidas Autopista Sur y Boyacá (localizada a 170 m), que probablemente aportaron de manera no uniforme elementos metálicos sobre la superficie vial de la Zona 1. Con respecto a la variación climática de la concentración de

metales pesados asociada con el sedimento vial, los resultados mostraron que las concentraciones de Pb y Cu de la Zona 1 tendieron a ser mayores en la época de disminución de la precipitación (Figura 3); los resultados mostraron que la concentración de Pb y Cu ($< 250 \mu\text{m}$) durante estos períodos de tiempo fueron en promedio 1,61 y 1,60 veces superiores con respecto de la época de aumento de la precipitación, respectivamente. Adicionalmente, se observó que existió una relación negativa débil entre la altura de precipitación y la concentración de Pb asociada con el sedimento vial ($r = -0,16$). Igualmente, las concentraciones de Cu ($< 250 \mu\text{m}$) registraron una tendencia similar. Los resultados sugirieron que en la época de aumento de la precipitación probablemente existió remoción de los elementos metálicos asociados con el sedimento vial de la Zona 1 (Pb y Cu), producto del lavado ejercido por la escorrentía superficial.

Figura 3. Variación de la concentración de Pb en el sedimento vial a partir de los períodos climáticos identificados (Zona 1).
a) Disminución, y b) aumento de la precipitación



Por otro lado, en la Zona 2 no existieron diferencias significativas entre las concentraciones metálicas registradas en las épocas de disminución y aumento de la precipitación para la fracción de tamaño del sedimento vial inferior a $250 \mu\text{m}$ (Tabla 3). Lo anterior, probablemente debido al aporte de elementos metálicos por la ejecución de actividades de construcción en cercanías a la superficie vial de investigación (predio de $26\ 000 \text{ m}^2$); es decir, las concentraciones metálicas asociadas con el sedimento vial estuvieron probablemente dominadas por el cronograma de construcción antes que por las condiciones climáticas del área de investigación. No obstante, se observó que para la fracción de tamaño inferior a $63 \mu\text{m}$ las concentraciones de Pb y Cu en la época de disminución de la precipitación fueron en promedio 1,33 y 1,48 veces superiores con respecto de la

época de aumento de la precipitación (Tabla 3). Nuevamente se sugirió la probable remoción (escorrentía) de elementos metálicos durante la época de aumento de la precipitación.

Finalmente, las concentraciones metálicas asociadas con la fracción más fina del sedimento vial (<63 μm) presentaron una tendencia similar a la anteriormente mencionada para la Zona 1. Por ejemplo, los resultados mostraron que las concentraciones de Pb en las Zonas 1 y 2 durante la época de disminución de la precipitación fueron en promedio 1,23 y 1,33 veces superiores con respecto de la época de aumento de la precipitación, respectivamente (Tabla 3). Nuevamente es importante mencionar, que esta fracción de tamaño fue la más cercana a la fracción potencialmente inhalable desde el punto de vista de la salud pública (i.e., $\leq 10 \mu\text{m}$) y, además, la más susceptible de ser suspendida por altas velocidades del viento o por la turbulencia inducida por el tráfico en las vías de investigación. Lo anterior, probablemente afectando la calidad del aire, el suelo y la vegetación del entorno y, por lo tanto, la salud de los usuarios y residentes de las áreas cercanas a los corredores viales en evaluación.

Tabla 3. Evaluación legislativa de la concentración metálica asociada con el sedimento vial (intervalo de confianza: 95 %)

Metal	Concentración (mg/kg de materia seca)		Cataluña, España ^a	País Vasco, España ^b	Canadá ^c
	Zona 1	Zona 2			
Época seca					
	<250 μm	<250 μm			
Pb	103 \pm 15	56 \pm 8	60	150	140
Cu	117 \pm 17	57 \pm 7	310	-	63
	<63 μm	<63 μm			
Pb	97 \pm 17	69 \pm 12	60	150	140
Cu	147 \pm 22	105 \pm 15	310	-	63
Época de lluvia					
	<250 μm	<250 μm			
Pb	64 \pm 9	57 \pm 9	60	150	140
Cu	73 \pm 10	59 \pm 8	310	-	63
	<63 μm	<63 μm			
Pb	79 \pm 17	52 \pm 11	60	150	140
Cu	134 \pm 21	71 \pm 11	310	-	63

^a: Niveles de referencia para la protección de la salud humana (26); ^b: Valores indicativos de evaluación para la protección de la salud humana (27); ^c: Valores para la protección de la salud humana (28).

Evaluación normativa

La concentración de los metales pesados asociados con el sedimento vial de las Zonas 1 y 2 fue comparada con la normatividad establecida para la protección de la salud humana en suelo urbano de las siguientes

administraciones: (i) Comunidad Autónoma de Cataluña (España) (26), (ii) Comunidad Autónoma del País Vasco (España) (27), y (iii) Canadá (28) (Tabla 3).

Se observó para la fracción de tamaño representativa del sedimento vial (<250 μm), que las concentraciones promedio de Pb en la Zona 1 durante las épocas de disminución y aumento de la precipitación superaron los límites establecidos por administración de Cataluña (60 mg/kg). Adicionalmente, la Zona 2 podría superar estos límites a partir de los intervalos de confianza obtenidos para las concentraciones de Pb (Tabla 3). Con respecto a las concentraciones de Cu durante las épocas de disminución y aumento de la precipitación, los resultados mostraron que en la Zona 1 se superó el límite establecido por la administración de Canadá (63 mg/kg). Igualmente, las concentraciones de Cu en la Zona 2 podrían superar estos límites a partir de los intervalos de confianza obtenidos. Finalmente, y con respecto a la fracción de tamaño más fina del sedimento vial (< 63 μm), los resultados mostraron que independientemente de la época con respecto a la precipitación, las concentraciones promedio de Pb y Cu en las Zonas 1 y 2 superaron los límites más bajos de la legislación utilizada como de referencia (Tabla 3).

DISCUSIÓN

Desde el punto de vista de la variación climática de la concentración de metales pesados asociados con el sedimento vial (<250 μm), los resultados muestran en promedio que las concentraciones de Pb y Cu en la Zona 1 tienden a ser mayores (61 %) en la época de disminución de la precipitación (tiempo seco). Por lo tanto, los resultados sugieren que en la época de aumento de la precipitación (tiempo de lluvia) probablemente existe remoción de los elementos metálicos asociados con el sedimento vial hacia los sistemas de drenaje pluvial y cuerpos de agua receptores, producto del lavado ejercido por la escorrentía superficial en la Zona 1; posiblemente, en un porcentaje equivalente al anteriormente mencionado.

Por el contrario, en la Zona 2 no existen diferencias significativas entre las concentraciones metálicas (<250 μm) registradas durante las épocas de aumento y disminución de la precipitación; probablemente debido al aporte de elementos metálicos por la ejecución de actividades de construcción en cercanías a la superficie vial de estudio. Por lo tanto, las concentraciones metálicas asociadas con el sedimento vial están probablemente determi-

nadas por el cronograma de construcción (uso del suelo) antes que por las condiciones climáticas del área de estudio. Los resultados muestran con respecto a la fracción de tamaño más fina del sedimento vial ($<63 \mu\text{m}$) y más cercana a la potencialmente inhalable desde el punto de vista de la salud pública ($\leq 10 \mu\text{m}$), que en promedio las concentraciones de Pb y Cu tienden a aumentar en tiempo seco (29 %), en comparación con la época de lluvia. Por lo tanto, los resultados sugieren un aumento de los efectos tóxicos sobre la salud de los usuarios y residentes de áreas cercanas a los corredores viales urbanos en evaluación durante las épocas de tiempo seco. Las concentraciones de Pb y Cu durante estos períodos de tiempo son 1,38 y 2,0 veces superiores al valor límite más bajo fijado por la normatividad utilizada como de referencia.

Finalmente, los anteriores hallazgos se constituyen en un punto de referencia a nivel colombiano para la discusión y publicación de normatividad ambiental asociada con la protección de la salud humana, y para visualizar futuras líneas de investigación acerca del efecto del cambio climático sobre las concentraciones metálicas en ambientes urbanos ♣

Agradecimientos: Los autores desean agradecer el apoyo financiero y logístico del Centro de Investigación y Desarrollo Científico de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas-CIDC (Colombia), y del Grupo de Investigación en Ingeniería Ambiental de la Universidad Distrital F.J.C.-GIIAUD (Colombia).

Conflictos de intereses: Ninguno.

REFERENCIAS

1. Gnecco I, Berretta C, Lanza LG, La-Barbera P. Storm water pollution in the urban environment of Genoa. *Atmos Res* 2005; 77 (1-4):60-73.
2. Helmreich B, Hilliges R, Schriewer A, Horn H. Runoff pollutants of a highly trafficked urban road – Correlation analysis and seasonal influences. *Chemosphere* 2010; 80(9):991-7.
3. Kayhanian M, Suverkropp C, Ruby A, Tsay K. Characterization and prediction of highway runoff constituent event mean concentration. *J Environ Manage* 2007; 85(2):279-95.
4. Stagge JH, Davis AP, Jamil E, Kim H. Performance of grass swales for improving water quality from highway runoff. *Water Res* 2012; 46(20):6731-42.
5. Bian B, Zhu W. Particle size distribution and pollutants in road-deposited sediments in different areas of Zhenjiang. *Environ Geochem Hlth* 2009; 31(4):511-20.
6. Guan DS, Peart MR. Heavy metal concentrations in plants and soils at roadside locations and parks of urban Guangzhou. *J Environ Sci* 2006; 18(3):495-502.
7. Amato F, Schaap M, Denier van der Gon HAC, Pandolfi M, Alastuey A, Keuken M, et al. Short-term variability of mineral dust, metals and carbon emission from road dust resuspension. *Atmos Environ* 2013; 74:134-40.

8. Pan American Health Organization. An assessment of health effects of ambient air pollution in Latin America and the Caribbean. 1st Edition. Washington D.C.: PAHO Press; 2005.
9. Giraldo L, Behrentz E. Estimación del inventario de emisiones de fuentes móviles para la ciudad de Bogotá e identificación de variables pertinentes. 1ª Edición. Bogotá D.C.: Universidad de Los Andes; 2005.
10. Sabin LD, Limb JH, Stolzenbachb KD, Schiffa KC. Contribution of trace metals from atmospheric deposition to stormwater runoff in a small impervious urban catchment. *Water Res* 2005; 39(16):3929-37.
11. Lim JH, Sabin LD, Schiff KC, Stolzenbach KD. Concentration, size distribution, and dry deposition rate of particle-associated metals in the Los Angeles region. *Atmos Environ* 2006; 40(40):7810-23.
12. Estévez JA, Rojas NY, Rodríguez AI. Occupational exposure to air pollutants: particulate matter and respiratory symptoms affecting traffic-police in Bogotá. *Rev Salud Pública* 2013; 15(6):870-85.
13. Pachón J E, Sarmiento H, Hoshiko T. Health risk represented by inhaling polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) during daily commuting involving using a high traffic flow route in Bogotá. *Rev Salud Pública* 2013; 15(3): 399-408.
14. Zafra CA, Luengas EC, Temprano J. Influencia del tráfico en la acumulación de metales pesados sobre vías urbanas: Torrelavega (España)-Soacha (Colombia). *Rev Fac Ing Univ Antioquia* 2013; 67:146-60.
15. Apeageyi E, Bank MS, Spengler JD. Distribution of heavy metals in road dust along an urban-rural gradient in Massachusetts. *Atmos Environ* 2011; 45(13):2310-23.
16. Yuen JQ, Olin PH, Lim HS, Benner SG, Sutherland RA, Ziegler AD. Accumulation of potentially toxic elements in road deposited sediments in residential and light industrial neighborhoods of Singapore. *J Environ Manage* 2012; 101:151-63.
17. Zhao H, Li X. Understanding the relationship between heavy metals in road-deposited sediments and washoff particles in urban stormwater using simulated rainfall. *J Hazard Mater* 2013; 246-247:267-76.
18. Lee JH, Bang KW, Ketchum LH, Choe JS, Yu MJ. First flush analysis of urban storm runoff. *Sci Total Environ* 2002; 293(1-3):163-75.
19. Zhao H, Li X, Wang X, Tian D. Grain size distribution of road-deposited sediment and its contribution to heavy metal pollution in urban runoff in Beijing, China. *J Hazard Mater* 2010; 183(1-3):203-10.
20. Zhu W, Bian B, Li L. Heavy metal contamination of road-deposited sediments in a medium size city of China. *Environ Monit Assess* 2008; 147(1-3):171-81.
21. Zafra CA, Temprano J, Tejero I. Particle size distribution of accumulated sediments on an urban road in rainy weather. *Environ Technol* 2008; 29(5):571-82.
22. International Organization for Standardization. Standards Handbook. 1st Edition. Geneva, Switzerland: ISO Press; 2000.
23. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Características climatológicas de ciudades principales y municipios turísticos de Colombia. 1ª Edición. Bogotá D.C.: IDEAM; 2012.
24. Deletic A, Orr D. Pollution buildup on road surfaces. *J Environ Eng* 2005; 131(1):49-59.
25. Zafra CA, Temprano J, Tejero I. Distribution of the concentration of heavy metals associated with the sediment particles accumulated on road surface. *Environ Technol* 2011; 32(9-10):997-1008.
26. Generalitat de Catalunya. Niveles genéricos de referencia (NGR), valores de los NGR para metales y metaloides y protección de la salud humana aplicables a Cataluña. 1ª Edición. Barcelona, España: Agencia de Residuos de Cataluña; 2006.
27. EUSKO-LEGE BILTZARRA. Ley 1/2005: Prevención de la contaminación del suelo del País Vasco. 1ª Edición. Bilbao, España: Boletín Oficial del País Vasco; 2005.
28. Canadian Council of Ministers of the Environment. Recommended Canadian soil quality guidelines. 1st Edition. Winnipeg, Canada: CCME Press; 1997.