

# Análisis de series de tiempo para concentraciones de PM<sub>10</sub>: influencia de la cobertura superficial urbana

Time-series analysis for PM<sub>10</sub> concentrations: influence of the urban land surface coverage

C.A. Zafra-Mejía  ; J.C. Alarcón-Hincapié  ; L.C. Echeverry-Prieto 

**Abstract**—The increase of respiratory diseases in urban areas is related to the increase of atmospheric particulate matter. This paper shows a daily temporal analysis using ARIMA models of the influence of land surface coverage on PM<sub>10</sub> concentrations in Bogota city, Colombia. This study was developed from information (years 2007-2012) of six automatic monitoring stations. ARIMA models showed a greater PM<sub>10</sub> persistence (2 days) on urban areas with vegetated surface coverage. However, urban areas with vegetated surface coverage showed lower daily PM<sub>10</sub> concentrations (-42.7%) in relation to areas of impervious surface coverage.

**Index Terms**—Air quality, ARIMA, Bogota, PM<sub>10</sub>, surface coverage, time series.

**Resumen**—El incremento de enfermedades respiratorias en áreas urbanas está relacionado con el incremento del material particulado atmosférico. Este artículo presenta un análisis temporal diario mediante modelos ARIMA de la influencia de la cobertura superficial sobre las concentraciones de PM<sub>10</sub> en la ciudad de Bogotá, Colombia. La investigación se desarrolló a partir de los registros (años 2007-2012) de seis estaciones automáticas de monitoreo. Los modelos ARIMA evidenciaron una mayor persistencia de PM<sub>10</sub> (2 días) en áreas con cobertura vegetada. Sin embargo, las áreas urbanas con cobertura vegetada registraron menores concentraciones diarias de PM<sub>10</sub> (-42.7%) en comparación con áreas de cobertura impermeable.

Este manuscrito fue enviado en marzo 20 de 2018 y fue aceptado en marzo 28 de 2019. Este trabajo fue apoyado académicamente por el Grupo de Investigación en Ingeniería Ambiental de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Colombia) y se recibió también apoyo logístico de la Secretaría Distrital de Ambiente de la ciudad de Bogotá (Colombia).

C.A. Zafra-Mejía, Ingeniería Ambiental, Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Carrera 5 Este N° 15 - 82, C.P. 110321, Bogotá, Colombia (e-mail: czafra@udistrital.edu.co). \* Autor de correspondencia.

J.C. Alarcón-Hincapié, Ingeniería Ambiental, Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Carrera 5 Este N° 15 - 82, C.P. 110321, Bogotá, Colombia (e-mail: jcalarconh@udistrital.edu.co).

L.C. Echeverry-Prieto, Ingeniería Ambiental, Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Carrera 5 Este N° 15 - 82, C.P. 110321, Bogotá, Colombia (e-mail: lcecheverryp@udistrital.edu.co).

**Palabras claves**—ARIMA, Bogotá, calidad del aire, cobertura superficial, series de tiempo, PM<sub>10</sub>.

## I. INTRODUCCIÓN

EL monitoreo de la calidad del aire es relevante para las organizaciones encargadas de la salud pública y ambiental en áreas urbanas, debido a que las investigaciones reportan una relación directa entre las enfermedades respiratorias en niños y adultos mayores, y la contaminación atmosférica por material particulado [1,2]. El aumento del material particulado de tamaño menor o igual a 10 μm (PM<sub>10</sub>) está principalmente asociado con la concentración de actividades industriales e incremento del parque automotor en áreas urbanas [3,4]. A partir de lo anterior, es relevante desde el punto de vista de la salud pública y ambiental estudiar la variación en el tiempo de las concentraciones de PM<sub>10</sub> y su posible relación con el tipo de cobertura superficial existente en áreas urbanas.

En los análisis de variación de las concentraciones de PM<sub>10</sub> es necesario incluir las condiciones climáticas del área de estudio. Al respecto, Seinfeld y Pandis [5] reportaron que la distribución y transporte del PM<sub>10</sub> dependieron significativamente del grado de estabilidad atmosférica (velocidad del viento y gradiente térmico). Lee et al. [6] evidenciaron un incremento significativo de las concentraciones de PM<sub>10</sub> (> 100 μg/m<sup>3</sup>) bajo condiciones extremas de estabilidad atmosférica (inversión térmica) en la ciudad de Seúl (Corea). Vecchi et al. [7] reportaron un incremento del 13% en las concentraciones de PM<sub>10</sub> bajo condiciones predominantes de estabilidad atmosférica nocturna en la ciudad de Milán (Italia). Por otro lado, estos investigadores reportaron que bajo condiciones de inestabilidad atmosférica diurna las concentraciones de PM<sub>10</sub> tendieron a disminuir (mayor dispersión).

El tipo de cobertura superficial urbana también influye en la variación de las concentraciones de PM<sub>10</sub>. Chen et al. [8] reportaron que la presencia de árboles en la ciudad de Wuhan (China) permitió disminuir entre 7-15% la concentración de PM<sub>10</sub>. Igualmente, Islam et al. [9] reportaron una reducción de las partículas suspendidas totales (< 100 μm) de áreas urbanas

del 55% (Khulna, Bangladesh). McDonald et al. [10] pronosticaron mediante sistemas de información geográfica e investigación de campo, que un incremento entre 3,7-16,5% y 3,6-8,0% de la cobertura total de árboles en conurbaciones de West Midlands y Glasgow (Reino Unido) generaría una reducción de 10% y 2% en las concentraciones de  $PM_{10}$  primario, respectivamente. La cobertura superficial con árboles actúa como un sumidero efectivo de contaminantes atmosféricos gaseosos y particulados, con tasas de deposición atmosférica seca que superan entre 3 y 20 veces las tasas de deposición atmosférica seca de los pastizales [11].

El polvo mineral de suelos descubiertos (sin cobertura vegetal permanente) fue identificado como el responsable de la disminución de la calidad del aire en varias ciudades de Europa Central (p.ej., Berlín y Zúrich) [12,13]. Al respecto, Titos et al. [14] reportaron que en la ciudad de Granada (España) durante condiciones de verano seco más del 50% del  $PM_{10}$  correspondió a polvo mineral re-suspendido desde suelos descubiertos y vías urbanas. Waked et al. [15] evidenciaron que el 13% del  $PM_{10}$  promedio anual de la ciudad de Lens (Francia) fue aportado por suelos descubiertos (fuentes de polvo mineral). Existe consenso que los principales parámetros que determinan la producción de polvo y  $PM_{10}$  desde suelos descubiertos son la tasa de saltación (energía cinética por viento) y la textura del suelo [16]. Por ejemplo, se demostró que el potencial de emisión del  $PM_{10}$  aumentó con el contenido de limo y arcilla, y disminuyó con el contenido de arena del suelo [17].

La experiencia en la modelización de la calidad del aire evidencia que los modelos meteorológicos multi-paramétricos más sofisticados tienden a subestimar o sobrestimar significativamente las concentraciones de contaminantes atmosféricos debido a la complejidad de los fenómenos involucrados [18]. Es decir, a los procesos físico-químicos que los contaminantes experimentan, las condiciones meteorológicas, al uso del suelo y la incertidumbre en los registros de los parámetros en estudio. De esta manera, desde el punto de vista operacional los pronósticos a corto y mediano plazo están fundamentados en técnicas de modelización estadística de series de tiempo [19]. Los modelos ARIMA para el análisis de series de tiempo han sido aplicados en varias investigaciones, las cuales reportan un ajuste razonable y gran utilidad para simular y pronosticar el comportamiento de los contaminantes atmosféricos [3,20]. Adicionalmente, se reporta la utilidad de los modelos ARIMA para evaluar el grado de persistencia en el tiempo de los contaminantes atmosféricos. Es decir, facilitan de una manera auto-regresiva (“memoria” del fenómeno) la interpretación de la variabilidad de los datos en la serie de tiempo [21].

El objetivo de este artículo es presentar un análisis temporal diario mediante modelos ARIMA de la influencia de la cobertura superficial sobre las concentraciones de  $PM_{10}$  en la ciudad de Bogotá, Colombia. La investigación se desarrolla en seis estaciones automáticas de monitoreo ubicadas sobre cuatro localidades de la ciudad. Las estaciones seleccionadas cubren una distancia de 23,9 km, de los 33 km que posee la ciudad de norte a sur. La investigación permite visualizar la necesidad de desarrollar estrategias diferenciadas por parte de

los organismos de control de la calidad del aire, según el tipo de cobertura superficial existente en áreas urbanas.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

### A. Lugares de investigación

La investigación se desarrolló en una ciudad latinoamericana de elevada altitud (Bogotá, Colombia), localizada sobre la cordillera de los Andes (04°36'35"N-74°04'54"W) a una altitud promedio de 2600 m.s.n.m. Las seis estaciones automáticas de monitoreo se ubicaron en las localidades de Kennedy (E1 y E2), Puente Aranda (E3), Suba (E4 y E5), y Barrios Unidos (E6). El clima tropical de montaña (clima frío) de los lugares de investigación se caracterizó por presentar durante el período de muestreo una temperatura promedio diaria entre 13,3 y 14,3 °C, con variaciones horarias entre 7,2 y 19 °C. La Tabla 1 presenta las principales características de las zonas de localización de cada estación de monitoreo. Todas las estaciones de monitoreo contaron con instrumentos de medición para  $PM_{10}$ , temperatura, y dirección y velocidad del viento. Adicionalmente, las estaciones E1, E5 y E6 fueron proveídas con instrumentos para la medición de radiación solar. Las áreas de influencia de las estaciones seleccionadas no experimentaron cambios significativos en la cobertura superficial durante el periodo de investigación, el cual estuvo comprendido entre los años 2007-2012.

### B. Monitoreo de $PM_{10}$

El periodo de muestreo tuvo una duración de seis años (01/01/2007-31/12/2012). El sistema de muestreo para  $PM_{10}$  estuvo constituido por equipos de monitoreo continuo de partículas mediante atenuación de rayos beta (Met One Instruments, BAM 1020). El protocolo de muestreo para  $PM_{10}$  se basó en lo establecido por la U.S.EPA: EPA/625/R-96/010a-IO-1.2 [22]. La tasa de flujo constante de los equipos fue de 16,7 l/min. El límite inferior de detección fue de 3,6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y 1,0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para intervalos de muestreo horarios y diarios, respectivamente. La resolución en la medición fue de 0,24  $\mu\text{g}$  en un rango de 1 mg. La precisión fue de  $\pm 8\%$  para intervalos horarios y  $\pm 2\%$  para intervalos diarios.

### C. Análisis de la estabilidad atmosférica

La condición de estabilidad atmosférica (EA) fue determinada a través de las metodologías de Pasquill [23] y Gifford [24], con registros horarios de velocidad del viento y radiación solar. Se analizó a nivel horario la condición de EA predominante según su frecuencia de ocurrencia en toda el área urbana de localización de las estaciones de monitoreo. Las estaciones utilizadas para este cálculo fueron E1, E5 y E6 debido a que contaron con instrumentos de medición para radiación solar. En el presente estudio se adaptó la siguiente escala cuantitativa para identificar cada condición de EA: 1-estable, 2-ligeramente estable, 3-neutra, 3,5-neutra a ligeramente inestable, 4-ligeramente inestable, 4,5-ligeramente inestable a inestable, 5-inestable, 5,5-inestable a muy inestable, y 6-muy inestable.

TABLA 1. CARACTERÍSTICAS DE LAS ZONAS DE LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES DE MONITOREO

| Característica   | E1 (Kennedy)                 | E2 (Carvajal)                | E3 (Puente Aranda)          | E4 (Corpas)                  | E5 (Guaymaral)              | E6 (Barrios Unidos)         |
|--|------------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Coordenadas  | 4°37'30,18"N<br>74°9'40,80"W | 4°35'44,22"N<br>74°8'54,90"W | 4°37'54,36"N<br>74°7'2,94"W | 4°45'40,49"N<br>74°5'36,46"W | 4°47'1,52"N<br>74°2'39,06"W | 4°39'30,48"N<br>74°5'2,28"W |
| Elevación (m.s.n.m.)   | 2580                         | 2563                         | 2590                        | 2571                         | 2580                        | 2577                        |
| PM <sub>10</sub> promedio diario (µg/m <sup>3</sup> ) <sup>a</sup> | 85,9                         | 81,7                         | 65,7                        | 58,7                         | 34,9                        | 40,0                        |
| Precipitación promedio anual (mm) <sup>a</sup>                     | 521                          | 728                          | 909                         | 762                          | 832                         | 1084                        |
| Velocidad promedio diaria del viento <sup>a</sup>                  | 2,2                          | 2,0                          | 2,5                         | 1,2                          | 1,0                         | 1,35                        |
| Dirección predominante del viento <sup>a</sup>                     | SW                           | SW                           | W                           | SE                           | SE                          | W                           |
| Temperatura promedio diaria (°C) <sup>a</sup>                      | 14,3                         | 14,3                         | 14,1                        | 13,3                         | 14,2                        | 14,3                        |
| Tipo de zona   | Urbana                       | Urbana                       | Urbana                      | Suburbana                    | Suburbana                   | Urbana                      |
| Uso del suelo <sup>b</sup>   | R-C                          | I-R                          | I-C                         | R-IN                         | IN                          | R-IN                        |
| Impermeable/Vegetada/No vegetada/Cuerpos de agua (%)               | 68,9/30,7/0,4/0,0            | 88,2/10,1/0,0/1,7            | 86,0/4,6/9,5/0,0            | 35,6/59,7/4,7/0,0            | 22,6/74,6/1,1/1,7           | 9,7/86,2/4,1/0,0            |
| Localización del toma muestra (m) <sup>c</sup>                     | 7                            | 6                            | 13                          | 9                            | 4                           | 4,6                         |
| Densidad poblacional (habitantes/ha)                               | 400                          | 350                          | 50                          | 250                          | < 1                         | 30                          |

<sup>a</sup>Durante el periodo de investigación.

<sup>b</sup>R-residencial, I-industrial, C-comercial, IN-institucional.

<sup>c</sup>Con respecto a la superficie del terreno.

#### D. Análisis de la cobertura urbana

Para determinar el tipo de cobertura urbana alrededor de cada estación en estudio se trazó sobre imágenes satelitales un recuadro inicial de 80000 m<sup>2</sup>, con diagonales de 400 m y centro sobre cada una de las estaciones de monitoreo. Adicionalmente, para evaluar la variación espacial en el tipo de cobertura se consideraron recuadros de diferentes longitudes en sus diagonales para cada estación de monitoreo: 100 m (5000 m<sup>2</sup>), 200 m (20000 m<sup>2</sup>), 400 m (80000 m<sup>2</sup>), 800 m (320000 m<sup>2</sup>), 1600 m (1280000 m<sup>2</sup>) y 3200 m (10240000 m<sup>2</sup>). Se consideraron cuatro tipos de cobertura urbana: vegetada (árboles y pastizales), no vegetada (suelos descubiertos), impermeable (tejados de edificaciones, pavimentos y senderos peatonales) y cuerpos de agua (ríos, lagos y humedales). En los anteriores análisis se tomaron como guías metodológicas las investigaciones sobre uso del suelo y calidad del aire de Bach et al. [25] e Irga et al. [26], respectivamente. La identificación y cuantificación de las coberturas se realizó mediante el programa informático Google Earth Pro V. 7.1.5.1557. Los lugares de investigación no estuvieron sometidos a cambios en su cobertura durante el período de monitoreo de PM<sub>10</sub> seleccionado.

#### E. Análisis de series de tiempo

Los registros horarios de PM<sub>10</sub> fueron agregados diariamente (media móvil para 24 horas) para el análisis de series de tiempo mediante modelos ARIMA. Se aplicaron las cuatro etapas del proceso iterativo de Box-Jenkins [27] para el desarrollo de los modelos: identificación, estimación de parámetros, verificación de supuestos, y uso del modelo; las cuales fueron desarrolladas mediante el programa informático IBM-SPSS (Statistical Package for the Social Sciences, V.

21.0.0). No se consideraron datos atípicos para los modelos ARIMA desarrollados.

La verificación de supuestos de los modelos desarrollados fue evaluada mediante el estadístico de Q-(Ljung-Box). Este estadístico prueba la hipótesis nula de no existencia de autocorrelaciones significativas en los residuales del modelo y proporciona una indicación de si el modelo está correctamente desarrollado. Un *p*-valor superior a 0,05 significa que el modelo está correctamente estructurado para describir la información de correlación en las series de tiempo [28]. Otro índice utilizado para identificar el mejor modelo ARIMA fue el criterio de información Bayesiano, BIC [29]. El modelo óptimo fue aquel que presentó un menor BIC. La bondad del ajuste de cada modelo ARIMA desarrollado fue evaluada mediante el coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>). Una vez elegido el modelo con las mejores características estadísticas, sus términos fueron analizados para deducir la estructura temporal (AR, I, MA) de las series de tiempo para las concentraciones diarias de PM<sub>10</sub>. Finalmente, la estructura temporal de los modelos fue analizada con respecto a la variación espacial de la cobertura superficial según las distancias de influencia establecidas para cada estación de monitoreo (entre 50 m y 1600 m).

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### A. Estabilidad atmosférica

Los análisis de estabilidad atmosférica (EA) fueron realizados a partir de los registros de velocidad del viento y radiación solar de las estaciones E1, E5 y E6. Estas estaciones cubrieron una distancia de 23,9 km en línea recta, de los 33 km que posee la ciudad de norte a sur. Las estaciones E2, E3 y E4 estuvieron localizadas entre las estaciones E1 y E6. La Figura 1 presenta la condición promedio horaria de EA

durante el período de investigación a partir de la escala cuantitativa adoptada en el presente estudio. Se observó que la condición de EA dominante entre las 6 y 18 horas fue ligeramente inestable (EA = 4; frecuencia para 24 h, f-24 h = 19,5%), inestable (EA = 5; f-24 h = 24,5%) e inestable (EA = 5; f-24 h = 22,7%) para las estaciones E1, E5 y E6, respectivamente; la condición de EA dominante entre las 18 y 6 horas fue estable (EA = 1): 35,0% (f-24 h), 49,2% (f-24 h) y 50,0% (f-24 h), respectivamente.

A partir de lo anterior, los resultados mostraron que la condición dominante de EA durante el día (6-18 horas) estuvo entre ligeramente inestable e inestable (EA entre 4 y 5,5; f-24 h: 46,1%) en toda el área de investigación. Durante la noche (18-6 horas) la condición de EA predominante fue estable (EA = 1; f-24 h: 45,1%). Una prueba ANOVA entre las estaciones E1, E5 y E6 mostró que no existieron variaciones horarias significativas en la condición de EA ( $p > 0,05$ ). Lo anterior evidenció un comportamiento similar en la condición horaria de EA para todas las estaciones seleccionadas, y sugirió para el presente estudio, que las diferencias en los términos de los modelos desarrollados (AR, I, MA) probablemente no estuvieron influenciadas por la condición de EA.

**B. Cobertura urbana**

La tabla 2 presenta la variación espacial en el tipo de cobertura urbana para las distancias de influencia definidas sobre cada estación de monitoreo. Existieron tres estaciones con predominio de cobertura impermeable: E1, E2 y E3. Este tipo de cobertura representó entre 54,5-85,8%, 80,9-93,3% y 86,0-92,0% del área, respectivamente; a partir de las distancias de influencia establecidas para cada estación de monitoreo (entre 50-1600 m). El orden de precedencia para este tipo de cobertura urbana en las estaciones de monitoreo fue el siguiente: E3 > E2 > E1. Por otro lado, existieron tres estaciones con predominio de cobertura vegetada: E4, E5 y E6; este tipo de cobertura representó entre 6,4-71,8%, 40,1-78,4%, y 39,3-97,0% del área, respectivamente. El orden de precedencia para este tipo de cobertura en las estaciones de monitoreo fue el siguiente: E6 > E5 > E4. De esta manera, existieron tres estaciones de monitoreo con predominio de cobertura impermeable y tres estaciones con predominio de cobertura vegetada para analizar su influencia sobre los modelos ARIMA desarrollados.

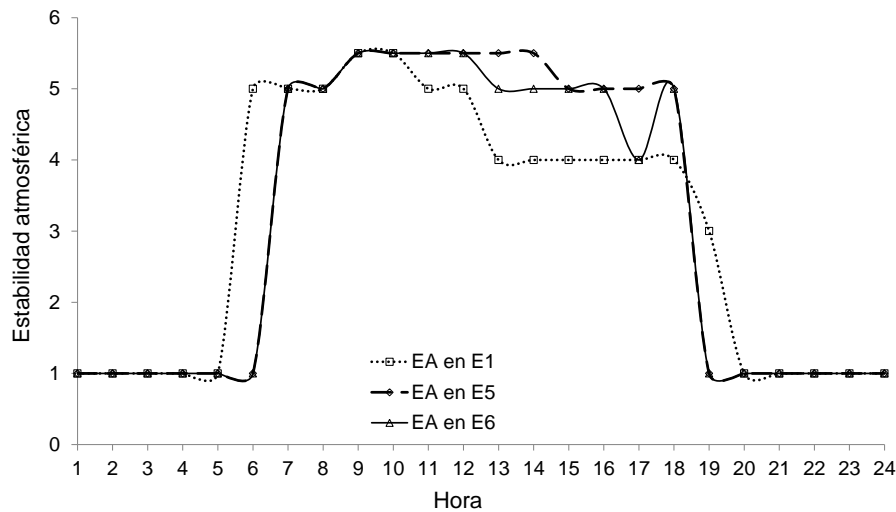


Fig. 1. Condición promedio horaria de EA en las áreas de investigación. EA: 1-estable, 2-ligeramente estable, 3-neutra, 3,5-neutra a ligeramente inestable, 4-ligeramente inestable, 4,5-ligeramente inestable a inestable, 5-inestable, 5,5-inestable a muy inestable, y 6-muy inestable.

TABLA 2. VARIACIÓN ESPACIAL DEL TIPO DE COBERTURA URBANA CON RESPECTO A LAS ESTACIONES DE MONITOREO

| Estación <sup>a</sup> | Tipo de cobertura (%) <sup>b</sup> | Distancia de influencia (m) |      |      |      |      |      | Estación <sup>a</sup> | Tipo de cobertura (%) <sup>b</sup> | Distancia de influencia (m) |      |      |      |      |      |
|-----------------------|------------------------------------|-----------------------------|------|------|------|------|------|-----------------------|------------------------------------|-----------------------------|------|------|------|------|------|
|                       |                                    | 50                          | 100  | 200  | 400  | 800  | 1600 |                       |                                    | 50                          | 100  | 200  | 400  | 800  | 1600 |
| E1                    | V                                  | 41,4                        | 45,5 | 30,7 | 18,8 | 12,8 | 10,9 | E4                    | V                                  | 6,36                        | 32,3 | 59,7 | 71,8 | 69,5 | 55,1 |
|                       | NV                                 | 0,00                        | 0,00 | 0,39 | 11,0 | 5,02 | 2,90 |                       | NV                                 | 2,69                        | 4,9  | 4,66 | 5,69 | 3,75 | 3,2  |
|                       | I                                  | 58,6                        | 54,5 | 68,9 | 68,4 | 80,8 | 85,8 |                       | I                                  | 91,0                        | 62,8 | 35,6 | 22,1 | 26,6 | 40,4 |
|                       | CA                                 | 0,00                        | 0,00 | 0,00 | 1,83 | 1,34 | 0,34 |                       | CA                                 | 0,00                        | 0,00 | 0,00 | 0,45 | 0,22 | 1,3  |
| E2                    | V                                  | 6,71                        | 7,01 | 10,1 | 9,66 | 15,4 | 16,0 | E5                    | V                                  | 40,1                        | 55,8 | 74,6 | 76,4 | 76,2 | 78,4 |
|                       | NV                                 | 0,00                        | 0,00 | 0,00 | 1,01 | 2,48 | 2,1  |                       | NV                                 | 0,00                        | 0,00 | 1,08 | 1,29 | 3,36 | 2,83 |
|                       | I                                  | 93,3                        | 93,0 | 88,2 | 87,7 | 80,9 | 80,9 |                       | I                                  | 59,9                        | 41,9 | 22,6 | 21,9 | 18,8 | 17,9 |
|                       | CA                                 | 0,00                        | 0,00 | 1,73 | 1,6  | 1,25 | 1,03 |                       | CA                                 | 0,00                        | 2,35 | 1,73 | 0,44 | 1,72 | 0,94 |
| E3                    | V                                  | 11,6                        | 8,81 | 4,56 | 3,85 | 5,24 | 10,2 | E6                    | V (%)                              | 88,0                        | 97,0 | 86,2 | 74,4 | 57,8 | 39,3 |
|                       | NV                                 | 0,00                        | 0,00 | 9,45 | 8,46 | 2,74 | 2,76 |                       | T (%)                              | 0,00                        | 0,00 | 4,05 | 4,47 | 1,6  | 0,42 |
|                       | I                                  | 88,4                        | 91,2 | 86,0 | 87,7 | 92,0 | 86,5 |                       | I (%)                              | 12,0                        | 2,99 | 9,73 | 20,7 | 35,9 | 56,5 |
|                       | CA                                 | 0,00                        | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,53 |                       | CA (%)                             | 0,00                        | 0,00 | 0,00 | 0,45 | 4,62 | 3,70 |

<sup>a</sup>E1, E2 y E3: predominio de cobertura impermeable; E4, E5 y E6: predominio de cobertura vegetada.

<sup>b</sup>V = Vegetada (árboles y pastizales); NV = no vegetada (suelos descubiertos); I = impermeable (tejados de edificaciones, pavimentos y senderos peatonales); CA = cuerpos de agua (ríos, lagos y humedales).

### C. Concentraciones de $PM_{10}$

En promedio, se observó en todas las estaciones de monitoreo un incremento en la concentración horaria de  $PM_{10}$  a partir de las 5 a.m., disminuyendo entre las 11 a.m. y 12 p.m. Los picos en las concentraciones de  $PM_{10}$  se registraron entre las 8 y 9 a.m. Los resultados mostraron una tendencia similar en las concentraciones horarias de  $PM_{10}$  para todas las estaciones durante el periodo de estudio (Figura 2). Al respecto, un análisis de correlación lineal entre todas las estaciones de monitoreo mostró relaciones positivas entre medias y muy fuertes ( $r$ -Pearson entre 0,62 y 0,98). De esta manera, los resultados sugirieron un comportamiento uniforme en los ciclos horarios de las fuentes de emisión fijas y móviles de  $PM_{10}$  en toda el área de investigación. Se consideró esta misma tendencia para las series de tiempo diarias de  $PM_{10}$  generadas en este estudio, debido a que las concentraciones horarias de  $PM_{10}$  fueron agregadas diariamente para el análisis ARIMA (media móvil para 24 h).

A partir de lo anterior, los hallazgos también sugirieron que la tendencia horaria de las concentraciones de  $PM_{10}$  estuvo principalmente influenciada por los ciclos uniformes de emisión de las fuentes fijas y móviles de las áreas de estudio, antes que por la condición horaria de EA existente. Lo anterior estuvo sustentado en el hecho de que la condición horaria de EA durante el periodo de investigación no experimentó

variaciones significativas entre las estaciones de monitoreo bajo estudio (ANOVA,  $p > 0,05$ ). En promedio, la EA dominante durante el día (6-18 horas) estuvo entre ligeramente inestable e inestable ( $f$ -12 h = 92,2%), y durante la noche (18-6 horas) la EA dominante fue estable (EA = 1;  $f$ -12 h = 90,2%). De esta manera, se consideró en la presente investigación un escenario donde probablemente la condición de EA no tuvo influencia directa sobre la estructura temporal de los modelos ARIMA desarrollados en cada estación de monitoreo.

### D. Análisis de series de tiempo para $PM_{10}$

El análisis de series de tiempo para concentraciones de  $PM_{10}$  fue desarrollado bajo una escala temporal diaria (media móvil de 24 h). A nivel horario no fue posible desarrollar modelos ARIMA que cumplieran con un  $p$ -valor superior a 0,05 en el estadístico de Ljung-Box. Estos modelos no estuvieron correctamente estructurados según lo establecido por Ljung y Box [28]. En el presente estudio, los resultados evidenciaron la dificultad de los modelos ARIMA para interpretar y, por lo tanto, pronosticar la estructura temporal de las concentraciones de  $PM_{10}$  a nivel horario.

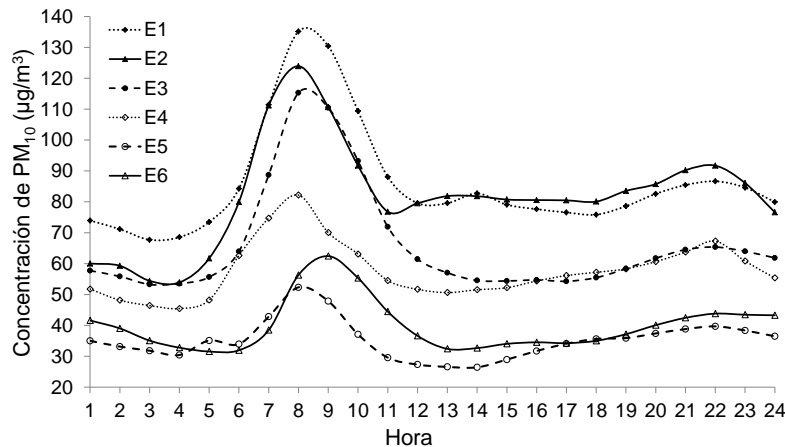


Fig. 2. Concentración promedio horaria de  $PM_{10}$  durante el periodo de estudio. E1, E2 y E3: predominio de cobertura impermeable. E4, E5 y E6: predominio de cobertura vegetada.

La Tabla 3 presenta los términos, tipo de transformación,  $R^2$ , error absoluto porcentual promedio y  $p$ -valor del estadístico de Q-(Ljung-Box) para los modelos ARIMA desarrollados a nivel diario. También presenta la distribución de la cobertura urbana según las distancias de influencia seleccionadas para cada estación de monitoreo. Al respecto, un análisis de correlación lineal entre las estaciones donde predominó la cobertura impermeable (E1, E2 y E3) mostró, en promedio, que la estación de monitoreo con las mejores correlaciones para la cobertura urbana fue E1 ( $r$ -Pearson promedio = 0,91). El análisis de correlación también permitió observar que las distancias de influencia a cada estación con las mejores y peores correlaciones para la cobertura urbana fueron 1600 m ( $r$ -Pearson promedio = 0,97) y 100 m ( $r$  =

0,88), respectivamente. Los resultados sugirieron que un incremento en la distancia con respecto a las estaciones de monitoreo donde predominó la cobertura impermeable generó una distribución más similar entre estaciones en este tipo de cobertura urbana (ver Tabla 2).

A partir de lo anterior, se seleccionó a E1 como la estación de referencia para comparar los modelos ARIMA desarrollados; y 100 m, como la distancia de influencia para analizar las posibles diferencias entre los modelos ARIMA de áreas con predominio de cobertura impermeable. Al respecto, los resultados mostraron diferencias entre estaciones en relación a la distribución de la cobertura impermeable (E1 = 54,5%; E2 = 93,0%; y E3 = 91,2%). El término auto-regresivo (AR) de los modelos ARIMA desarrollados permitió sugerir

una diferencia probablemente asociada con este tipo de cobertura urbana. Al disminuir la cobertura impermeable alrededor de una estación de monitoreo se sugirió un incremento en el término AR del modelo ARIMA (Tabla 3). Es decir, entre menor sea el área impermeable alrededor de una estación de monitoreo, mayor será la influencia de las concentraciones de PM<sub>10</sub> de días anteriores; en este caso particular de dos días inmediatamente anteriores (E1, AR = 2). En el presente estudio, los resultados sugirieron una mayor persistencia en el tiempo del PM<sub>10</sub> en áreas urbanas donde disminuyó la cobertura impermeable y aumentó la cobertura vegetada (árboles y pastizales).

Un análisis de correlación lineal entre las estaciones donde predominó la cobertura vegetada (E4, E5 y E6) mostró, en promedio, que la estación de monitoreo con las mejores correlaciones para la cobertura urbana fue E4 (*r*-Pearson promedio = 0,73). El análisis de correlación lineal también permitió observar que las distancias de influencia a cada estación con las mejores y peores correlaciones para la cobertura urbana fueron 800 m (*r*-Pearson promedio = 0,87) y 50 m (*r* = 0,64), respectivamente. De esta manera, se seleccionó a E4 como la estación de referencia para comparar los modelos ARIMA desarrollados; y 50 m, como la distancia de influencia para analizar las posibles diferencias entre los modelos ARIMA de áreas con predominio de cobertura vegetada.

A partir de lo anterior, los resultados mostraron diferencias entre estaciones para la distribución de la cobertura vegetada (E4 = 6,4%; E5 = 40,1%; E6 = 88,0%). El término auto-regresivo (AR) de los modelos ARIMA desarrollados nuevamente permitió sugerir una diferencia probablemente asociada con la cobertura vegetada. Un incremento en la cobertura vegetada alrededor de una estación de monitoreo probablemente generó un incremento en el término AR del

modelo ARIMA (Tabla 3). Es decir, entre mayor sea el área vegetada, mayor será la influencia de las concentraciones de PM<sub>10</sub> de los días anteriores; en este caso particular de dos días inmediatamente anteriores (E6, AR = 2). De nuevo los resultados sugirieron una mayor persistencia en el tiempo del PM<sub>10</sub> en áreas urbanas donde aumentó la cobertura vegetada y disminuyó la cobertura impermeable (tejados de edificaciones, pavimentos y senderos peatonales).

Las estaciones con predominio de cobertura vegetada registraron menores concentraciones de PM<sub>10</sub> (42.7%) con respecto de las zonas con predominio de cobertura impermeable (Figura 2). Esta tendencia en las concentraciones de PM<sub>10</sub> probablemente influyó en su persistencia sobre áreas con predominio de cobertura vegetada, evidenciada en un incremento del término auto-regresivo (AR) de los modelos ARIMA desarrollados. De esta manera, los resultados sugirieron una mayor persistencia del PM<sub>10</sub> en zonas donde se registraron menores concentraciones de este contaminante atmosférico.

Por otro lado, el término de promedios móviles (MA) de los modelos ARIMA desarrollados permitió sugerir una diferencia probablemente asociada con la cobertura vegetada. Los resultados mostraron que en estaciones con predominio de cobertura vegetada (E4, E5 y E6) se tendieron a registrar mayores magnitudes en el término MA (Tabla 3). Es decir, entre mayor sea la cobertura vegetada, mayor será la influencia de las variaciones en la concentración de PM<sub>10</sub> de días anteriores; en este estudio la influencia fue de dos a tres días inmediatamente anteriores (MA entre 2 y 3). Por lo tanto, los resultados sugirieron que en áreas con predominio de cobertura vegetada existió una mayor variabilidad de las concentraciones diarias de PM<sub>10</sub>.

TABLA 3. MODELOS ARIMA DESARROLLADOS A PARTIR DE LA VARIACIÓN DE LA COBERTURA URBANA

| Estación | Modelo ARIMA <sup>a</sup> |   |    |                |                |                             |                       | Cobertura superficial (%) <sup>b</sup> |     |      |    |                    |     |      |     |
|----------|---------------------------|---|----|----------------|----------------|-----------------------------|-----------------------|--|-----|------|----|--------------------|-----|------|-----|
|          | AR                        | I | MA | Transformación | R <sup>2</sup> | Error absoluto promedio (%) | P-valor, Q(Ljung-Box) | Distancia = 100 m                      |     |      |    | Distancia = 1600 m |     |      |     |
|          |                           |   |    |                |                |                             |                       | V                                      | T   | I    | CA | V                  | T   | I    | CA  |
| E1       | 2                         | 1 | 2  | Log natural    | 0,993          | 1,08                        | 0,425                 | 45,5                                   | 0   | 54,5 | 0  | 10,9               | 2,9 | 85,9 | 0,3 |
| E2       | 1                         | 1 | 0  | Log natural    | 0,969          | 1,50                        | 0,404                 | 7,0                                    | 0   | 93,0 | 0  | 16,0               | 2,1 | 80,9 | 1,0 |
| E3       | 1                         | 1 | 1  | Log natural    | 0,971          | 1,84                        | 1,000                 | 8,8                                    | 0   | 91,2 | 0  | 18,2               | 2,8 | 86,5 | 0,5 |
|          |                           |   |    |                |                |                             |                       | Distancia = 50 m                       |     |      |    | Distancia = 800 m  |     |      |     |
| E4       | 1                         | 1 | 3  | Log natural    | 0,999          | 0,77                        | 0,069                 | 6,4                                    | 2,7 | 90,9 | 0  | 69,5               | 3,8 | 26,5 | 0,2 |
| E5       | 1                         | 1 | 2  | Log natural    | 0,992          | 1,32                        | 0,076                 | 40,1                                   | 0   | 59,9 | 0  | 76,1               | 3,4 | 18,8 | 1,7 |
| E6       | 2                         | 1 | 3  | Log natural    | 0,993          | 1,70                        | 0,176                 | 88,0                                   | 0   | 12,0 | 0  | 57,9               | 1,6 | 35,9 | 4,6 |

<sup>a</sup>Todos los modelos fueron desarrollados sin constante.

<sup>b</sup>V = Vegetada (árboles y pastizales); T = No vegetada (suelo descubierto); I = Impermeable (techos, pavimento y senderos peatonales); CA = Cuerpos de agua (ríos, lagos y humedales).

#### IV. CONCLUSIONES

La condición de EA tiende a registrar un comportamiento horario similar en superficie durante todo el período de estudio: (i) EA diurna entre ligeramente inestable e inestable, con una frecuencia horaria promedio en 24 h de 46,1%; y (ii) EA nocturna estable, con una frecuencia horaria promedio en 24 h de 45,1%. Adicionalmente, en la superficie urbana no se

evidencian variaciones espaciales significativas de la condición de EA diurna y nocturna durante el periodo de estudio. Las concentraciones horarias y diarias de PM<sub>10</sub> están principalmente influenciadas por los ciclos de emisión de las fuentes fijas y móviles en las áreas de estudio antes que por la condición de EA existente.

Los análisis de las series de tiempo evidencian una mayor persistencia en el tiempo del PM<sub>10</sub> cuando aumenta la cobertura vegetada (árboles y pastizales). En este caso

particular la persistencia del PM<sub>10</sub> en suelos urbanos con predominio de cobertura vegetada es de dos días. Lo anterior se evidencia en un incremento del término auto-regresivo (AR) de los modelos ARIMA desarrollados. Sin embargo, las áreas urbanas con cobertura vegetada registran menores concentraciones diarias de PM<sub>10</sub> (-42.7%) en comparación con áreas de cobertura impermeable. Adicionalmente, el término de promedios móviles (MA) tiende a aumentar en áreas urbanas con predominio de cobertura vegetada. Los resultados sugieren que en estas áreas también existe una mayor variabilidad de las concentraciones de PM<sub>10</sub>.

Finalmente, los hallazgos de esta investigación se constituyen en un punto de referencia para profundizar el conocimiento acerca de la aplicación e interpretación de los modelos ARIMA en estudios de PM<sub>10</sub>, y para el desarrollo e implementación de estrategias diferenciadas para el control de la contaminación atmosférica según la cobertura del suelo urbano.

#### AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Grupo de Investigación en Ingeniería Ambiental de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas (GIIAUD) y a la Secretaría Distrital de Ambiente de la ciudad de Bogotá (Colombia).

#### REFERENCIAS

- [1] C. A. P. III y D. W. Dockery, "Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines that Connect", *J. Air Waste Manag. Assoc.*, vol. 56, n.o 6, pp. 709-742, jun. 2006. DOI: 10.1080/10473289.2006.10464485.
- [2] P. Wang, Y. Liu, Z. Qin, y G. Zhang, "A novel hybrid forecasting model for PM10 and SO2 daily concentrations", *Sci. Total Environ.*, vol. 505, pp. 1202-1212, feb. 2015. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.10.078
- [3] S. G. Gocheva-Ilieva, A. V. Ivanov, D. S. Voynikova, y D. T. Boyadzhiev, "Time series analysis and forecasting for air pollution in small urban area: an SARIMA and factor analysis approach", *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.*, vol. 28, n.o 4, pp. 1045-1060, may 2014. DOI: 10.1007/s00477-013-0800-4
- [4] D. F. Palacio-Soto, C. A. Zafra-Mejía, y J. P. Rodríguez-Miranda, "Evaluación de la calidad del aire mediante un laboratorio móvil: Puente Aranda (Bogotá D.C., Colombia)", *Rev. Fac. Ing.*, vol. 71, n.o 71, pp. 153-166, feb. 2014. <https://aprendeenlinea.udea.edu.co/revistas/index.php/ingenieria/article/view/15069>
- [5] J. H. S. Spyros N. Pandis, *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*, 3rd Edition, 3.a ed. New York: John Wiley & Sons, 2016.
- [6] S. Lee, C.-H. Ho, Y. G. Lee, H.-J. Choi, y C.-K. Song, "Influence of transboundary air pollutants from China on the high-PM10 episode in Seoul, Korea for the period October 16–20, 2008", *Atmos. Environ.*, vol. 77, pp. 430-439, oct. 2013. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2013.05.006
- [7] R. Vecchi, G. Marcazzan, y G. Valli, "A study on nighttime-daytime PM10 concentration and elemental composition in relation to atmospheric dispersion in the urban area of Milan (Italy)", *Atmos. Environ.*, vol. 41, n.o 10, pp. 2136-2144, mar. 2007. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2006.10.069
- [8] X. Chen et al., "Efficiency differences of roadside greenbelts with three configurations in removing coarse particles (PM10): A street scale investigation in Wuhan, China", *Urban For. Urban Green.*, vol. 14, n.o 2, pp. 354-360, ene. 2015. DOI: 10.1016/j.ufug.2015.02.013
- [9] M. N. Islam, K.-S. Rahman, M. M. Bahar, M. A. Habib, K. Ando, y N. Hattori, "Pollution attenuation by roadside greenbelt in and around urban areas", *Urban For. Urban Green.*, vol. 11, n.o 4, pp. 460-464, ene. 2012. DOI: 10.1016/j.ufug.2012.06.004
- [10] A. G. McDonald et al., "Quantifying the effect of urban tree planting on concentrations and depositions of PM10 in two UK conurbations", *Atmos. Environ.*, vol. 41, n.o 38, pp. 8455-8467, dic. 2007. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2007.07.025
- [11] D. Fowler et al., "Measuring Aerosol and Heavy Metal Deposition on Urban Woodland and Grass Using Inventories of 210Pb and Metal Concentrations in Soil", *Water Air Soil Pollut. Focus*, vol. 4, n.o 2, pp. 483-499, jun. 2004. <https://link.springer.com/article/10.1023/B:WAFO.0000028373.02470.ba>
- [12] U. Wolf-Benning, T. Draheim, y W. Endlicher, "Spatial and temporal differences of Particulate Matter in Berlin", *Int. J. Environ. Waste Manag.*, vol. 4, n.o 1-2, pp. 3-16, ene. 2009. DOI: 10.1504/IJEW.2009.02688
- [13] M. C. Minguillón, X. Querol, U. Baltensperger, y A. S. H. Prévôt, "Fine and coarse PM composition and sources in rural and urban sites in Switzerland: Local or regional pollution?", *Sci. Total Environ.*, vol. 427-428, pp. 191-202, jun. 2012. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.04.030
- [14] G. Titos, H. Lyamani, M. Pandolfi, A. Alastuey, y L. Alados-Arboledas, "Identification of fine (PM1) and coarse (PM10-1) sources of particulate matter in an urban environment", *Atmos. Environ.*, vol. 89, pp. 593-602, jun. 2014. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2014.03.001
- [15] A. Waked et al., "Source apportionment of PM10 in a north-western Europe regional urban background site (Lens, France) using positive matrix factorization and including primary biogenic emissions", *Atmospheric Chem. Phys.*, vol. 14, n.o 7, pp. 3325-3346, abr. 2014. DOI: 10.5194/acp-14-3325-2014
- [16] F. Avecilla, J. E. Panebianco, y D. E. Buschiazzo, "A wind-tunnel study on saltation and PM10 emission from agricultural soils", sep. 2016. DOI: 10.1016/j.aeolia.2016.06.003
- [17] R. Funk, H. I. Reuter, C. Hoffmann, W. Engel, y D. Öttl, "Effect of moisture on fine dust emission from tillage operations on agricultural soils", *Earth Surf. Process. Landf.*, vol. 33, n.o 12, pp. 1851-1863, 2008. DOI: 10.1002/esp.1737
- [18] H. Zhang, Y. Liu, R. Shi, y Q. Yao, "Evaluation of PM10 forecasting based on the artificial neural network model and intake fraction in an urban area: a case study in Taiyuan City, China", *J. Air Waste Manag. Assoc.* 1995, vol. 63, n.o 7, pp. 755-763, jul. 2013. DOI: 10.1080/10962247.2012.755940
- [19] V. A. Reisen, A. J. Q. Sarnaglia, N. C. Reis, C. Lévy-Leduc, y J. M. Santos, "Modeling and forecasting daily average PM10 concentrations by a seasonal long-memory model with volatility", *Environ. Model. Softw.*, vol. 51, pp. 286-295, ene. 2014. DOI: 10.1016/j.envsoft.2013.09.027
- [20] K. Soni, S. Kapoor, K. S. Parmar, y D. G. Kaskaoutis, "Statistical analysis of aerosols over the Gangetic-Himalayan region using ARIMA model based on long-term MODIS observations", *Atmospheric Res.*, vol. 149, pp. 174-192, nov. 2014. DOI: 10.1016/j.atmosres.2014.05.025
- [21] H.-H. Hsu, G. Adamkiewicz, E. A. Houseman, J. D. Spengler, y J. I. Levy, "Using mobile monitoring to characterize roadway and aircraft contributions to ultrafine particle concentrations near a mid-sized airport", *Atmos. Environ.*, vol. 89, pp. 688-695, jun. 2014. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2014.02.023
- [22] O. of R. & Development, "COMPENDIUM OF METHODS FOR THE DETERMINATION OF INORGANIC COMPOUNDS IN AMBIENT AIR".
- [23] F. PASQUILL, "The Estimation of The Dispersion of Windborne Material", *Meteorol. Mag.*, vol. 90, n.o 1063, 1961.
- [24] F. A. Gifford, «Turbulent diffusion-typing schemes: a review», 1976.

- [25] P. M. Bach, S. Staalesen, D. T. McCarthy, y A. Deletic, «Revisiting land use classification and spatial aggregation for modelling integrated urban water systems», *Landsc. Urban Plan.*, vol. 143, pp. 43-55, nov. 2015. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2015.05.012
- [26] P. J. Irga, M. D. Burchett, y F. R. Torpy, “Does urban forestry have a quantitative effect on ambient air quality in an urban environment?”, *Atmos. Environ.*, vol. 120, pp. 173-181, nov. 2015. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2015.08.050
- [27] G. E. P. Box, *Time series analysis: Forecasting and control*, Edición: Revised Edition. San Francisco: Holden-Day, 1976.
- [28] G. M. Ljung y G. E. P. Box, «On a Measure of Lack of Fit in Time Series Models», *Biometrika*, vol. 65, n.o 2, pp. 297-303, 1978.
- [29] G. Schwarz, «Estimating the Dimension of a Model», *Ann. Stat.*, vol. 6, n.o 2, pp. 461-464, 1978.

**C.A. Zafra-Mejía** nació en Bucaramanga (Colombia) en 1977. Recibió los títulos de Ingeniería Civil y Especialización en Ingeniería Ambiental de la Universidad Industrial de Santander (Colombia) en 2001 y 2003, respectivamente; recibió también los títulos de Maestría y Doctorado en Ingeniería Ambiental de las Universidades de Cantabria (España) y El País Vasco (España) en 2005 y 2012, respectivamente.

Desde el año 2006 es profesor de Ingeniería Ambiental en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Colombia), y actualmente es director del Grupo de Investigación en Ingeniería Ambiental (GIIAUD) de la misma universidad. Sus intereses de investigación incluyen el estudio de contaminantes en áreas urbanas, especialmente en aire y suelo. En los últimos años se ha interesado en investigaciones acerca del comportamiento del material atmosférico en suspensión y su asociación con metales pesados en áreas urbanas.

**J.C. Alarcón-Hincapié** nació en Bogotá (Colombia) en 1970. Recibió los títulos de Ingeniería Catastral y Especialización en Sistemas de Información Geográfica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Colombia) en 1994 y 1995, respectivamente; recibió también los títulos de Maestría en Ambiente y Desarrollo, y Doctorado en Geografía de la

Universidad Nacional (Colombia) en 2001 y 2017, respectivamente.

Desde el año 2006 es profesor de Ingeniería Ambiental en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Colombia), y actualmente es investigador del Grupo en Ingeniería Ambiental (GIIAUD) de la misma universidad. Sus intereses de investigación incluyen el estudio del paisaje y evolución histórica de usos del suelo en áreas urbanas. En los últimos años se ha interesado en investigaciones acerca de la variación del uso del suelo y la cobertura superficial, y su asociación con la contaminación ambiental urbana.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0872-6116>

**L.C. Echeverry-Prieto** nació en Bogotá (Colombia) en 1980. Recibió el título de Microbiología Industrial de la Universidad Pontificia Javeriana (Colombia) en 2004; recibió también el título de Maestría en Ciencias Biológicas de la Universidad Pontificia Javeriana (Colombia) en 2009.

Desde el año 2011 es profesora de Ingeniería Ambiental en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Colombia), y actualmente es investigadora del Grupo en Ingeniería Ambiental (GIIAUD) de la misma universidad. Sus intereses de investigación incluyen el estudio de contaminantes transportados pasivamente por el aire (Aerobiología). En los últimos años se ha interesado en investigaciones acerca del transporte de partículas orgánicas en ambientes urbanos y su asociación con el material particulado atmosférico.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6940-4383>