

# Análisis del origen de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> en Bogotá usando gráficos polares

Pedro Alejandro García Ávila,<sup>1\*</sup> Néstor Y. Rojas<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Fundación Universitaria Agraria de Colombia, Uniagraria, Facultad de Ingeniería Calle 170 N° 56A-10, Bogotá, Colombia

<sup>2</sup>Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá. Departamento de Ingeniería Química y Ambiental, Carrera 45 N° 26-85 Edificio 412 Oficina 206. Teléfono (571) 3165000 Ext. 14304

\*Autor para correspondencia: [peagarciaav@unal.edu.co](mailto:peagarciaav@unal.edu.co)

## RESUMEN

Determinar la procedencia de los contaminantes del aire registrados por una red de monitoreo es fundamental para diseñar acciones de prevención y control de la contaminación. Con este fin, se analizaron, mediante la aplicación Openair®, los registros de material particulado (PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>), velocidad y dirección de los vientos, en 10 estaciones de monitoreo de calidad del aire en Bogotá para el período 2009-2011, encontrándose la influencia de fuentes locales y regionales. Se determinaron altas concentraciones de material particulado relacionadas con velocidades de viento superiores a 5 m/s procedentes del occidente, lo cual sugiere un transporte regional de contaminantes desde los municipios vecinos del occidente de la ciudad (Soacha, Funza, Mosquera, Madrid), hacia su centro geográfico. Estos municipios concentran actividad industrial y transporte pesado de bienes desde y hacia Bogotá. Las fuentes localizadas al interior de la ciudad, en particular aquellas que emplean carbón como combustible y las fuentes móviles que transitan sobre las vías principales, contribuyen a generar altos niveles de material particulado cuando los vientos son débiles, pero en menor magnitud que las fuentes externas.

**Palabras clave:** contaminación del aire, material particulado, red de monitoreo de calidad del aire, openair, gráficos polares.

**Editor:** Hernández Fernández, J.  
[javier.hernandez@utadeo.edu.co](mailto:javier.hernandez@utadeo.edu.co)

**Citation:** García-Ávila, P. A. & Rojas, N. Y. (2016). Análisis del origen de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> en Bogotá usando gráficos polares. *Mutis* 6(2), 47-58, doi: <http://dx.doi.org/10.21789/22561498.1150>

**Received:** Mayo 23, 2016. **Junio:** 31, 2016. **Published on line:** Septiembre 30, 2016.

**Copyright:** ©2016 García-Ávila, P. A. & Rojas, N. Y. This is an open-access article, which permits unrestricted use, distributions and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

**Competing Interests:** The authors have no conflict of interest.

## Analysis of the origin of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> in Bogota by using polar plots

### ABSTRACT

The design of pollution prevention strategies and plans requires information about the origin of the pollutants. In this work, particulate matter (PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub>), wind speed and wind direction records from 10 air quality monitoring stations in Bogota between 2009 and 2011 were analyzed using Openair®. The influence of local and regional sources was established. High concentrations of particulate matter



associated with wind speeds exceeding 5 m/s from the West were found, suggesting regional transport from the neighboring municipalities of Soacha, Funza, Mosquera and Madrid, towards its geographic center. These municipalities have a significant industrial activity and heavy transport of goods to and from Bogotá. Sources located within the city, particularly those using coal as fuel and mobile sources that travel on main roads contribute to generate high levels of particulate matter when the winds are weak, but at a lesser extent than external sources.

**Keywords:** air pollution, particulate matter, air quality monitoring network, openair, polar plot.

## INTRODUCCIÓN

Más de 3.2 millones de muertes anuales pueden ser atribuidas a la contaminación del aire por material particulado fino ( $PM_{2.5}$ ) en el mundo (Lelieveld *et al.*, 2015). El material particulado afecta en mayor proporción a los grupos de personas más sensibles, tales como niños y personas mayores. En el Reino Unido, se encontró que la exposición a  $PM_{10}$  en el año 2002 llevó a 6500 muertes y 6400 hospitalizaciones (Defra, 2005). En Bogotá, la enfermedad respiratoria es la principal causa de mortalidad infantil en la ciudad; al año se producen cerca de 600 mil atenciones en salud por Enfermedad Respiratoria Aguda (ERA) en niños menores de cinco años (Hernández, *et al.*, 2010) (SDA, 2010). Mediante las acciones apropiadas de prevención en la ciudad, se podrían obtener beneficios económicos del orden de 180 mil millones de pesos en los costos de las enfermedades relacionadas y un beneficio económico de más de 21 billones de pesos por concepto de mortalidad por estas causas, entre 2010 y 2020 (Ortiz y Rojas, 2012).

Una fracción del material particulado atmosférico es emitida directamente a la atmósfera desde la fuente contaminante y otra se forma en la atmósfera por fenómenos de conversión de gas a partículas y reacciones químicas, las cuales pueden tomar desde unos minutos hasta varios días. En consecuencia, estas sustancias y sus precursores pueden viajar largas distancias (Sniffer, 2010; WHO, 2006). Mediante una adecuada ubicación de estaciones de monitoreo ambiental y meteorológico en lugares rurales, urbanos, industriales y de alto tráfico vehicular, y analizando los datos generados de concentraciones de contaminantes

y variables meteorológicas, se puede inferir a escala local y regional la procedencia de los contaminantes. Por lo anterior, al relacionar dirección y velocidad del viento con la concentración de los contaminantes, se puede presuponer o localizar su origen. Esta relación se consigue utilizando herramientas gráficas, tales como la rosa de los vientos, la rosa de contaminantes, el gráfico polar y el gráfico anular, entre otros.

La utilización de este tipo de herramientas ha permitido determinar la localización de fuentes significativas de contaminación en diversos lugares, evitándose gastos onerosos con otros métodos. En París, la autoridad ambiental francesa encargada del monitoreo de la calidad del aire Airparif, demostró, con ayuda de rosas de los vientos y rosas de contaminantes, que aproximadamente el 40% de la contaminación por  $PM_{2.5}$  medida en la ciudad procede de otras regiones de Francia y de otros países europeos, y el 60% restante es producida localmente, principalmente por el tráfico vehicular (Airparif, 2012). Por su parte, estudios de  $PM_{2.5}$  en el Reino Unido (Sniffer, 2010), mostraron la asociación de altos valores de concentración de  $PM_{2.5}$  en el sur del territorio con vientos a altas velocidades que transportan sustancias precursoras de  $PM_{2.5}$  desde Europa del Este, el norte de Alemania, Holanda y Bélgica. Para este fin, emplearon principalmente gráficos polares, los cuales muestran la variación de la concentración de un contaminante por dirección y velocidad del viento. Estos gráficos usan la técnica de suavizamiento estadístico para mostrar una superficie continua (Carslaw, 2015).

### Contaminación del aire en Bogotá

El monitoreo de la calidad del aire se inició en Bogotá a mediados de la década de los 60, promovido por la Organización Panamericana de la Salud (OPS). Debido a la problemática por la contaminación del aire y con el objetivo de estudiar la calidad del aire en la ciudad, se han realizado varios proyectos por algunas entidades, cada una de las cuales contaba con una red de monitoreo de calidad del aire para su estudio: Red PANAIRES (1974), 5 estaciones; Red SICA (1985), 14 estaciones; Red JICA (1991), 5 estaciones; y Red de Monitoreo de la Calidad del Aire de Bogotá RMCAB (1997), 12 estaciones. De todos los contaminantes monitoreados en la capital, el  $PM_{10}$  es al que mayor importancia se le ha dado, ya que sus valores de concentración han sobrepasado la norma históricamente en diferentes sitios de la ciudad. Desde el año 1997 y

hasta 2010 se ha observado un aumento moderado en su concentración, presentándose los valores más altos los años 2004, 2005 y 2007. Las localidades de Puente Aranda, Fontibón y Kennedy han reportados los valores de concentración más altos, con evaluaciones respecto a la norma vigente en varios momentos. En cuanto a gases contaminantes los resultados no presentan una problemática importante; las concentraciones anuales de NO<sub>2</sub> siempre han estado por debajo del 50% de la norma. El ozono, aunque actualmente ha estado bajo norma, no ha tenido una tendencia histórica clara, dada su variación irregular con los promedios mensuales entre 2000 y 2010. El SO<sub>2</sub> ha tenido una disminución continua y significativa en el mismo período, comportamiento debido en parte a la mejora de la calidad de los combustibles, especialmente el diésel.

Dentro de las medidas de descontaminación en la ciudad, se han realizado programas entre los que se encuentra el pico y placa ambiental en el año 2006, que se sumó al pico y placa de movilidad que había estado operando desde el año 1998. Así mismo, se han reali-

zando acciones importantes como el mejoramiento del diésel por parte de Ecopetrol, los operativos vehiculares en la vía y el control a fuentes industriales (SDA, 2010).

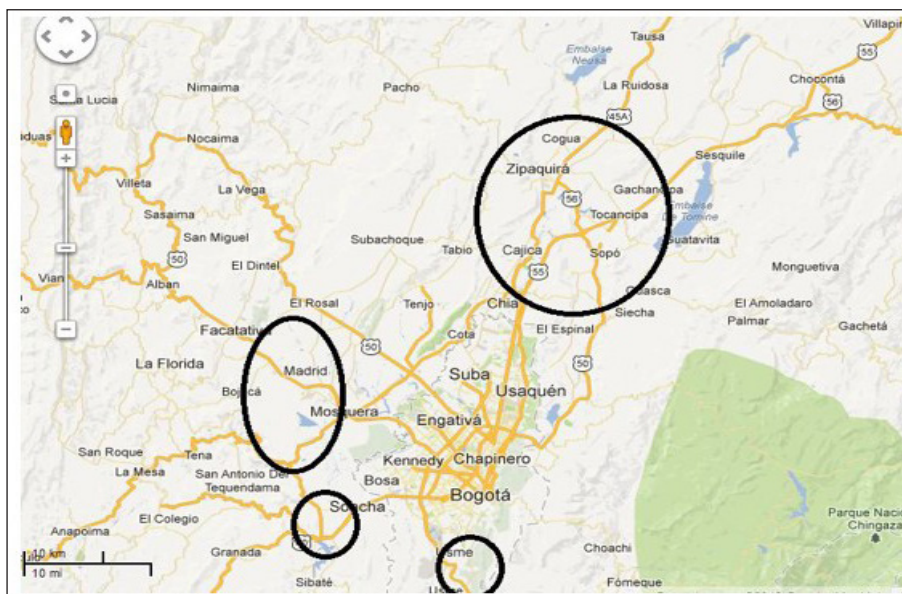
Los valores de las concentraciones de los diferentes contaminantes registrados por la RMCAB son el resultado de las emisiones generadas tanto dentro de la ciudad como fuera de ella, posteriormente transportadas por el viento. También habría un aporte de los contaminantes secundarios, es decir, aquellos formados en la atmósfera a partir de precursores gaseosos emitidos por diversas fuentes. Los contaminantes podrían provenir de los municipios cercanos a Bogotá, los cuales están bajo la jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, CAR. De las 14 oficinas provinciales que abarca la CAR, se han encontrado los valores más altos de emisión de contaminantes en Sabana Occidente, Alto Magdalena, Bogotá-La Calera, Sabana Centro y Soacha, mostrados en la tabla 1 (Universidad Militar, 2008).

**Tabla 1.** Carga contaminante calculada para las 5 regiones de mayor contaminación de jurisdicción de la CAR. Elaboración propia a partir de: Universidad Militar (2008)

Provincial	MP ton/año	SO <sub>2</sub> ton/año	NO <sub>2</sub> ton/año	CO ton/año
Sabana Centro	4767,23	3334,68	1703,65	285,14
Soacha	1399,26	1106,70	460,53	130,09
Sabana Occidente	1492,66	1322,81	746,88	106,78
Alto Magdalena	962,05	748,98	396,25	83,23
Bogotá rural y La Calera	2666,28	866,04	498,16	12,10

En la provincial de Sabana Centro, al norte de Bogotá, los municipios que más emiten contaminantes son Cogua y Nemocón (a 40 kilómetros), los cuales tienen actividad minera y producción de coque, y Cajicá (a 20 kilómetros), que se caracteriza por su actividad industrial. Por su parte, en la provincial de Soacha, al sur y suroriente, los municipios de Soacha y Sibate (a 15 y 25 km respectivamente) aportan emisiones industriales aproximadamente en partes iguales, asociadas a la producción de grandes empresas manufactureras. En la provincial Sabana Occidente, al occidente de Bogotá, el municipio de Mosquera (a 15 km) aporta un 50% del total, debido a su producción industrial

manufactureras. Finalmente, en la provincial del Alto Magdalena, el municipio de Girardot (a 80 kilómetros al suroeste), es el que más aporta en la carga contaminante debido a la producción ladrillera y al sector transporte. La figura 1 muestra la ubicación de estos municipios.



**Figura 1.** Municipios cercanos a Bogotá con mayores emisiones de contaminación industrial  
**Fuente:** Google maps (R)

## METODOLOGÍA

### Información a ser analizada

La información meteorológica y de concentración de los contaminantes  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  procede de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB), que ha registrado estas variables desde 1997 en 19 estaciones. No todas estas estaciones cubren los años 1997 a 2011, que se definió como período de base. Después de un proceso inicial de depuración con el criterio de incluir las estaciones que estuvieran activas al año 2011 y que tuvieran un período lo más largo posible de datos válidos registrados de manera continua con un porcentaje de captura mayor o igual al 75%, se seleccionaron 10 estaciones de monitoreo (Carvajal, Kennedy, Fontibón, Puente Aranda, Tunal, Simón Bolívar, Ferias, Suba, Usaquén y Guaymaral) y el período 2009-2011 para el análisis.

### Análisis de la información

La información depurada de las concentraciones de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  se analizó utilizando el paquete de análisis de datos de calidad del aire Openair<sup>®</sup>, que opera con base en el programa de análisis estadístico R (Carslaw, 2011). Para las estaciones y el período seleccionados, se realizó un análisis espacial de  $PM_{10}$  empleando la herramienta gráfico polar para determinar la dirección de procedencia de los vientos asociados

con las más altas concentraciones del contaminante, permitiendo a la vez sugerir posibles fuentes de contaminación. Se tuvieron en cuenta los centros industriales cercanos a Bogotá y la ubicación de 80 fuentes fijas relativamente importantes que emplean carbón como combustible dentro del perímetro urbano, identificadas en el inventario de emisiones más recientemente consolidado (Behrentz *et al.*, 2008). Igualmente se tuvo en cuenta la ubicación de las vías principales de Bogotá. Posteriormente, se utilizaron gráficos anulares temporales para inferir la relación entre las concentraciones de contaminantes y los comportamientos temporales de las fuentes de emisión. El gráfico polar también se utilizó para analizar la información disponible de  $PM_{2.5}$  y la relación  $PM_{10}/PM_{2.5}$ , con el fin de ratificar la inferencia sobre el tipo de fuente del material particulado.

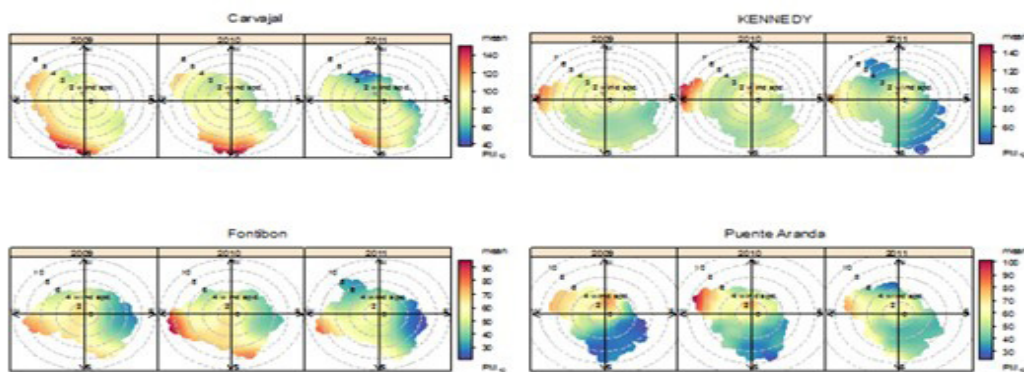
## RESULTADOS

### Concentraciones y procedencia del $PM_{10}$

La figura 2 presenta los gráficos polares de concentración de  $PM_{10}$  para las estaciones y el período seleccionados. Las estaciones Kennedy (Ken) y Carvajal (Car) reportan concentraciones de alrededor de  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; Fontibón (Fon), Puente Aranda (PAr) y Tunal (Tun)  $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , asociadas a bajas velocidades del viento, indi-

cando una influencia de fuentes locales. Sin embargo, para las estaciones Kennedy y Carvajal, se presentan valores más elevados, de entre  $120$  y  $140 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , cuando se registran vientos del oeste con velocidades superiores a  $5 \text{ m/s}$ , lo cual sugiere una influencia significativa de fuentes regionales. De manera similar, los valores máximos en Puente Aranda y Tunal, del orden de  $80$  a  $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , se presentan cuando se registran vientos con altas velocidades procedentes de las direcciones oeste y oeste-noroeste. Esta asociación sugiere que las fuentes localizadas en Soacha y los municipios de la provincial Sabana Occidente pueden tener influencia sobre la contaminación registrada al

occidente y suroccidente de Bogotá. Adicionalmente, en la estación Carvajal se presentan valores altos de concentración de  $\text{PM}_{10}$ ,  $120 \mu\text{g}/\text{m}^3 - 140 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , con vientos que llegan con dirección sur-suroeste/sur-sureste, los cuales no son identificados en forma similar por las estaciones cercanas. Observando la fotografía satelital se puede inferir que corresponde a una fuente natural de región árida en dicha dirección. El hecho de que esta fuente no sea identificada por las otras estaciones indicaría que esas partículas corresponderían a un tamaño tal que se facilitarían su remoción por sedimentación en su avance posterior hacia la estación Carvajal.



**Figura 2 a.** Gráfico polar de la concentración de  $\text{PM}_{10}$  para períodos anuales entre 2009 y 2011, estaciones Carvajal, Kennedy, Fontibón y Puente Aranda de la RMCAB

Las estaciones Simón Bolívar (SBol) y Ferias (Fer) presentan los máximos valores de concentración, entre  $60$  y  $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , con vientos que proceden del oeste y en todo el rango de velocidades por debajo de  $5 \text{ m/s}$  (figura 2). Los vientos procedentes del oeste están asociados a altas concentraciones de  $\text{PM}_{10}$  en estas estaciones centrales de la ciudad, lo cual indica una fuerte influencia de la contaminación generada al occidente, por fuentes industriales y vehiculares.

En Usaquén (Usa) se registran valores máximos de entre  $50$  y  $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para vientos que llegan de las direcciones oeste y norte, en todo el rango de velocidades por debajo de  $4 \text{ m/s}$ . Para las estaciones Suba (Sub) y Guaymaral (Gua), para vientos dentro del rango de velocidades superiores a  $3 \text{ m/s}$  no se observa una condición uniforme para los 3 años del período

de análisis (figura 2). Para viento en calma se encuentran valores de concentración de entre  $50$  y  $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , manteniéndose aproximadamente constante en los tres años período, siendo dicho comportamiento típico del tráfico vehicular.

La figura 3 muestra los gráficos polares de cada estación de la RMCAB con valor promedio de concentración consolidado para el período 2009-2011.

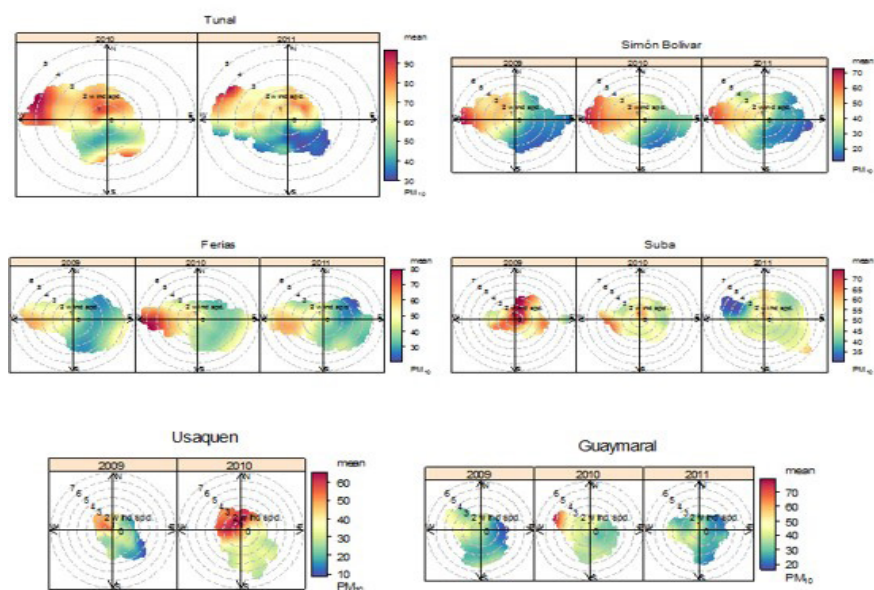


Figura 2 b. Gráfico polar de la concentración de  $PM_{10}$  para períodos anuales entre 2009 y 2011, estaciones Tunal, Simón Bolívar, Feries, Suba, Usaquén y Guaymaral de la RMCAB

### Análisis temporal

Los gráficos polares para las concentraciones de  $PM_{10}$  medidas en las estaciones de la RMCAB para el período 2009-2011 (figura 2), mostraron que los valores de las máximas concentraciones para este contaminante fueron más altos para 2010 que para 2009 y 2011 en la mayoría de las estaciones. Se podría asociar este comportamiento a la comparación de temperaturas superficiales para los tres años del período, en el cual, el año 2010 fue más caluroso de acuerdo al reporte de las temperaturas promedio de las estaciones (SDA,2011).

La figura 4 muestra las concentraciones máximas de  $PM_{10}$  para cada uno de los meses del año en las estaciones Kennedy, Carvajal, Fontibón y Puente Aranda. Los valores son muy variables a lo largo del año. En general, se encuentran los mayores valores durante el primer trimestre y al final de cada año, en especial cuando se presentan vientos de alta velocidad provenientes del oeste. En contraste, los valores de las máximas concentraciones registradas con vientos en calma (influencia de fuentes locales) no muestran variaciones significativas a lo largo del año. Adicionalmente, se observa que la estación Carvajal, en particular, presenta valores muy altos, entre 100 y 140  $\mu g/m^3$ , cuando los vientos provienen del sur, sin cambios importantes a través del año.

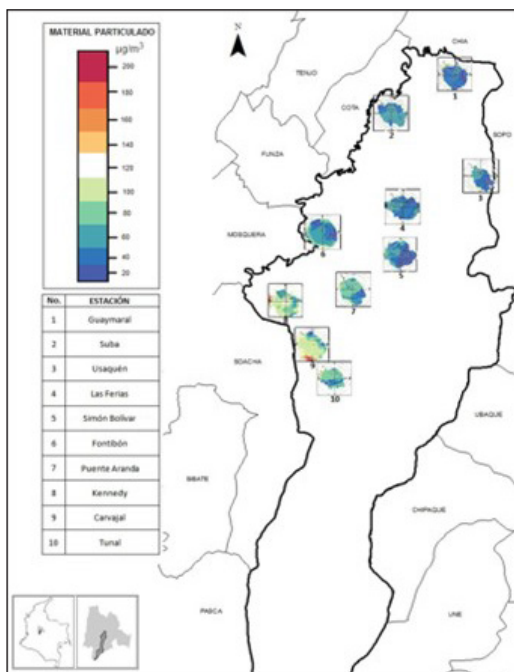


Figura 3. Diagramas polares para las concentraciones de  $PM_{10}$  de las estaciones de la RMCAB

Fuente: ArGis

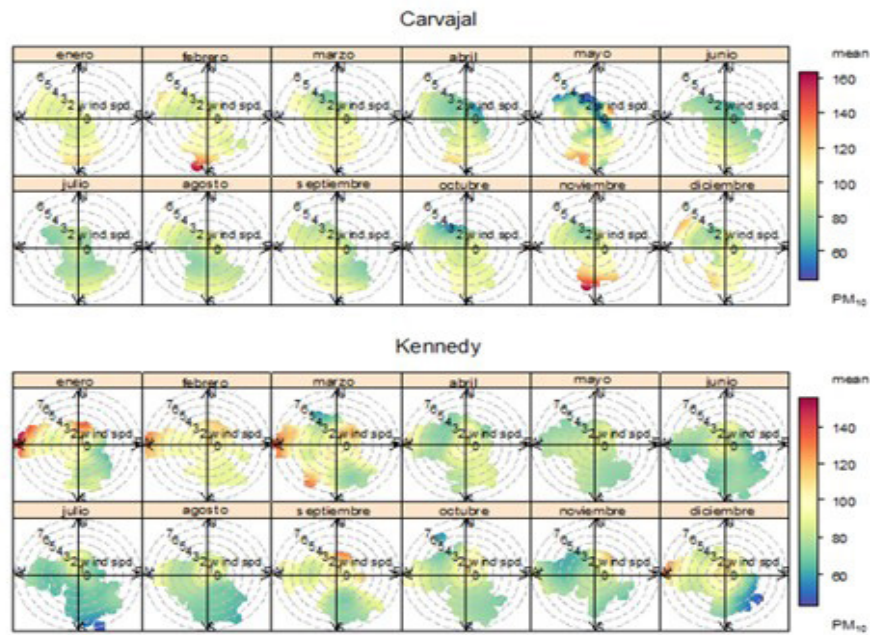


Figura 4 a. Gráfico polar de las concentraciones para períodos mensuales entre 2009 y 2011 de las estaciones Carvajal y Kennedy de la RMCAB

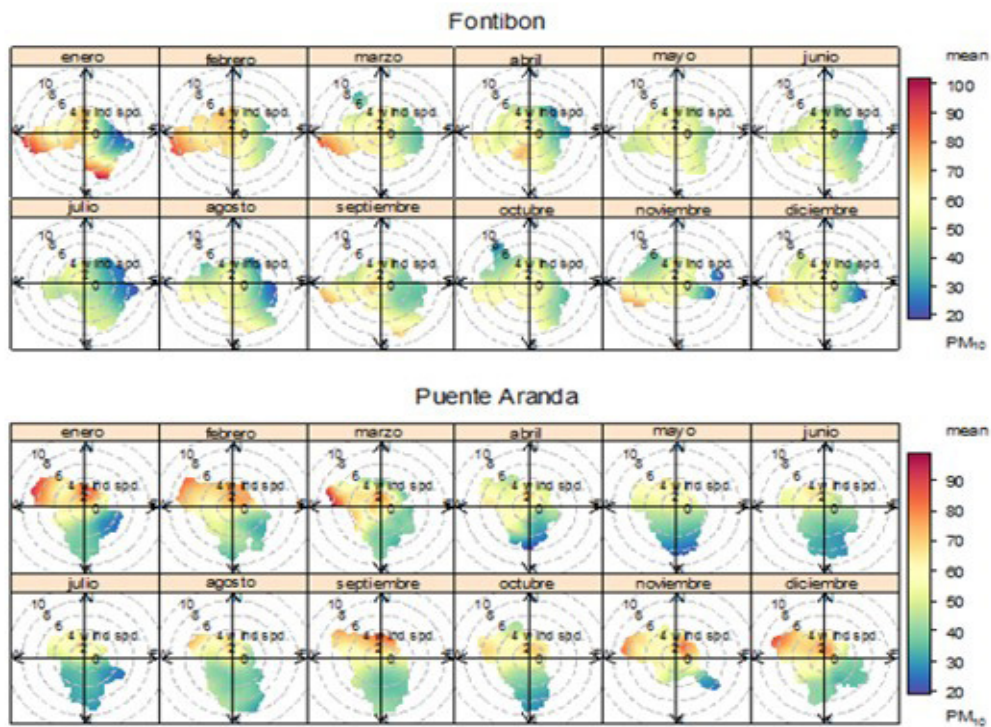
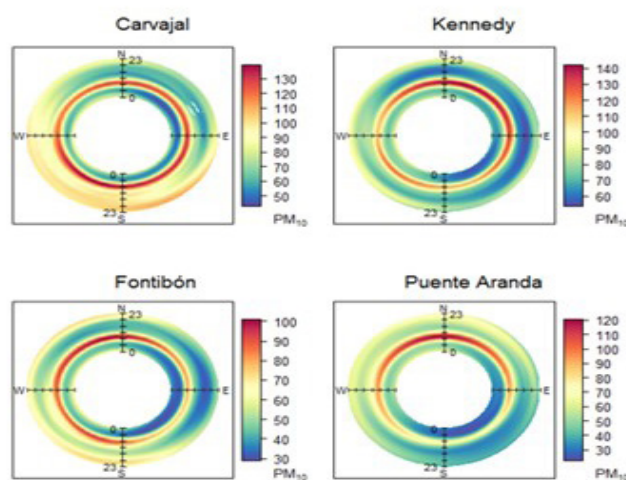


Figura 4 b. Gráfico polar de las concentraciones de PM<sub>10</sub> para períodos mensuales entre 2009 y 2011 de las estaciones Fontibón y Puente Aranda de la RMCAB

Los gráficos polares anulares por hora del día para la concentración de  $PM_{10}$  (figura 5), muestran que las concentraciones más altas registradas en las estaciones Carvajal, Kennedy, Fontibón, Puente Aranda y Tunal se presentan entre las 8:00 a.m. y las 12:00 m., sin importar la dirección de procedencia, lo cual estaría coincidiendo con la hora pico de la mañana y el comienzo de la jornada diaria de la mayoría de los procesos industriales. Las concentraciones vuelven a aumentar en menor proporción después de las 8:00 p.m. coincidiendo con la hora pico vehicular en la noche. En la estación Carvajal se mantienen concentraciones altas entre las direcciones sur y suroeste en horas de la tarde coincidiendo con la fuente natural mencionada anteriormente. En la estación Simón Bolívar, las mayores concentraciones se presentan entre las 8:00 a.m. y las 12:00 m., principalmente para vientos de las direcciones comprendidas en el cuadrante norte-oeste y concentraciones relativamente altas en las últimas horas del día en las mismas direcciones. Los

vientos en el cuadrante sureste, en cambio, presentan concentraciones bajas durante casi todo el día. Una situación similar se presenta para la estación Ferias, que es también una estación en la zona central de la ciudad. Este comportamiento está asociado con todas las vías importantes y el sector industrial que se encuentran al oeste de estas estaciones.

En las estaciones Suba y Guaymaral se presentan dos horarios de valores máximos, de 8:00 a.m. a 12:00 m. y en las horas finales del día, después de las 8:00 p.m., con vientos principalmente del cuadrante norte este, comportamiento típico de fuentes vehiculares. En Usaquén, las más altas concentraciones se presentan con vientos del cuadrante norte-oeste entre 8:00 a.m. y 12:00 m., coincidiendo con la hora pico de la mañana y se mantienen en niveles altos durante la tarde. Este último comportamiento de la concentración en esta estación no es muy claro dada la lejanía de esta con respecto a los grandes centros industriales.



**Figura 5a.** Gráfico polar anular que muestra la variación de la concentración de  $PM_{10}$  por hora del día para el período 2009-2011, estaciones Carvajal, Kennedy, Fontibón y Puente Aranda de la RMCA

### Concentraciones y procedencia del $PM_{2.5}$

La figura 6 presenta los mayores valores de concentración de  $PM_{2.5}$  en la estación Kennedy, los cuales parecen provenir de dos tipos de fuentes. La primera, con valores de concentración fluctuando entre 30 y 45  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , se presenta con vientos que vienen del oeste entre las direcciones oeste-suroeste y oeste-noroeste, con valores de velocidad superiores a 6 m/s, lo que podría suponerse que es  $PM_{2.5}$  generado regionalmente por

fuentes en esa dirección. Los valores más altos se presentan en los períodos entre enero y marzo y entre agosto y septiembre. La segunda fuente de contaminación se asocia con vientos en calma, a velocidades bajas del viento y en todas las direcciones, con valores de entre 30 y 45  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , aproximadamente, lo cual podría considerarse como de generación primaria por fuentes locales, con procesos de combustión. Los valores de la concentración de  $PM_{2.5}$  para esta estación muestran una disminución entre 2010 y 2011.



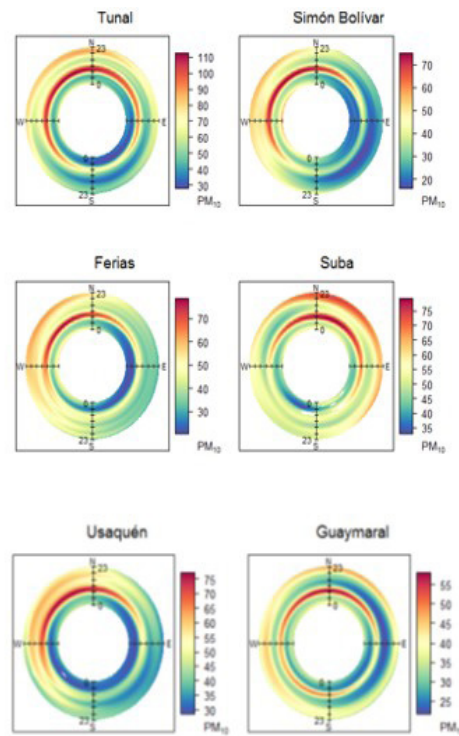


Figura 5b. Gráfico polar anular que muestra la variación de la concentración de PM<sub>10</sub> por hora del día para el período 2009-2011, estaciones de la RMCAB

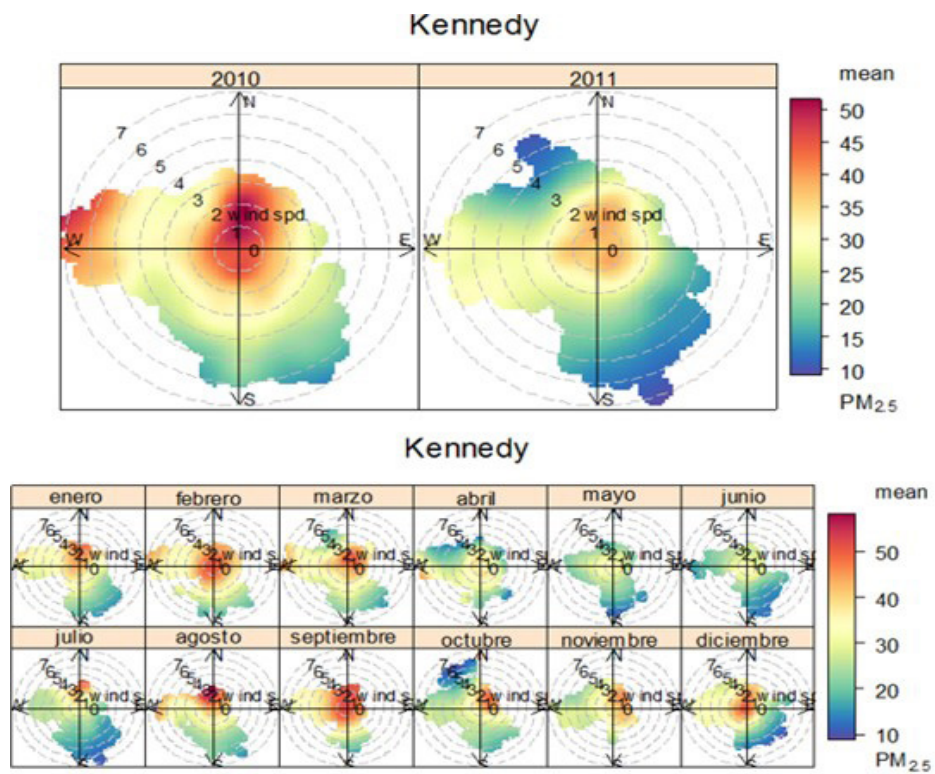


Figura 6. Gráfico polar de las concentraciones de PM<sub>2.5</sub> de la estación Kennedy por años (parte superior) y por meses (parte inferior) en el período 2010-2011

Al comparar las figuras 6 y 7, se observa que la asociación que existe entre las máximas concentraciones de  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$  es fuerte. Al mismo tiempo, el gráfico polar de la relación  $PM_{2.5}/PM_{10}$  (figura 8) muestra que

los valores mayores de esta relación, los cuales indican un aerosol fresco producto de la combustión, se asocian con vientos en calma, indicando fuentes locales de combustión.

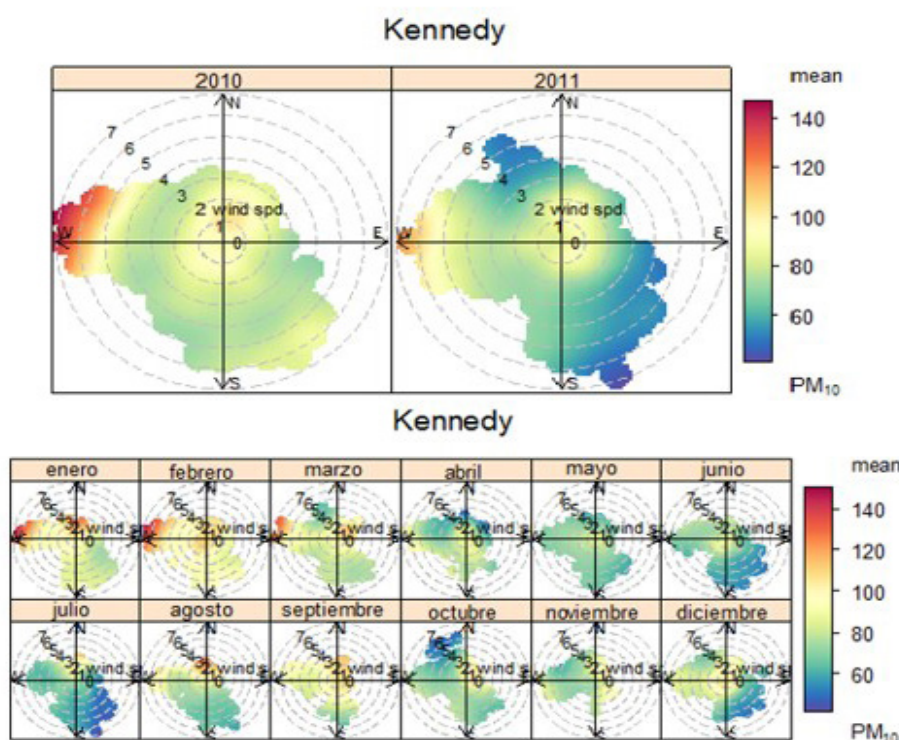


Figura 7. Gráfico polar de las concentraciones de  $PM_{10}$  de la estación Kennedy período de años y en la parte inferior por meses en el período 2010-2011

La figura 8 muestra que la distribución de tamaño del material particulado asociado con vientos que proceden del oeste cambia en el transcurso del año, a juzgar por el cambio que se observa en los valores de la relación  $PM_{2.5}/PM_{10}$ . Los menores valores de la relación ocurren en el primer semestre del año y los mayores en el segundo semestre. Con vientos en calma, la relación se mantiene aproximadamente constante en 0,5 durante el año.

## CONCLUSIONES

El análisis de la serie de datos de concentración de material particulado de Bogotá en el período 2009-2011, permitió evidenciar altas concentraciones de material particulado  $PM_{10}$  en las estaciones Kennedy y Carvajal, en un rango de valores de entre 120 y

140  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , asociados con vientos procedentes del oeste. Adicionalmente, en la estación Carvajal se encontraron valores altos de concentración de  $PM_{10}$ , en un rango de valores de entre 120  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y 140  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  procedentes de las direcciones sur-suroeste/sureste, y en las estaciones Puente Aranda y Tunal se encontraron valores de concentración de entre 80 y 90  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  procedentes de las direcciones oeste y oeste-noroeste. De acuerdo a lo anterior, se sugiere que existe un transporte regional de contaminantes, desde los municipios vecinos al occidente de la ciudad (Soacha, Funza, Mosquera, Madrid) hacia su centro geográfico. De igual forma, se encontraron altas concentraciones de material particulado asociadas a bajas velocidades del viento: las estaciones Kennedy y Carvajal reportaron concentraciones de alrededor de 100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ; Fontibón, Puente Aranda y Tunal de

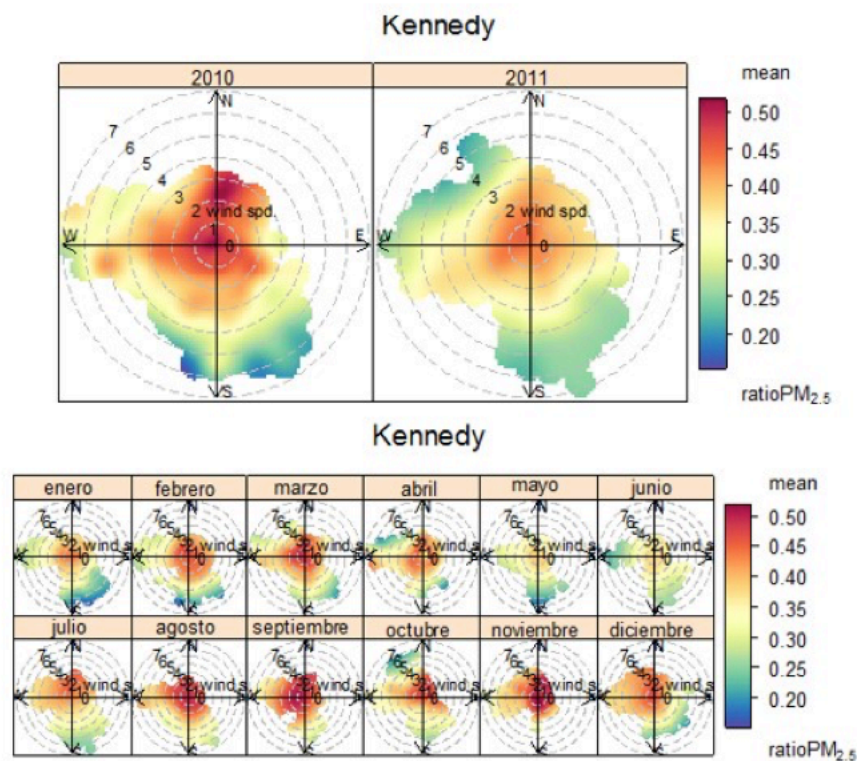


Figura 8. Gráfico polar relación  $PM_{2.5}/PM_{10}$  estación de Kennedy para el período 2010-2011

$80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , indicando una influencia de fuentes locales principalmente fuentes móviles y fuentes fijas que emplean carbón como combustible. Se requieren investigaciones posteriores donde se estudien, entre otros aspectos, la ubicación estratégica de las estaciones de monitoreo, la determinación de la composición química del material particulado en varios puntos de muestreo y en diversas fuentes emisoras, y la identificación más precisa de las fuentes regionales y locales de mayor impacto, mediante la utilización de modelos de receptor y modelos de calidad del aire.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la ingeniera Carolina Real de la Universidad Nacional de Colombia por su valiosa ayuda en la elaboración de los gráficos en ArcGis.

## REFERENCIAS

- Airparif. (2012). Source apportionment of airborne particulates in the Ile-De France région. Disponible en: [http://www.airparif.asso.fr/\\_pdf/publications/rapport-particules-anglais-120829.pdf](http://www.airparif.asso.fr/_pdf/publications/rapport-particules-anglais-120829.pdf)
- Behrentz, E., Sánchez, N. & Fandiño, M. (2008). Inventario de emisiones de fuentes fijas, definición de elementos técnicos para la formulación de políticas distritales encaminadas al mejoramiento de la calidad de aire de Bogotá. Centro de Investigación en Ingeniería Ambiental (CIIA).
- Carlaw, D. (2015) Openair: The Openair manual open-source tools for analysing air pollution data. Disponible en: <http://www.openair-project.org/downloads/openairmanual.aspx>
- Defra. (2005). Particulate Matter in the United Kingdom - Summary. Disponible en: [http://ukair.defra.gov.uk/assets/documents/reports/cat11/1212141150\\_AQEG\\_Fine\\_Part particulate\\_Matter\\_in\\_the\\_UK.pdf](http://ukair.defra.gov.uk/assets/documents/reports/cat11/1212141150_AQEG_Fine_Part particulate_Matter_in_the_UK.pdf)

- Defra. (2012). Fine Particulate Matter ( $PM_{2.5}$ ) in the United Kingdom. Disponible en: [https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/69635/pb13837-aqeg-fine-particle-matter-20121220.pdf](https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/69635/pb13837-aqeg-fine-particle-matter-20121220.pdf)
- Kent, A. & Carslaw, D. (2009). Analysis of air pollution in North Lincolnshire, Institute for Transport Studies, University of Lee. Disponible en: [http://www.nlincsair.info/documents/reports/128090223\\_NorthLincs\\_R\\_Project\\_Report.pdf](http://www.nlincsair.info/documents/reports/128090223_NorthLincs_R_Project_Report.pdf)
- Lelieveld, J., Evans, S., Fnais, M., *et al.* (2015). The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. *Nature*, 525, 367-371. doi:10.1038/nature15371.
- OMS (Organización Mundial de la Salud). (2005). Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. Disponible en: [http://whqlibdoc.who.int/hq/2006/WHO\\_SDE\\_PHE\\_OEH\\_06.02\\_spa.pdf](http://whqlibdoc.who.int/hq/2006/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf)
- Ortiz, E. & Rojas, N. (2012). Estimación de los beneficios económicos en salud asociados a la reducción de  $PM_{10}$  en Bogotá. *Rev. Salud Pública*, 15(1), 90-102, 2013. Disponible en: <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/revsaludpublica/article/view/38444/4391>
- Política Distrital de Salud Ambiental para Bogotá D. C. 2011-2023. Disponible en: [http://ambientebogota.gov.co/c/document\\_library/get\\_file?uuid=969c5996-6f71-4c1d-a3b9-504dc-c2f706a&groupId=55886](http://ambientebogota.gov.co/c/document_library/get_file?uuid=969c5996-6f71-4c1d-a3b9-504dc-c2f706a&groupId=55886)
- Sniffer. (2010).  $PM_{2.5}$ . Disponible en: <http://www.aqconsultants.co.uk/AQC/media/Reports/SNIFFER-PM25-Rept-Final-201210.pdf>
- Universidad Militar. (2008). Elaboración del inventario de fuentes móviles en jurisdicción de la CAR y actualización del inventario de fuentes fijas, incluyendo gases de efecto invernadero. Disponible en: [http://cendoc.car.gov.co/cgiin/wxis.exe?IscScrip=OPAC\\_SCRIPT/opac.xis&base=fichC&=buscar&autor=Universidad%20Militar%20Nueva%20Granada&formato=ficha](http://cendoc.car.gov.co/cgiin/wxis.exe?IscScrip=OPAC_SCRIPT/opac.xis&base=fichC&=buscar&autor=Universidad%20Militar%20Nueva%20Granada&formato=ficha)
- World Health Organization. (2006). Airw Quality Guidelines Global Update 2005. Disponible en: [http://www.euro.who.int/\\_\\_data/assets/pdf\\_file/0005/78638/E90038.pdf](http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0005/78638/E90038.pdf)