

# CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE MATERIAL PARTICULADO Y APLICACIÓN DE MODELOS RECEPTOR-FUENTE EN EL ÁREA METROPOLITANA DE BUCARAMANGA

Henry Castro Ortiz, Ing.<sup>1</sup>  
Raúl Fernando Castro Suarez, Ing.<sup>2</sup>  
Jorge Luis Chacón Velasco, Dr. Ing.<sup>2</sup>  
Laura Andrea Rodríguez Villamizar, MD. MSc<sup>3,4</sup>  
Astrid Berena Herrera López, Ft. MSc<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Corporación Autónoma para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga - CDMB

<sup>2</sup>Grupo de Investigación en Energía y Medio Ambiente –GIEMA, UIS

<sup>3</sup>Observatorio de Salud Pública de Santander - OSPS

<sup>4</sup>Departamento de Salud Pública, Escuela de Medicina, UIS

## ANTECEDENTES

La contaminación atmosférica por material particulado respirable es una mezcla heterogénea de sustancias químicas y partículas de tamaño menor a 10 micras (PM<sub>10</sub>), a la que regularmente está expuesta la mayoría de la población, el cual puede causar problemas significativos en la salud de la población en general, entre las que se incluyen mortalidad prematura, visitas permanentes al médico, ataques de asma, síntomas respiratorios y disminuciones de la función pulmonar. Las concentraciones de este contaminante en Bucaramanga sobrepasan en varias ocasiones los límites que aconsejan la Normatividad Ambiental [19], límites que serán más estrictos en los siguientes años.

En un estudio previo realizado en la ciudad de Bucaramanga [1], se encontró la necesidad de analizar en profundidad la composición físico-química del Material Particulado fracción respirable, con el objeto de investigar aspectos claves de este contaminante y determinar los impactos reales sobre la salud de la población del Área Metropolitana de Bucaramanga (AMB).

La Corporación Autónoma para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB) cuenta con cinco (5) estaciones automáticas y tres (3) manuales, instaladas estratégicamente en el AMB, para el monitoreo continuo de la calidad del aire que respiran sus habitantes. Las tres estaciones manuales corresponden a equipos de alto volumen que miden la concentración en el aire de Material Particulado inferior a 10 micras (PM<sub>10</sub>) utilizando filtros de microfibra de cuarzo, los cuales recolectan por periodos de 24 horas continuas las partículas y elementos peligrosos para la salud que se pueden adherir a estas, como por ejemplo metales pesados e hidrocarburos.

En el presente artículo se presenta el análisis de caracterización físico-química de los filtros que recolectan el material particulado y otras sustancias peligrosas para la población y el resultado obtenido luego de aplicar dos modelos Receptor – Fuente aprobados por la U.S. EPA para identificar y cuantificar las principales fuentes de PM<sub>10</sub> en el Área Metropolitana de Bucaramanga.

## MÉTODOS

En el estudio se tomaron 100 filtros de PM<sub>10</sub> de los equipos de alto volumen y se analizaron 50 muestras para Iones-Metales y 50 para Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (PAHs), en los laboratorios de Cromatografía y Consultas Industriales de la Universidad Industrial de Santander (UIS). Las muestras se tomaron tanto en época

seca como de lluvias entre el 2 de diciembre de 2009 y el 22 de mayo de 2010, en los puntos mostrados en la Tabla 1.

**Tabla 1. Ubicación de equipos de alto volumen utilizados**

Barrio	Dirección
San Miguel	Intersección de la Diagonal 15 con Carrera 17
La Joya	Calle 36 No 11 Occidente - 04
Ricaurte	Carrera 17C No 58-85
Cañaveral	Edificio Telebucaramanga Sede Sur

En la Figura 1, se pueden observar los puntos de monitoreo que actualmente posee el Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire en el AMB en una imagen satelital de Bucaramanga, de los cuales se seleccionaron los cuatro sitios de la tabla 1 para el análisis fisicoquímico de las muestras de PM10.



**Figura 1. Puntos de monitoreo AMB**

Los métodos y las especies analizadas en los filtros (Whatman, tamaño 20.3 x 25.4 cm x 0.45 mm) se presentan en la Tabla 2.

**Tabla 2. Elementos analizados y método utilizado**

ESPECIE	MÉTODO
Cloruro ( $\mu\text{g Cl}^-/\text{g}$ )	Titrimétrico
Sulfato ( $\mu\text{g SO}_4^{2-}/\text{g}$ )	Turbidimétrico
Nitrato ( $\mu\text{g NO}_3^-/\text{g}$ )	Espectrofotométrico
Amonio ( $\mu\text{g NH}_4^+/\text{g}$ )	Destilación/Espectrofotométrico
Sílice ( $\mu\text{g SiO}_2/\text{g}$ )	Gravimétrico
Calcio ( $\mu\text{g Ca}/\text{g}$ )	Absorción Atómica
Plomo ( $\mu\text{g Pb}/\text{g}$ )	Absorción Atómica
Cobre ( $\mu\text{g Cu}/\text{g}$ )	Absorción Atómica
Hierro ( $\mu\text{g Fe}/\text{g}$ )	Absorción Atómica
Zinc ( $\mu\text{g Zn}/\text{g}$ )	Absorción Atómica
Aluminio ( $\mu\text{g Al}/\text{g}$ )	Absorción Atómica
PAHs	Cromatografía de Gases

Por medio de Cromatografía de gases con detector selectivo de masas (GC-MS) se analizaron los 17 PAHs siguientes: Acenafteno, Acenaftileno, Antraceno, Benz[a]antraceno, Benzo[a]pireno, Benzo[b]fluoranteno, Benzo[g,h,i]perileno, Benzo[k]fluoranteno, Criseno, Dibenzo[a,h]antraceno, Fluoranteno, Fluoreno, Indeno[1,2,3-cd]pireno, Naftaleno, Fenantreno, Pireno, 2-metilnaftaleno.

Adicionalmente a los elementos anteriores, se monitoreó Carbón Negro (Black Carbon - BC), el cual se considera equivalente al Carbono Elemental (Elemental Carbon - EC), contaminante emitido directamente por procesos de combustión y utilizado como indicador de la exposición al hollín o humo diesel, el cual se ha descubierto posee efectos tóxicos y cancerígenos. Para la caracterización de esta sustancia se utilizó un equipo electrónico llamado "Etalómetro" [17], el cual colecta la muestra sobre una cinta filtro de fibra de cuarzo y por medio de un rayo de luz ultravioleta, se obtiene en tiempo real la concentración de carbón negro.

Finalmente, los resultados del análisis físico-químico fueron utilizados para aplicarlos en los modelos PMF y UNMIX la U.S. EPA con el objeto de identificar el aporte aproximado de las principales fuentes generadoras de material particulado en el AMB.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La campaña de monitoreo de la calidad del aire se realizó entre el 2 de diciembre de 2009 y el 22 de mayo de 2010, utilizando 4 equipos manuales de PM10 de alto volumen como el que se muestra en la Figura 2.



**Figura 2. Muestreador de alto volumen utilizado para la recolección de muestras. Ubicación: Intersección de la Diagonal 15 con Carrera 17**

De las 100 muestras que fueron analizadas se obtuvieron los siguientes resultados:

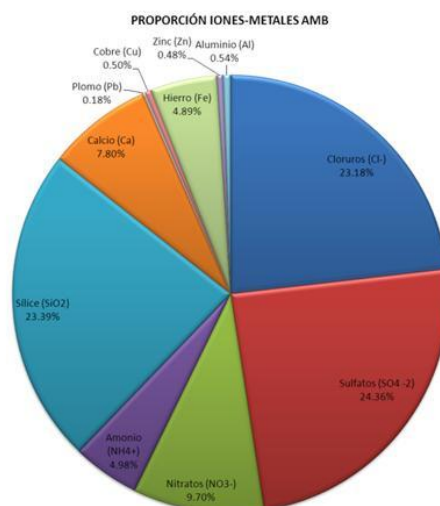
**Iones y Metales:** En la tabla siguiente se encuentran los datos estadísticos básicos para todos los resultados obtenidos en el Área Metropolitana de Bucaramanga.

**Tabla 3. Datos estadísticos básicos Iones-Metales AMB ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )**

ESPECIE	PROMEDIO	MIN	FECHA MIN	MAX	FECHA MAX
Cloruros (Cl <sup>-</sup> )	5.47	0.74	19-abr-10	77.19	20-dic-09
Sulfatos (SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> )	5.75	0.04	16-abr-10	42.45	02-mar-10

ESPECIE	PROMEDIO	MIN	FECHA MIN	MAX	FECHA MAX
Nitratos (NO <sub>3</sub> -)	2.29	0.27	22-may-10	52.88	20-dic-09
Amonio (NH <sub>4</sub> +	1.17	0.05	22-may-10	7.98	20-dic-09
Sílice (SiO <sub>2</sub> )	5.52	0.001	20-dic-09	33.16	22-abr-10
Calcio (Ca)	1.84	0.05	22-may-10	32.20	31-dic-09
Plomo (Pb)	0.04	0.001	16-abr-10	1.82	31-dic-09
Cobre (Cu)	0.12	0.001	22-may-10	1.47	31-dic-09
Hierro (Fe)	1.15	0.04	22-may-10	19.49	31-dic-09
Zinc (Zn)	0.11	0.01	22-may-10	1.57	31-dic-09
Aluminio (Al)	0.13	0.001	16-abr-10	1.78	08-dic-09

Con base en los promedios de Iones y Metales hallados para toda Bucaramanga, en la figura siguiente se presenta el porcentaje de iones-metales en todos los filtros de PM10 analizados. En la figura se puede apreciar que los cloruros, sulfatos y sílice son los principales iones encontrados en el AMB. Es de notar que el aporte del plomo y el zinc son menores.



**Figura 3. Proporciones promedio Iones-Metales AMB**

En la Figura se presentan las proporciones realizadas para cada zona analizada en el estudio. En la figura se puede apreciar que los cloruros y sulfatos representan entre el 38% y el 66% de los iones-metales en las zonas evaluadas. Adicionalmente se aprecia una gran variabilidad en el porcentaje del Sílice, presentándose el mayor porcentaje de este en Cañaveral, posiblemente causado por las obras en la infraestructura vial en cercanías de la estación de monitoreo durante el tiempo de recolección de las muestras. Las composiciones encontradas en San Miguel y La Joya son similares, mientras que en Ricaurte predomina los sulfatos y en Cañaveral el sílice como se mencionó anteriormente.

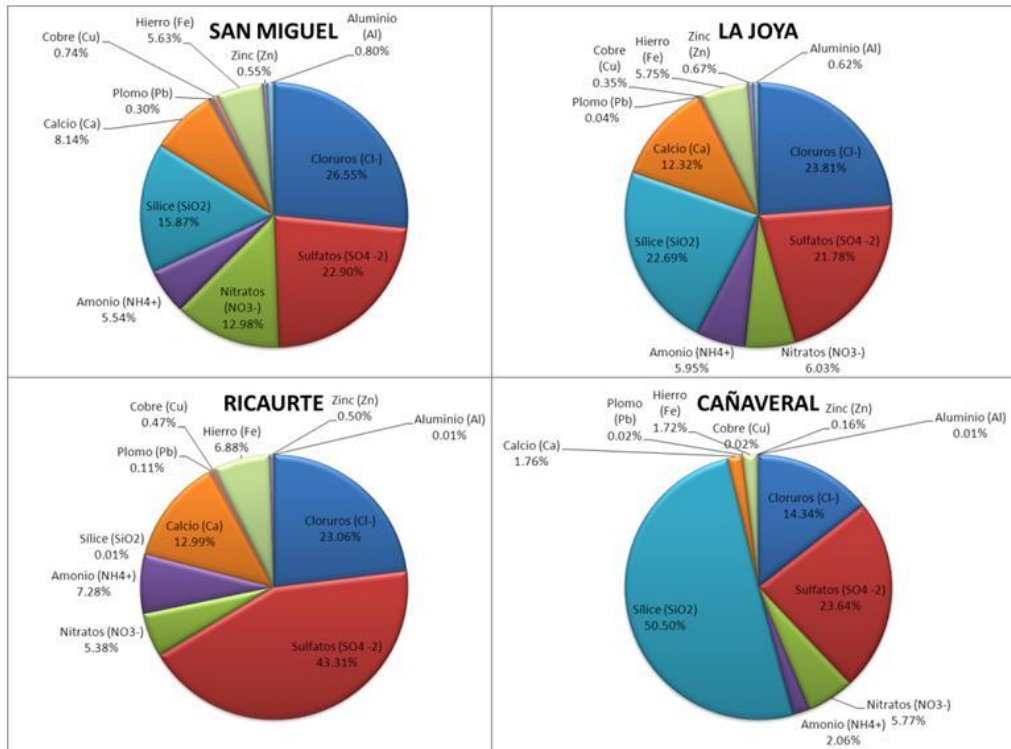


Figura 4. Proporciones promedio Iones-Metales por Zonas

**Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (PAHs):** En los diferentes puntos en donde se analizaron las 17 especies de PAHs se encontraron concentraciones que no representan riesgos para la salud de la población.

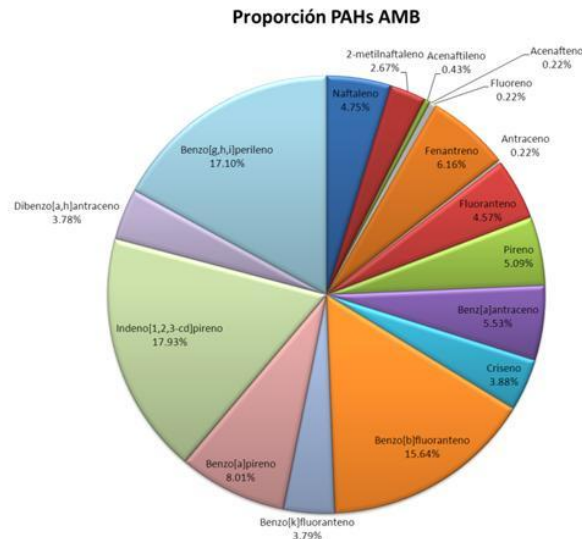
En la tabla siguiente se presentan el promedio, mínimo y máximo para los 5 PAHs con los mayores resultados promedios obtenidos en el AMB. Estos cinco componentes son los de mayor significancia en términos porcentuales y provienen principalmente de<sup>1</sup> quemas, humo de cigarrillo, restaurantes y asaderos, motores diesel, motores a gasolina y cocinas residenciales con leña.

Tabla 4. Datos estadísticos básicos PAHs en el AMB ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

ESPECIE	Fenantreno	Benzo[b] fluoranteno	Benzo[a] pireno	Indeno[1,2,3-cd] pireno	Benzo[g,h,i] perileno
DATOS	50	50	50	50	50
PROMEDIO	1.06E-05	2.68E-05	1.37E-05	3.07E-05	2.93E-05
MIN	6.83E-07	7.49E-07	3.75E-07	2.25E-06	7.59E-07
FECHA MIN	13-abr-10	1-may-10	1-may-10	1-may-10	28-abr-10
MAX	3.41E-05	6.19E-05	5.15E-05	6.73E-05	9.03E-05
FECHA MAX	25-ene-10	25-ene-10	25-ene-10	25-ene-10	13-abr-10

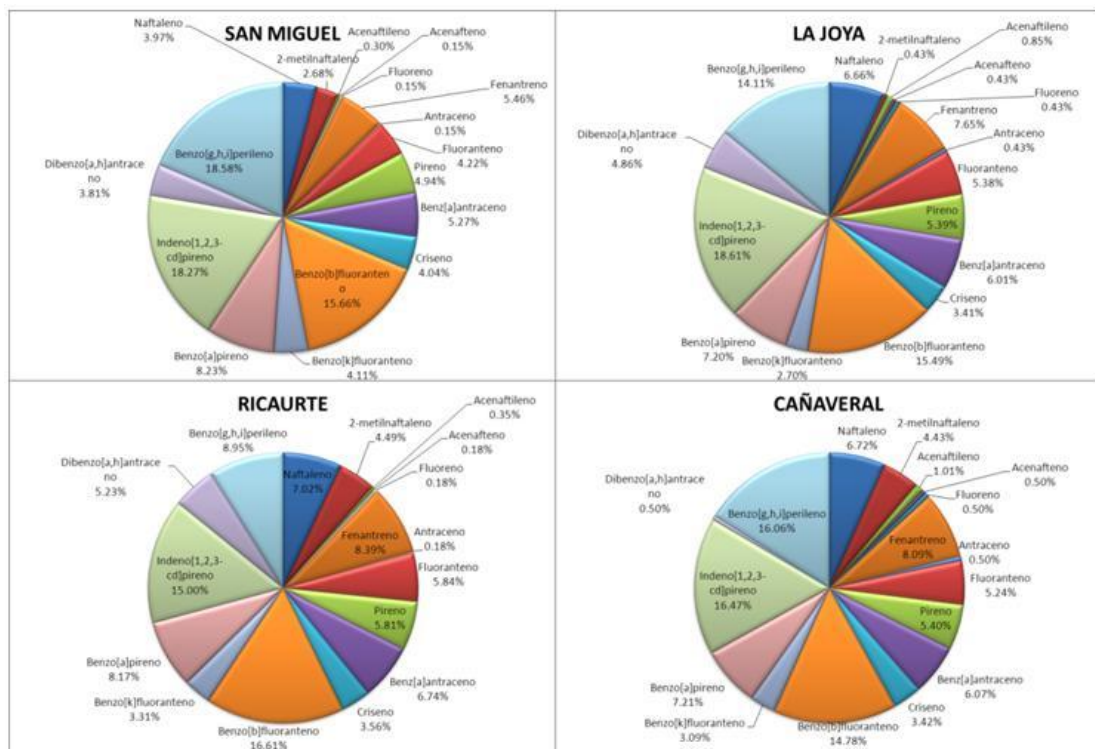
Con los promedios de PAHs hallados para toda Bucaramanga, en la Figura se presenta el porcentaje de cada especie en todos los filtros analizados de PM10.

<sup>1</sup> Fuentes extraídas de SPECIATE 4.2 (solo se transcriben las que están presentes en el AMB)



**Figura 5. Proporciones promedio PAHs AMB**

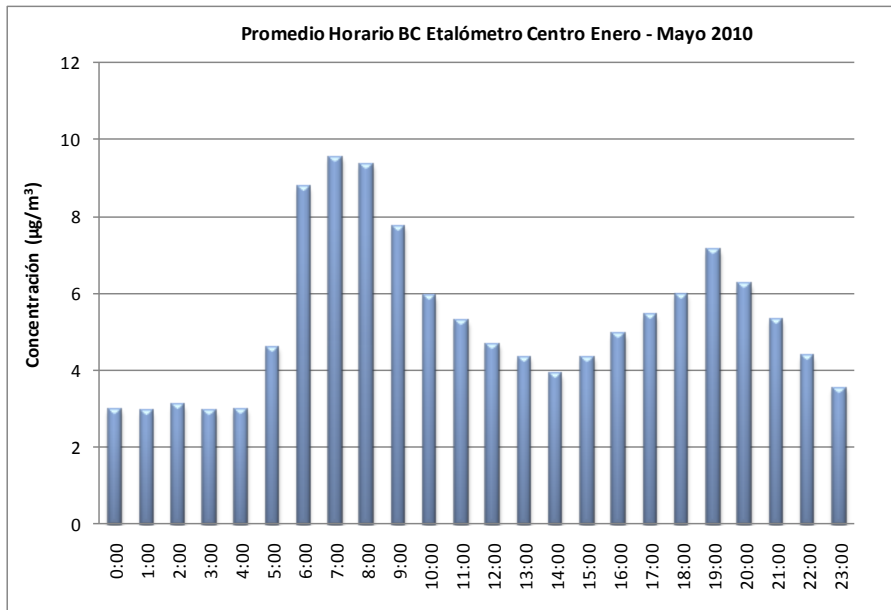
En la Figura se presentan las proporciones de PAHs realizadas para cada zona analizada en el estudio. En la figura se puede apreciar que los principales PAHs encontrados en las zonas analizadas son Indeno[1,2,3-cd]pireno, Benzo[g,h,i]perileno, Benzo[b]fluoranteno, y Benzo[a]pireno. Es de notar que la composición de los PAHs en los diferentes lugares evaluados es similar. Solo Dibenzo[a,h]antraceno no se encuentra en Cañaverál en niveles similares a los de las otras zonas evaluadas (0.5% contra 4% a 5%).



**Figura 6. Proporciones promedio PAHs por Zonas**

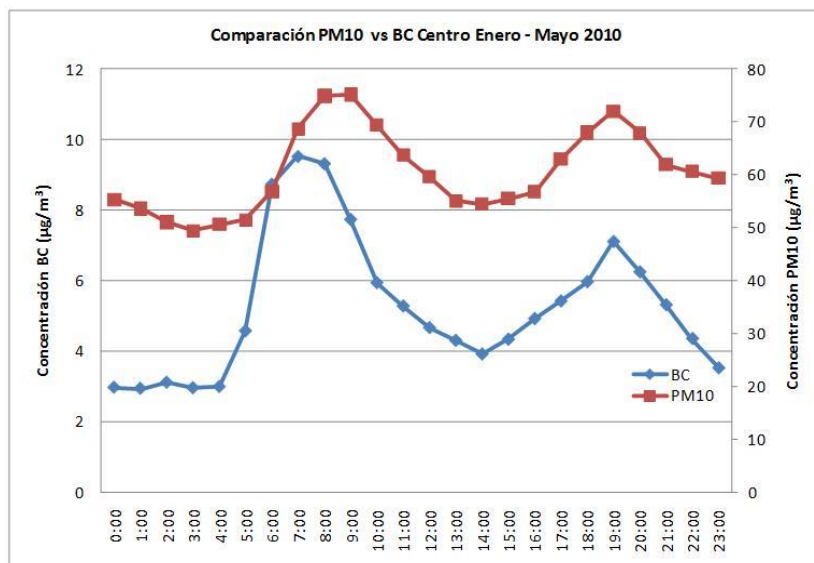
**Carbón Negro:** Durante el desarrollo del proyecto se ubicó sobre la Carrera 15 con Calle 34 (Centro de Bucaramanga), un equipo electrónico especial denominado Etalómetro el cual mide en tiempo real carbono negro.

En la Figura se presenta el promedio horario para las concentraciones de BC obtenidas con el Etalómetro, entre el 18 de enero y el 31 de mayo de 2010.



**Figura 7. Resultados promedios horarios BC Centro**

En la Figura se comparan los resultados promedios horarios obtenidos para BC con los de PM10 en la Estación Centro.



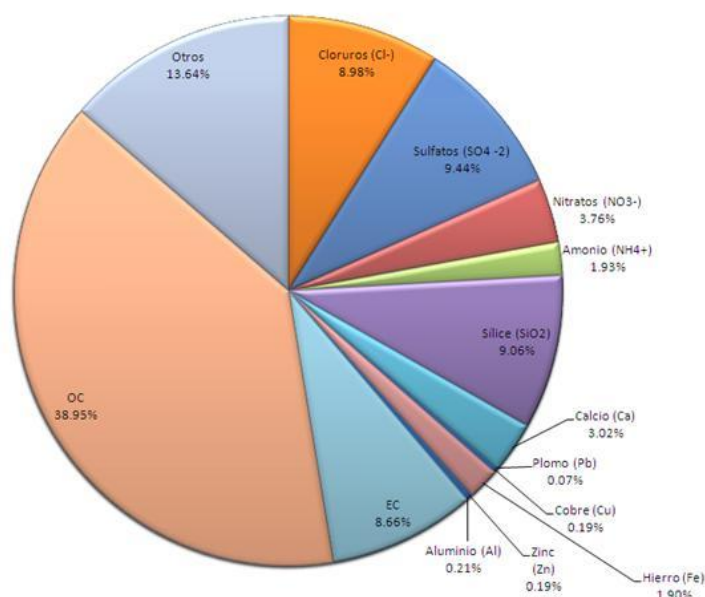
**Figura 8 Comparación resultados promedios horarios BC y PM10 Centro**

Los resultados obtenidos indican que la máxima concentración de Carbón Negro coinciden con las horas de mayor circulación de vehículos que utilizan diesel como combustible en el centro de Bucaramanga, es decir al inicio y finalización de la jornada laboral.

**Proporciones PM10 en el AMB:** Si se considera que el comportamiento de todas las especies analizadas es similar en toda el Área Metropolitana de Bucaramanga, al

promediar todos resultados obtenidos, la composición mostrada en la Figura sería la típica del PM10 en el AMB.

**Proporciones Promedio Especies PM10 AMB**



**Figura 9. Proporciones promedio Especies AMB**

Como era de esperar los PAHs debido a sus muy bajas concentraciones no presentan un aporte apreciable (todos los PAHs aportan el 0.00028%). De igual manera el Plomo (Pb) representa aproximadamente un 0.1% y el Cobre (Cu), Zinc (Zn) y Aluminio (Al) solo un 0.2%.

**Resultados obtenidos con la modelación:** Posteriormente, la información obtenida producto del análisis físico-químico fue utilizada para correr dos modelos Receptor-Fuente, con la cual se puede cuantificar el aporte aproximado de las fuentes de contaminación responsables del problema de contaminación por Material Particulado en el Área Metropolitana de Bucaramanga.

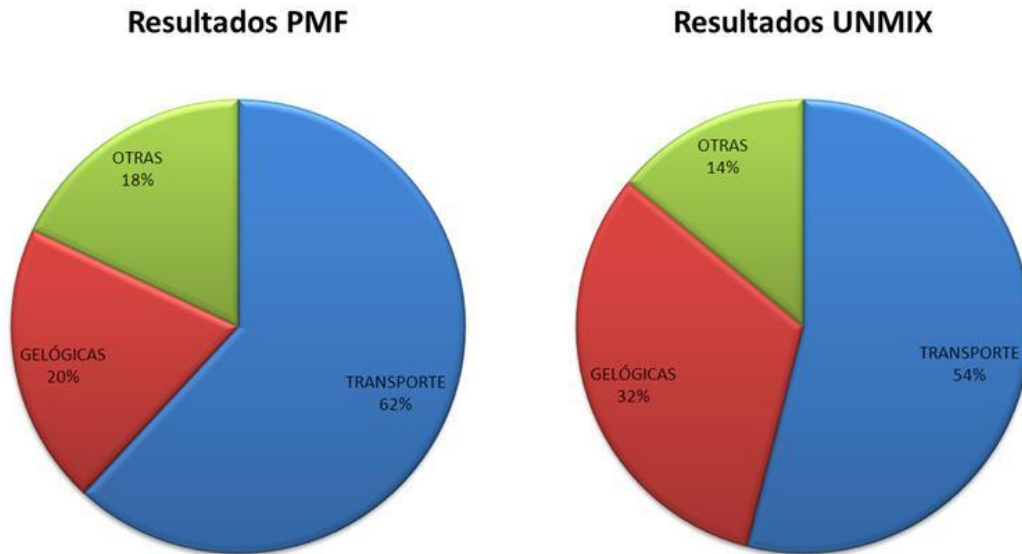
Los modelos seleccionados fueron desarrollados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US-EPA) entidad que ha investigado y trabajado por varios años la problemática de calidad del aire, garantizando la confiabilidad de la información suministrada a continuación. Los modelos utilizados son:

- Factorización de Matriz Positiva (PMF), y
- UNMIX.

Ambos modelos se basan en procedimientos estadísticos y matemáticos y utilizan las características físicas y químicas de las partículas o gases medidas en las fuentes y receptores con el objeto de identificar la presencia y la cantidad de la contribución de cada fuente (fijas, móviles, geológicas y otras) a las concentraciones percibidas por un receptor (habitantes del Área Metropolitana de Bucaramanga).

Finalmente, teniendo en cuenta los resultados de los modelos receptores, en la Figura 10. se presentan y comparan los resultados de manera gráfica. Con "Otras" se designan todas las fuentes que no se ven representadas adecuadamente por los componentes típicos del transporte vehicular y los de origen geológico.





**Figura 10. Comparaciones resultados PMF y UNMIX**

Como puede observarse en la figura anterior, los resultados obtenidos con ambos modelos son similares y teniendo en cuenta la incertidumbre en los datos se pueden considerar estadísticamente equivalentes. Se puede observar que el principal responsable de la contaminación atmosférica por PM10 en el AMB es el transporte vehicular, con un aporte entre el 54 y 62% y las fuentes naturales o geológicas (por ejemplo, fenómenos de erosión) entre un 20 y 32%.

## **CONCLUSIÓN**

El transporte vehicular es el principal causante de la afectación de la calidad del aire que respiran los habitantes del Área Metropolitana de Bucaramanga, indicando que las autoridades locales deben dirigir esfuerzos hacia el control de estas fuentes de contaminación, que se encaminen hacia la sostenibilidad de nuestra región.

## **AGRADECIMIENTOS**

Este estudio hace parte del convenio de cooperación científica No 033 de 2009 cofinanciado por el Ministerio de Ambiente, vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT), la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB), el Observatorio de Salud Pública de Santander (OSPS) y la Secretaría de Salud y Ambiente de Bucaramanga (SSAB).

A la comunidad de los barrios La Joya, Ricaurte, Molinos Altos, Cabecera del Llano y El Kennedy por permitir instalar los equipos de monitoreo al interior de sus viviendas.

A la Dirección de Transito de Bucaramanga (Central de SemafORIZACIÓN ubicada en la Diagonal 15 con Calle 50) por su total apoyo en el monitoreo de calidad del aire desde el año 2006.

## **REFERENCIAS**

1. La Contaminación Atmosférica y sus efectos en la Salud, Bucaramanga Fase I, Rodriguez Laura, Castro Henry, Berena Astrid. Bucaramanga, 2009.

2. A Guide To Positive Matrix Factorization. Hopke, P. Clarkson University, 2000.
3. Ambient Particulate Matter Characterization Guidelines. Canadian Chemical Producers' Association, 2001.
4. Caracterización del material particulado menor a 10 micras en Bucaramanga. Universidad de la Salle, 2007.
5. Caracterización físico-química del material particulado-fracción respirable (PM10) en aire de Bucaramanga. Guiza, L., Puente J. y Quijano, A. Revista Clon, 2002.
6. Characteristics and sources of fine particulate matter in urban air. Vallius, M. National Public Health Institute - Finland, 2005.
7. Definición de elementos técnicos para la formulación de políticas distritales encaminadas al mejoramiento de la calidad del aire en Bogotá. Parte C- Caracterización de material particulado y modelos receptores. Behrentz et al, Universidad de los Andes, 2008.
8. EPA-CMB8.2 Users Manual. U.S. Environmental Protection Agency, 2004.
9. EPA Positive Matrix Factorization (PMF) 3.0 Fundamentals & User Guide. U.S. Environmental Protection Agency, 2008.
10. EPA Unmix 6.0 Fundamentals & User Guide. U.S. Environmental Protection Agency, 2007.
11. Resolución 601 de 2006. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial – MAVDT. República de Colombia.
12. Resolución 610 de 2010. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial – MAVDT. República de Colombia.
13. Resolución 909 del 5 de Junio de 2008. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial – MAVDT. República de Colombia.
14. SPECIATE 4.2 Speciation Database Development Documentation. U.S. Environmental Protection Agency, 2009.
15. Multivariate Receptor Modeling Workbook. Brown, S., Hafner, H. de Sonoma Technology, Inc. Preparado para: United States Environmental Protection Agency, Septiembre 2005.
16. Evaluación de la concentración de carbono orgánico y carbono elemental contenidos en material particulado de PM10 en la localidad de Puente Aranda, en ambientes intra y extramurales. Díaz, A. y González, J. Proyecto de grado Universidad de la Salle, Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria. 2008.

17. The Aethalometer. A.D.A. Hansen Magee Scientific Company, 2005.
  
18. Appendix J To Part 50—Reference Method for the Determination Of Particulate Matter as PM10 in the Atmosphere (7–1–09 Edition). United States Environmental Protection Agency en el Code of Federal Regulations Title 40 Chapter I Part 50, 2009.
  
19. CDMB – Datos de Monitoreo, informes de Calidad del Aire.