

ELEMENTOS TÉCNICOS DEL **PLAN DECENAL** **DE DESCONTAMINACIÓN** DE BOGOTÁ



Parte 1: Caracterización de Material Particulado y Modelos Receptores

**ELEMENTOS TÉCNICOS DEL
PLAN DECENAL
DE DESCONTAMINACIÓN
DE BOGOTÁ**

© Alcaldía Mayor de Bogotá
Secretaría Distrital de Ambiente, SDA, 2009
ISBN No. 978-958-695-441-9

Primera edición

Julio de 2009

Secretaría Distrital de Ambiente, Bogotá, D.C., Colombia

Impreso en Colombia - Printed in Colombia

Todos los derechos reservados. Esta publicación no puede ser reproducida total ni parcialmente, ni registrada en o transmitida por un sistema de recuperación de información, en ninguna forma ni en ningún medio sea mecánico, fotoquímico, electrónico, magnético, electro-óptico, por fotocopia o cualquier otro, sin el permiso previo por escrito de la entidad.

ELEMENTOS TÉCNICOS DEL PLAN DECENAL DE DESCONTAMINACIÓN DE BOGOTÁ

Parte 1: Caracterización de Material Particulado y Modelos Receptores

ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ
Secretaría Distrital de Ambiente

Samuel Moreno Rojas
Alcalde Mayor

Juan Antonio Nieto Escalante
Secretario Distrital de Ambiente

Samir José Abisambra Vesga
Subsecretario General y de Control Disciplinario

Edgar Fernando Erazo Camacho
Director de Control Ambiental

Edgar Vicente Gutiérrez Romero
Subdirector de calidad del aire, auditiva y visual

GRUPO EDITOR

Jesús Miguel Sepúlveda Escobar
Profesional especializado Subdirección de
calidad del aire, auditiva y visual

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental
Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental

Eduardo Behrentz Valencia
Investigador principal

Nancy Sánchez Morcote
Co-investigadora

Investigadores colaboradores
A. Juliana Rivera Contreras

Corrección de estilo
Oficina Asesora de Comunicaciones SDA

Fotografía
Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental

Diseño y diagramación
Diana Fernández Prieto

Impresión
Contácto Gráfico Ltda.

Descargo de responsabilidad

Las afirmaciones y conclusiones que se presentan en este documento son producto del trabajo y la reflexión del contratista y no necesariamente corresponden a la opinión de la entidad financiadora, la Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá. La mención o el uso de productos comerciales o de empresas que se utilizaron para tener acceso a los mismos no deben ser entendidos como un aval o una recomendación de uso por parte de la Universidad de los Andes.

Agradecimientos

Las contribuciones de la Secretaría Distrital de Ambiente, en particular por parte de Jesús Miguel Sepúlveda, principal interventor de este proyecto y Edgar Erazo, Director de Control Ambiental; fueron altamente apreciadas. De forma similar se agradecen las contribuciones de Claudia Buitrago, Martha Liliana Perdomo, Aymer Maturana, Carolina Jarro, Eder Pedraza, Andrea Maldonado y Mónica Espinosa.

Agradecemos de forma especial la colaboración prestada por Laura Dawidowski y Patricia Smichowski de la Comisión Nacional de Energía Atómica de la Argentina. Del mismo modo se agradece a la Empresa de Teléfonos de Bogotá (Sandro Roper, Mónica Ruiz) y el Instituto Colombiano de Geología y Minería (Gladys Valderrama).

Deseamos también destacar las valiosas contribuciones de Daniela M.S. Parra y de los miembros del equipo de campo: Juan Carlos Cárdenas, Andrey Giraldo, Gabriel Hernández, Diego Armando Jacinto y Edgar Andrés Virgüez.

Agradecemos los aportes realizados por Edna L. Delgado, Gloria Esperanza Barriga, Rigoberto Gómez, John Jairo Cardeñoso, Olga Lucía Gómez, Nancy Janeth Henao, Alix Patricia Jaimes, Mariela Quintero, Luz Marina Rubiano, Néstor Yesid Rojas, Pablo Rincón y Patricia Vargas.

Finalmente, destacamos y agradecemos de manera especial el soporte provisto para esta investigación por parte de la Alcaldía Mayor de Bogotá, a través de la Secretaría Distrital de Ambiente así como por parte del Inter-American Institute for Global Change Research (fondos CRN II 2017 a través del soporte de la Fundación Nacional de Ciencias de los Estados Unidos - Grant GEO-0452325).

Este reporte fue remitido en cumplimiento parcial del Contrato de Ciencia y Tecnología 347 de 2006 entre la Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá y la Universidad de los Andes, cuyo objeto fue elaborar estudios y planes para contribuir a los procesos de monitoreo y mejoramiento de la calidad del aire en el distrito capital de Bogotá así como diseñar las políticas necesarias para controlar los factores que generan contaminación atmosférica. Este trabajo fue culminado en el mes de Octubre de 2008.

Resumen ejecutivo

Durante el desarrollo de este proyecto se llevó a cabo la identificación de fuentes causantes del problema de contaminación del aire en Bogotá, a partir de un ejercicio de caracterización de muestras de material particulado (PM) y de la aplicación de la técnica de modelación por receptores. Estas metodologías y procedimientos corresponden al estado del arte en estos temas.

Para la caracterización de las muestras de PM se llevó a cabo una campaña masiva de campo haciendo uso de 278 filtros de cuarzo (Whatman tamaño 20.3 x 25.4 cm x 0.45 mm) instalados en estaciones de monitoreo (siguiendo el protocolo CFR 40, Parte 58, Apéndice E) localizadas en lugares representativos de diversas condiciones al interior del perímetro urbano de Bogotá (zonas industrial, residencial y de alto tráfico vehicular) en el período comprendido entre mayo y diciembre de 2007.

Para el caso de aniones y cationes se cuantificó la presencia de trece especies incluyendo siete aniones (fluoruro, cloruro, nitrito, sulfato, bromuro, nitrato, y fosfato) y seis cationes (litio, sodio, amonio, potasio, magnesio, y calcio) por medio de cromatografía iónica. Para el caso de metales se cuantificó la presencia de 23 especies incluyendo plata, aluminio, boro, bario, bismuto, calcio, cadmio, cobalto, cromo, cobre, hierro, galio, indio, potasio, litio, magnesio, manganeso, sodio, níquel, plomo, estroncio, talio, y zinc; por medio de la técnica de espectroscopia de emisión con fuente de plasma acoplado por inducción.

Para la modelación por receptores, se seleccionó el método de Análisis de Componentes Principales acoplado con una rotación tipo Varimax y una regresión lineal múltiple. Este modelo fue ejecutado para cada una de las zonas de interés y para cada una de las fracciones de material particulado que fueron consideradas en la campaña de campo (PM₁₀ y PM_{2.5}).

Los resultados de este estudio confirman que la zona industrial de Bogotá presenta niveles de contaminación por material particulado que son bastante más elevados que los encontrados en otras zonas de la ciudad (promedio diario de PM₁₀ de 110 ug/m³, rango entre 25 y 250 ug/m³). Los iones con mayor presencia en la ciudad son el sulfato (1.78 ug/m³ en muestras de PM₁₀ recolectadas en la zona industrial), nitrato (1.5 ug/m³ en PM₁₀ de la zona residencial), cloruro (0.66 ug/m³ en muestras de PM₁₀ de la zona industrial) y amonio (0.45 ug/m³ en muestras de PM_{2.5} en la zona con alto tráfico vehicular).

Los metales analizados representan el 7.5, 8.9, y 10.1% de las concentraciones de PM₁₀ registradas en las zonas de alto tráfico, de tipo residencial y de tipo industrial, respectivamente. Para el caso de PM_{2.5} las especies metálicas representan el 5.4% del material recolectado en la zona residencial y el 4% del material recolectado en la zona de alto tráfico vehicular.

Los resultados de la modelación por receptores demostraron que el conocimiento de las concentraciones de material particulado no es suficiente para entender el problema de contaminación en un lugar específico de la ciudad. Esto se debe a que la peligrosidad de dicho contaminante (asociada con el tipo de materiales que transporta en sus superficies) puede ser sustancialmente distinta en diferentes zonas de la ciudad.

Por otro lado, la modelación por receptores demostró ser de gran importancia ya que a través de la misma fue posible identificar particularidades específicas para la ciudad en lo que se refiere a los responsables de su problema de contaminación. Esto significa que se debe continuar con esfuerzos similares para ampliar y complementar los resultados aquí encontrados. Esto es especialmente cierto dado que no es posible extrapolar los resultados encontrados para ciudades diferentes o incluso para zonas con características distintas al interior de una misma ciudad.

Finalmente, a través de este estudio se puede tener certeza que la atmósfera de la ciudad funciona de forma similar a un sistema interconectado, en donde las emisiones generadas en un lugar geográfico pueden tener implicaciones negativas en zonas relativamente alejadas. El reconocimiento de esta realidad es fundamental ya que significa que las políticas de control de la contaminación deben planificarse de manera integral y considerando a toda la ciudad (y algunos de sus alrededores) como un mismo sistema.

Tabla de contenido

1. Aspectos generales	1
2. Antecedentes	2
2.1. Fundamentos conceptuales para la modelación de receptores	4
2.1.1. Balance químico de masas	4
2.1.2. Análisis de variables múltiples	5
2.1.3. Análisis de componentes principales	6
2.1.4. Factor de matriz positiva	6
2.1.5. Modelo Unmix	6
3. Metodología	8
3.1. Caracterización del material particulado de Bogotá	9
3.1.1. Actividades previas a la campaña de campo	9
3.1.2. Campaña de campo	10
3.1.3. Determinaciones analíticas	14
3.2. Modelo de receptores	15
3.2.1. Análisis cualitativo - PCA	16
3.2.2. Regresión lineal múltiple	17
4. Resultados – caracterización de material particulado	18
4.1. Concentración de material particulado en los puntos de monitoreo	18
4.2. Contenido de iones en el material particulado de Bogotá	20
4.3. Contenido de metales en el material particulado de Bogotá	24
4.4. Aporte de las especies iónicas y metálicas	26
5. Resultados – ejecución del modelo de receptores	28
5.1. PM ₁₀ en la zona industrial (corrida 1)	28
5.2. PM ₁₀ en la zona de alto tráfico vehicular (corrida 2)	33
5.3. PM _{2.5} en la zona de alto tráfico vehicular (corrida 3)	34
5.4. PM ₁₀ en la zona residencial (corrida 4)	36
5.5. PM _{2.5} en la zona residencial (corrida 5)	37
5.6. Resumen de resultados – análisis comparativo	39
6. Análisis de incertidumbre	40
7. Conclusiones	41
8. Referencias	43

1. Aspectos generales

El presente documento representa la primera de cuatro partes en las que se encuentra dividido el reporte final de resultados del estudio elaborado por el Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental (CIIA) de la Universidad de los Andes, contratado por la Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá (SDA) como parte del convenio de ciencia y tecnología número 347 de 2006.

El objeto de dicho convenio fue elaborar estudios y planes para contribuir a los procesos de monitoreo y mejoramiento de la calidad del aire en el distrito capital de Bogotá así como diseñar las políticas necesarias para controlar los factores que generan contaminación atmosférica.

Esta primera parte del reporte final se centra en los resultados obtenidos para el ejercicio de modelación de receptores y caracterización físico-química del material particulado presente en la atmósfera bogotana.

2. Antecedentes

El material particulado (PM) presente en el ambiente está compuesto por diversas especies químicas que incluyen, entre otras, metales, aniones, cationes y carbono orgánico y elemental (Chow J, 1995). La técnica conocida como “caracterización del material particulado” comprende la identificación y cuantificación de dichas especies a través de la aplicación de diversas técnicas de análisis fisicoquímico.

Con base en los resultados obtenidos mediante estas técnicas de análisis es posible aplicar modelos estadísticos conocidos como “modelos de receptores”, los cuales permiten la identificación y cuantificación de las fuentes que contribuyen a la concentración de material particulado encontrada en un determinado punto de monitoreo (ver Sección 2.1).

De esta forma, diversas ciudades alrededor del mundo han realizado estudios tendientes a caracterizar el material particulado presente en su ambiente para así identificar sus fuentes y aportes relativos. Los resultados obtenidos en trabajos de esta índole han constituido una herramienta esencial para el entendimiento de la situación de contaminación por material particulado y para la formulación de políticas de control de la contaminación del aire.

Los antecedentes de aplicación de modelos de receptores para los fines antes descritos, se registran en la literatura científica desde la década de los años 70, aunque con mayor frecuencia a partir de mediados de la década de los años 80. Hopke et al. (1980), analizó el contenido de metales mediante espectroscopia de absorción atómica y análisis por activación de neutrones en muestras de material particulado recolectadas en la intersección de dos vías en la ciudad de Urbana (Illinois, Estados Unidos). Los resultados obtenidos a partir de los análisis estadísticos realizados indicaron que la principal contribución a las concentraciones de material particulado encontradas correspondía a emisiones directas de vehículos, incluyendo partículas de hierro desprendidas de sus tubos de escape. Igualmente, resultaron relevantes las partículas de cemento desprendidas de las vías y las fuentes naturales (v.g., partículas de tierra).

Davis (1984), empleó emisión y transmisión de rayos X y microscopía de polarización óptica para hallar el contenido de compuestos tales como calcita, magnetita y hematita en el material particulado presente en una zona de la ciudad de Denver (Colorado, Estados Unidos). De manera posterior aplicó el método de varianza efectiva, determinando como principales responsables de los niveles de este contaminante las partículas de tierra, las emisiones provenientes de los vehículos diésel y el polvo resuspendido de las calles.

Stevens et al. (1984), realizó un estudio de modelos receptores para la fracción fina del material particulado recolectado en el valle de Shenandoah (Virginia, Estados Unidos) empleando el denominado análisis de factores. Los resultados obtenidos indicaron un patrón de sulfato, azufre, amonio, selenio y nitrato total identificable en el conjunto de muestras recolectadas, sugiriendo así como principales causantes del problema de contaminación por material particulado en el sitio de estudio, a las plantas de generación de energía operadas con carbón.

Thurston & Spengler (1985), identificó y cuantificó las principales fuentes contribuyentes a los niveles de contaminación por material particulado registrados en una zona de la ciudad de Boston (Massachusetts, Estados Unidos). La metodología aplicada en este estudio se centró en el denominado Análisis de Componentes Principales (PCA por sus siglas en inglés) sobre los datos obtenidos a partir de un monitoreo de cerca de 24 meses de duración. Las contribuciones se analizaron sobre las fracciones fina y gruesa del contaminante en referencia, encontrando que el material fino provenía principalmente de partículas de tierra, emisiones de vehículos, fuentes relacionadas con la combustión de carbón y aceites. Por su parte, las fuentes identificadas para el material grueso incluyeron partículas de tierra, emisiones de vehículos, emisiones de incineradores, y combustión de aceites y sulfatos.

Parekh et al. (1987), analizó el contenido de 23 metales y especies iónicas incluyendo cloruro, sulfato y nitrato en muestras de material particulado recolectadas en la ciudad de Karachi, Pakistán. De manera posterior, se aplicó la metodología de análisis de factores empleando PCA. Los resultados indicaron cinco fuentes como las principales responsables de las concentraciones de material particulado en el sitio de medición: partículas de tierra, aerosoles marinos, incineradores, combustión de carbón y emisiones de vehículos.

Yoshizumi (1990), realizó el análisis químico de muestras de material particulado recolectadas en diez zonas diferentes de la ciudad de Tokyo, Japón. La determinación de metales y especies iónicas se realizó mediante las técnicas de activación de neutrones y cromatografía iónica, respectivamente. Los datos obtenidos fueron analizados mediante el Modelo de Balance Químico de Masas (CMB por sus siglas en inglés). Los resultados obtenidos permitieron identificar dos perfiles de fuente asociados a los niveles de material particulado hallados: las emisiones vehiculares provenientes de la flota alimentada con combustibles diésel y las partículas de tierra.

Eltayeb et al. (1993), analizó 24 muestras de material particulado recolectadas en la ciudad de Karthoum (Sudán) empleando emisión de rayos X (PIXE) y fluorescencia de rayos X (XRF) con el fin de determinar el contenido de 27 elementos metálicos y no metálicos. Los datos obtenidos fueron analizados mediante una modificación del Análisis Absoluto de Componentes Principales (APCA), el cual permitió identificar dos componentes explicativos del material particulado monitoreado: las partículas de tierra y los procesos de combustión

Fung & Wang (1995), realizaron el análisis de aportes de fuentes al material particulado recolectado en los Nuevos Territorios de la ciudad de Hong Kong (China). El método de análisis químico seleccionado correspondió a la espectrofotometría de emisión atómica con plasma acoplado inductivamente (ICP-AES). El análisis de los datos registrados se realizó mediante PCA, permitiendo la identificación de seis componentes principales: actividades de construcción, incineradores/emisiones vehiculares, aerosoles marinos, polvo resuspendido, plantas de potencia que empleaban carbón y combustión de aceite.

Chan et al. (1997), realizó la caracterización química y posterior identificación de fuentes contribuyentes al material particulado presente en la ciudad de Brisbane (Australia) en sus fracciones fina y gruesa. Las muestras fueron recolectadas de tal forma que se contara con material proveniente de cinco sitios de estudio que fuesen representativos de los patrones de uso de tierra característicos de la región: residencial, industrial, con cercanía a vías de alto tráfico y combinaciones de las anteriores.

Este mismo estudio, además de evaluarse la variabilidad en las fuentes debida a la ubicación de los puntos de muestreo, se analizó la influencia de las condiciones climáticas relacionadas con las distintas estaciones y la variabilidad debida al día de la semana en el que se realizaba el muestreo. La identificación de las fuentes se llevó a cabo empleando un método de reconstrucción de la composición química del material particulado, partiendo del supuesto de ocho componentes característicos. De esta manera, se encontró que las mayores fuentes contribuyentes a los niveles de material particulado registrados correspondían a material de la corteza terrestre, compuestos orgánicos, aerosoles marinos y sulfatos.

Chung-Shin et al. (2000), caracterizó el material particulado recolectado en cinco puntos de muestreo ubicados en la región del sur de Taiwán, la cual cuenta con una intensa actividad industrial. Las fracciones monitoreadas correspondieron a material particulado con tamaño menor a $2.5\ \mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2.5}$), tamaño entre 2.5 y $10\ \mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2.5-10}$) y partículas suspendidas totales (TSP). El análisis químico se centró en la determinación del contenido de aniones, cationes, especies metálicas y carbón orgánico y elemental. El modelo empleado para determinar las fuentes involucradas y su contribución correspondió al CMB. Las mayores fuentes identificadas correspondieron a las emisiones vehiculares, polvo resuspendido, nitrato, sulfato, cemento y aerosoles marinos.

Celis et al. (2003), realizó la caracterización de partículas de tamaño inferior a $10\ \mu\text{m}$ (PM_{10}) en la ciudad de Chillan (Chile). En este trabajo se monitorearon diferentes zonas de la ciudad incluyendo los sectores comercial, residencial e industrial. Con el objeto de determinar la composición química del material particulado recolectado se utilizaron las técnicas analíticas PIXE y XRF. Las mayores concentraciones de PM_{10} fueron encontradas en el centro de la ciudad de Chillán en los meses de invierno. En este mismo punto, la composición química fue más variable debido al alto tráfico de la ciudad y otras fuentes antropogénicas, mientras que las otras zonas fueron principalmente afectadas por las fuentes fijas y un gran número de vías sin pavimentar.

También se encontró que la concentración de PM fue un 40% mayor en los días hábiles y que la mayor parte del PM_{10} analizado se encontraba compuesto por sustancias carbonáceas (carbono elemental y materia orgánica), material de la corteza terrestre y sustancias inorgánicas de origen secundario (nitrato y amonio).

Wahlin et al. (2006), caracterizó y aplicó la metodología de modelos de receptores en zonas con alta presencia de emisiones vehiculares en la ciudad de Copenhagen (Dinamarca). El monitoreo incluyó las fracciones fina y gruesa del material particulado y el análisis mediante PIXE permitió determinar 26 especies metálicas y no metálicas. Los resultados fueron analizados mediante la aplicación del Modelo de Receptores con Restricciones Físicas (COPREM). Los resultados obtenidos identificaron como los principales aportantes al material particulado recolectado a las emisiones provenientes de los tubos de escape de vehículos, las partículas provenientes de la vía y los neumáticos, así como las partículas desprendidas de los frenos y los aerosoles salinos.

Mazzei et al. (2008) llevó a cabo un estudio de caracterización de material particulado en Génova (Italia) en donde se realizó la identificación de fuentes de contaminación mediante la aplicación del modelo de Factorización de Matriz Positiva (PMF por sus siglas en inglés). Las fracciones monitoreadas correspondieron a PM₁₀, PM_{2.5} y material particulado de tamaño menor a 1 µm, recolectadas en cuatro puntos con diferentes características topográficas y de urbanización. Se determinaron 26 metales a través de XRF. Los resultados de la aplicación del PMF permitieron establecer como las fuentes predominantes en los puntos de muestreo a los aerosoles marinos, las partículas de tierra, los sulfatos y nitratos, la combustión de aceites pesados, las emisiones vehiculares y los hornos de fundición.

Las referencias presentadas anteriormente constituyen tan sólo una muestra de los múltiples antecedentes que existen sobre la técnica de identificación de fuentes y modelos de receptores para el análisis de la contaminación por material particulado en ciudades. Otras referencias relevantes incluyen los trabajos realizados para las ciudades de Toronto (Lee et al., 2003; Buset et al., 2006); Londres (Charron & Harrison, 2005); El Cairo (Abu-Allaban et al., 2002); Isla de Taiwan (Guor-Cheng et al., 1999; Tsai et al., 2006); Barcelona (Querol et al., 2001); Milán (Pauletti et al., 2002; Lonati et al., 2005); Santiago de Chile (Artaxo et al., 1999) y algunas áreas al norte de Grecia (Samara et al., 2003).

2.1. Fundamentos conceptuales para la modelación de receptores

Tal y como fue mencionado anteriormente, los modelos de receptores comprenden técnicas de diversos tipos que se utilizan para determinar la identidad de las fuentes de emisión que contribuyen a las concentraciones de determinados contaminantes en lugares específicos. Estas técnicas incluyen métodos microscópicos, físicos y químicos (Seigneur, 1997).

Los modelos de tipo químico se basan en la identificación de los denominados perfiles de fuente de emisión y su relación con las concentraciones halladas en un punto determinado. En este caso se supone que las concentraciones de las sustancias químicas que componen al material particulado se encuentran asociadas con las fuentes generadoras del mismo (Hopke, 2003).

Este tipo de modelos suelen ejecutarse bajo dos tipos de técnicas: el CMB y el análisis de variables múltiples. Cada una de éstas requiere de información específica de entrada y de características determinadas en los datos experimentales a analizar. De esta forma, la selección de una u otra para su aplicación se basa en el tipo y cantidad de información disponible así como en las medidas analíticas incluidas en el diseño experimental del estudio que se pretende desarrollar.

2.1.1. Balance químico de masas

Este modelo (de tipo estadístico lineal) requiere del conocimiento previo de los perfiles de emisión de aquellas fuentes que podrían aportar a los niveles de material particulado observados en un punto de interés (Cooper & Watson, 1980; Hopke, 1985; Lee et al., 2008).

El uso de esta información en conjunto con los datos de concentración para las distintas especies identificadas en el material particulado que es recolectado durante la fase de campo que debe desarrollarse como parte de estos estudios, permite la aplicación de una serie de ecuaciones de balance de masas que relacionan la concentración de una especie en el punto de medición con la concentración de la misma en la fuente de emisión¹. En todos los casos se incluye la contribución de cada fuente a las concentraciones halladas (Cooper & Watson, 1980), de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$c_i = \sum_{j=1}^p a_{ij} s_j \quad i = 1, 2, \dots, n$$

¹ Para la ejecución de estos modelos es común el uso de la herramienta computacional EPA TTN 2000 - EPA CMB8.2.

En donde c_i corresponde a la concentración medida para la especie i , a_{ij} representa la concentración de la especie i en la fuente de emisión j , s_j corresponde a la contribución de la fuente j a la concentración i y p indica el número de fuentes identificadas como aportantes a la concentración en referencia.

Este método requiere también del conocimiento previo de la incertidumbre asociada tanto al perfil de la fuente como a los valores de concentración en las muestras recolectadas en lo referente a cada especie química presente. Del mismo modo, la aplicación del CMB involucra las siguientes suposiciones: a) la composición de las emisiones de las fuentes involucradas es constante durante el tiempo de medición; b) la incertidumbre de cada fuente es independiente y presenta una distribución normal; c) las especies químicas no reaccionan entre sí; d) los perfiles de las fuentes son linealmente independientes uno de otro (Kleeman M, 2003).

Una ventaja importante en la aplicación del CMB es que requiere un número relativamente pequeño de muestras (generalmente menor a 25; Bruinen de Bruin, 2006). Al mismo tiempo, sin embargo, sus requerimientos relativos al conocimiento de los perfiles de las fuentes de emisión hacen su aplicación poco práctica en muchas ciudades del mundo (incluyendo Bogotá).

2.1.2. Análisis de variables múltiples

Los modelos basados en el análisis multivariable (conocidos como modelos bi-lineales) corresponden a métodos estadísticos comunes a diversas disciplinas científicas y a través de los cuales se pretende extraer e identificar características que sean similares al interior de un cierto conjuntos de datos (Hopke, 1985; Dunteman, 1989; Jackson, 1991; Meyers et al., 2006.)

Estos modelos consideran las mismas variables que el CMB pero en este caso el conocimiento del perfil de emisión de las fuentes no es un requerimiento. Si bien esto hace que dichos modelos sean más universalmente aplicables, la interpretación de los resultados producidos por los mismos requiere de un conocimiento más específico en lo que se refiere a las características del punto bajo estudio (e.d., mayores tamaños muestrales durante el ejercicio de caracterización de material particulado) y de las posibles fuentes que pueden influenciar las concentraciones de material particulado observadas en éste (a través de una extensa revisión bibliográfica).

Adicionalmente, la interpretación de los resultados al aplicar un modelo de análisis de tipo estadístico requiere una amplia recopilación bibliográfica que incluya los perfiles de emisión de diversos tipos de fuentes que permita a su vez contar con información relativa a elementos que pueden ser considerados trazadores de las mismas. En estos casos se utiliza la siguiente ecuación:

$$c_{ik} = \sum_{j=1}^m \alpha_{ij} \bullet a_{ij} \bullet s_{jk}, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

En donde c_{ik} corresponde a la concentración de la especie i en la muestra k , a_{ij} representa la emisión característica de la fuente (e.d., la fracción de la especie i en la concentración del material particulado de la fuente j en el sitio receptor), s_{jk} corresponde a la concentración de material “desde” la fuente j recolectado en la muestra k , y α_{ij} es el factor de transformación química de las especies (lo que puede ocurrir entre el lugar de emisión y el sitio receptor). Nótese que en este caso, a diferencia del CMB, la componente a_{ij} es determinada durante el ejercicio de modelación (Seinfeld J, 1998).

2.1.3. Análisis de componentes principales

El modelo de PCA es una técnica de “reducción de dimensionalidad” que se basa en la extracción de un número determinado de componentes que es inferior al número de variables involucradas. Con este método se busca, a partir de información relativamente sencilla de obtener, explicar la mayor parte posible de la varianza presente en los datos que son objeto de los análisis (Meyers et al., 2006).

Mediante la aplicación del análisis por PCA se calculan vectores propios que corresponden a los componentes que representan el comportamiento de los datos experimentales y cuyos valores propios permiten determinar la importancia relativa de cada perfil de fuente identificado. Para el desarrollo de un análisis por PCA se requiere de un número relativamente alto de muestras en comparación con los métodos mencionados anteriormente (Henry et al., 1984).

Los resultados obtenidos mediante la aplicación del PCA incluyen: el número de fuentes (componentes retenidos) que logran explicar significativamente el comportamiento de los datos originales, las cargas de cada variable analizada dentro de las fuentes identificadas y los puntajes factoriales de cada muestra recolectada en cada fuente identificada. Estas últimas constituyen la herramienta que es empleada en análisis posteriores y encaminados a la cuantificación de los aportes de cada fuente a las concentraciones de material particulado en un punto de medición determinado.

Algunos de los inconvenientes típicamente asociados con la aplicación del PCA se encuentran relacionados con la dificultad durante la fase de interpretación de los factores hallados así como con la selección del modelo de rotación que debe ser utilizado (Henry, 1987; Paatero, 1997; Paatero et al., 2002). De forma similar, los resultados del PCA pueden verse significativamente afectados en aquellas situaciones en las que los resultados de la fase analítica corresponden a concentraciones que se encuentran cercanas a los límites de detección de las técnicas utilizadas (Paatero et al., 2005).

2.1.4. Factor de matriz positiva

La metodología PMF se basa en el principio de análisis de factores por medio de un robusto algoritmo de mínimos cuadrados que se encuentra asociado con cortos tiempos de respuesta (Ramadan Z, 2003). La principal ventaja atribuida a este método tiene que ver con la inclusión de una restricción de no negatividad para los resultados referentes a las cargas de los elementos para cada uno de los componentes identificados así como para los puntajes factoriales.

Al mismo tiempo, sin embargo, algunos autores han planteado ciertas implicaciones indeseables para la restricción antes mencionada, tales como que las cargas negativas en los factores identificados podrían ser indicadores de interacciones reales e interesantes de evaluar entre las variables bajo estudio. Al imponer dicha restricción, se pierde la posibilidad de identificar tales interacciones (Chan & Mozurkewich, 2006).

El PMF, al igual que la mayoría de los métodos estadísticos que se utilizan para el proceso de identificación de fuentes, requiere de un elevado número de muestras (típicamente superior a 50 en cada punto de medición). La aplicación del PMF puede llevarse a cabo mediante el uso de herramientas disponibles de forma gratuita y pública en el portal en Internet de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos – EPA – (modelos EPA-PMF2 y EPA-PMF1.1).

2.1.5. Modelo Unmix

El modelo Unmix, desarrollado por la EPA en el año 2000, permite la aplicación de diversos algoritmos para conocer la distribución de contaminantes en la atmósfera. Esta metodología tiene la capacidad de identificar un elevado número de fuentes aunque para ello se requiere de grandes tamaños muestrales durante la etapa de caracterización del material particulado (Henry, 2005).

El planteamiento del Unmix supone que la composición de las emisiones de las fuentes es constante a través del período de monitoreo, que los perfiles de las fuentes son linealmente independientes unos de los otros y que las especies químicas no reaccionan entre si (principio de linealidad). Para poder hacer uso de esta metodología, el número de fuentes o sus categorías deben ser menores o iguales al número de especies analizadas (Bruinen de Bruin, 2006). Al igual que para el PMF, la EPA ha desarrollado herramientas computacionales de distribución gratuita para la ejecución de análisis haciendo uso del Unmix (EPA-Unmix 6.0).

Otras metodologías de uso común en procesos de identificación de fuentes a través de modelos receptores basados en resultados de caracterizaciones de material particulado incluyen el Método de Función Ortogonal Empírica (que incluye la ubicación espacial de las fuentes) y los Modelos Estadísticos Híbridos basados en CMB (Kleeman, 2003).

3. Metodología

Durante el desarrollo de este proyecto, la identificación de fuentes responsables del problema de contaminación por material particulado en Bogotá se llevó a cabo mediante la aplicación de un modelo de receptores basado en la caracterización fisicoquímica de muestras recolectadas en diferentes zonas de la ciudad (ver Figura 3.1).

Para la caracterización de las muestras de PM se llevó a cabo una campaña masiva de campo en la que se recolectaron cerca de 300 filtros que fueron instalados en estaciones de monitoreo localizadas en lugares representativos de diversas condiciones al interior del perímetro urbano de Bogotá (zonas industrial, residencial y de alto tráfico vehicular). Este esfuerzo fue realizado en tres etapas: **1)** Actividades preparatorias a la campaña de campo; **2)** Recolección de muestras de material particulado²; **3)** Determinación analítica de metales e iones en el laboratorio de la Universidad.

Para el caso de la aplicación del modelo de receptores se llevaron a cabo las siguientes tres etapas: **1)** Selección del tipo de modelo a ser utilizado; **2)** Ejecución del modelo estadístico; **3)** Cálculo de puntuaciones y regresiones múltiples.

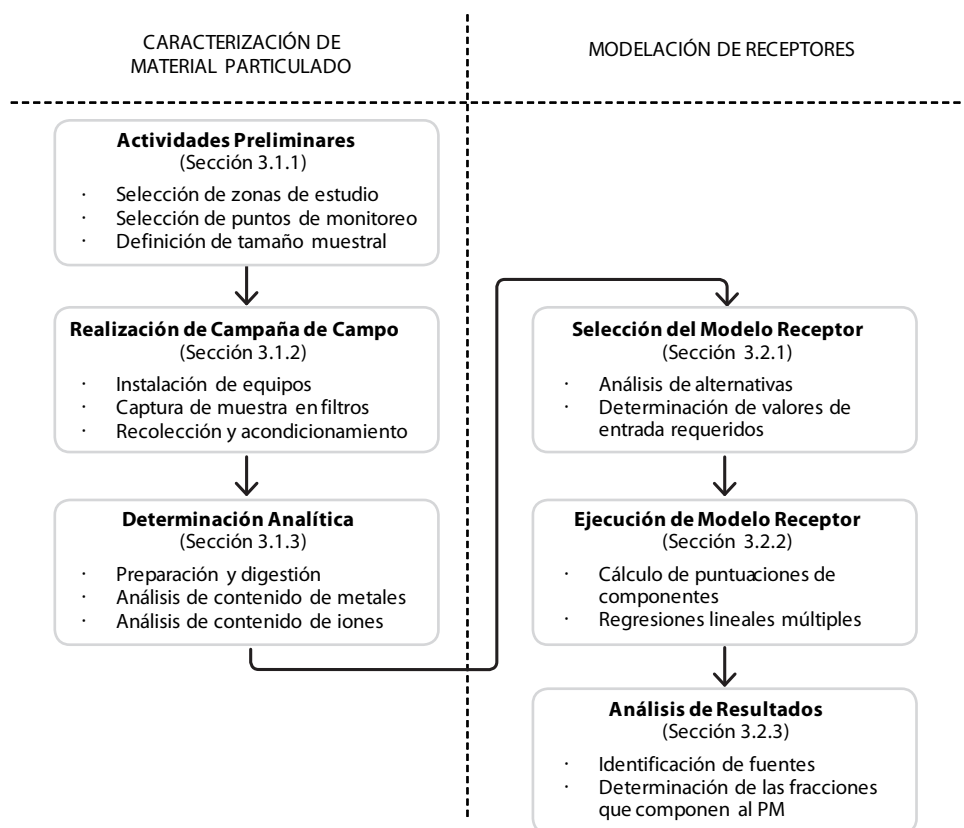


Figura 3.1. Diagrama esquemático de la metodología para la identificación de fuentes.

² Al igual que para el caso de los inventarios de emisiones provenientes de fuentes fijas y móviles (ver partes A y B del informe final de este mismo proyecto), la campaña de campo que se realizó para la caracterización del material particulado corresponde a un esfuerzo sin antecedentes en la capital del país.

3.1. Caracterización del material particulado de Bogotá

En este capítulo se describe la metodología empleada para la recolección de muestras de material particulado y la posterior caracterización química de las mismas. Estas actividades se llevaron a cabo en las etapas que se describen a continuación.

3.1.1. Actividades previas a la campaña de campo

La serie de actividades preparatorias a la campaña de campo incluyeron: **a)** La definición del número de sitios de monitoreo y las características de los mismos; **b)** La identificación de los lugares específicos en los que se llevarían a cabo los muestreos de material particulado y la gestión para tener acceso a dichos lugares; **c)** La definición del tamaño muestral; **d)** El transporte y acondicionamiento de los equipos y los filtros utilizados para la captura de muestras.

Los sitios de monitoreo incluidos en la campaña de campo fueron seleccionados de tal manera que resultaran representativos de zonas de la ciudad con diferentes características en cuanto a flujo vehicular (cantidad y tipo de flota) y tipo de actividad desarrollada. De esta forma, se seleccionaron tres lugares de medición: **1)** Zona con alta actividad industrial, alto tráfico de vehículos de carga pesada y con presencia de vías sin pavimentar; **2)** Zona con tráfico vehicular mixto incluyendo vehículos de transporte público colectivo así como buses articulados de la flota de TransMilenio (TM), vehículos de carga pesada y vehículos particulares; **3)** Zona residencial con una actividad vehicular de carácter intermedio y relativamente alejada de la zona industrial de la ciudad.

Una vez definidos el número y características de los puntos en los cuales se ubicarían los equipos de medición, se procedió a realizar recorridos por distintas zonas de la ciudad con el fin de ubicar los sitios específicos que cumplieran con las condiciones antes descritas.

Para el caso de la zona con alta actividad industrial, el lugar de monitoreo seleccionado correspondió a las instalaciones del Centro de Innovación y Desarrollo Tecnológico de la Universidad de los Andes, ubicado en la localidad de Puente Aranda (centro-occidente de la ciudad) en la carrera 65b con Calle 17a.

Para el caso del sitio con alta actividad vehicular se seleccionó la intersección entre la Avenida Suba y la Calle 127 en el nor-occidente de la ciudad mientras que el punto correspondiente a la zona residencial fue ubicado en el Barrio La Esmeralda en la Carrera 52 con Calle 44, en el occidente de la ciudad. Para la ubicación de los equipos en estos dos puntos (ver figuras 3.2 y 3.3) se contó con la colaboración de la Empresa de Teléfonos de Bogotá (ETB) y se tuvieron en cuenta criterios tales como la altura de la edificación, la facilidad de acceso a las instalaciones y las características de la superficie disponible para la instalación de los equipos de captura de muestra.



Figura 3.2. Lugar de monitoreo en zona de alto tráfico vehicular.



Figura 3.3. Lugar de monitoreo en zona residencial.

El número de muestras a recolectar en cada punto de medición se definió con base en el número de datos requeridos para la aplicación posterior del modelo de receptores. En este sentido, en la literatura científica internacional se reportan diferentes expresiones empíricas que permiten hallar el número de datos necesario para la correcta aplicación de dicha metodología.

Una de las referencias más comúnmente utilizadas tiene que ver con la expresión formulada por Ronald et al. (1984), en la cual se generalizan los requerimientos para estar en capacidad de efectuar un análisis multivariable, tal y como el que se utiliza para un análisis de factores:

$$N > 30 + \left(\frac{V + 3}{2} \right)$$

En donde N corresponde al número mínimo de muestras a obtener en el punto de monitoreo y V indica el número de variables a determinar sobre el material particulado recolectado (especies químicas que son objeto de análisis). Teniendo en cuenta que el número de especies determinadas sobre los filtros que contenían muestra de PM fue de 36 (ver Sección 3.1.3), la cota inferior para el número de muestras a recolectar en cada sitio fue establecida en 49. Esta cantidad fue aumentada hasta 60 muestras por punto (en los casos en los que fue posible) con el fin de contar con un factor de seguridad que permitiera la eliminación de algunas muestras que por eventuales problemas durante el monitoreo o la fase de análisis fuesen consideradas inválidas.

3.1.2. Campaña de campo

Durante la campaña de campo se recolectaron un total de 278 filtros con muestras de PM₁₀ y PM_{2.5} en diferentes lugares de la ciudad de Bogotá y en el período comprendido entre mayo y diciembre de 2007. Cada una de estas mediciones corresponden a 24 horas de monitoreo continuo. De forma adicional a la recolección de muestras de material particulado, se realizaron mediciones de diversas variables meteorológicas así como filmaciones digitales (horarios: 7:00 a 9:00; 11:00 a 13:00; 16:00 a 18:00) para documentar las condiciones de tráfico vehicular en las vías aledañas a los sitios de monitoreo³. La Tabla 3.1 resume la matriz experimental utilizada en este trabajo.

Tabla 3.1. Matriz experimental de la campaña de campo.

Punto de monitoreo	Período de Monitoreo	Muestras PM ₁₀	Muestras PM _{2.5}
Zona Industrial	22/05/07 a 08/08/07	60	0
Zona de alto tráfico vehicular	24/08/07 a 22/10/07	60	59
Zona residencial	03/11/07 a 22/12/07	49	50

Uno de los primeros pasos que se llevaba a cabo con el fin de recolectar las muestras de PM tenía que ver con el acondicionamiento de los filtros (bajo condiciones de temperatura y humedad controladas⁴) que serían utilizados para capturar las muestras. Este procedimiento, así como el relacionado con el manejo de los mismos filtros una vez se encontraban provistos de la muestra de interés, correspondió a lo estipulado en el Apéndice B (Parte 40) del Código Federal de Regulación de los Estados Unidos (CFR por sus siglas en inglés).

Posteriormente se procedía a ejecutar el protocolo de toma de muestra el cual incluía la ubicación del filtro blanco en el portafiltros, la operación del equipo de análisis gravimétrico de alto volumen (Hi-Vol), el registro y la documentación de las variables de temperatura y presión, y la verificación del flujo del aire succionado por el equipo de muestreo.

³ En total se cuenta con cerca de 130 horas de grabación de las condiciones en las vías de interés.

⁴ Estas actividades fueron llevadas a cabo en las instalaciones del Laboratorio de Metrología del Instituto Colombiano de Minería y Geología (Ingeominas).

Para la ubicación de los equipos Hi-Vol se siguió el protocolo establecido por el método CFR 40, Parte 58, Apéndice E, el cual especifica la altura a la que deben instalarse los equipos para una medición de aire ambiente (entre 2 y 15 metros) así como los requerimientos del sitio de monitoreo en términos de la presencia de obstrucciones físicas, cercanía a fuentes de emisión y distancia entre equipos de recolección de muestras (ver Figura 3.4).

Una vez finalizado el muestreo los filtros eran retirados del equipo utilizando guantes de nitrilo y teniendo especial cuidado en evitar la pérdida del material particulado recolectado. Del mismo modo, en esta etapa del procedimiento se tomaban todas las precauciones del caso para evitar la contaminación del filtro por parte de partículas presentes en el ambiente pero ajenas al período de toma de muestra.

Para el transporte y almacenamiento de los filtros con muestra se utilizaron neveras de hícopor y se empleó gel azul como agente refrigerante. Como parte de los procedimientos de control de calidad, se contó con formatos de seguimiento y cadenas de custodia para cada una de las etapas antes mencionadas.



Figura 3.4. Imágenes de la campaña de campo.

3.1.2.1. Instrumentación y equipos

Durante la fase de campo de este trabajo se utilizaron los siguientes instrumentos:

Muestreador de alto volumen para PM₁₀: Este equipo fabricado por Graseby Andersen (referencia 1200) basa su operación en la succión de aire a través de un sistema de separación inercial (SSI por sus siglas en inglés). El flujo de aire es mantenido constante mediante un controlador de flujo volumétrico (VFC). La muestra de partículas que logra penetrar el SSI es atrapada en un filtro (de cuarzo en el caso de este estudio) que es sometido a un análisis gravimétrico.

Muestreador de alto volumen para PM_{2.5}: Este equipo de marca Tisch Environmental (referencia TE-6070-2.5-HVS) opera de forma similar al anteriormente descrito pero en lugar de un SSI se encuentra provisto de un sistema de tubos de impactación (ver Figura 3.5).

Estación Meteorológica: Para la documentación de las condiciones meteorológicas durante los períodos de monitoreo se utilizó una estación Davis Vantage Pro2 Plus. Este equipo cuenta con sensores de humedad relativa, temperatura y nivel de radiación solar. Igualmente, incluye una cápsula para recolección de lluvia (pluviómetro) y un anemómetro que permite registrar tanto la velocidad como la dirección del viento. El equipo tiene comunicación inalámbrica con su panel de control y programación así como con su sistema de adquisición y respaldo de datos (ver Figura 3.6).

Sistema de Cromatografía Iónica: Para la determinación del contenido de iones en las muestras de material particulado se utilizó un equipo marca Dionex referencia ICS-2000 que permite la determinación de iones con carga positiva y negativa haciendo uso de columnas independientes y un detector de conductividad (ver Figura 3.7).

Equipo Microondas: La extracción de los metales en los filtros se llevó a cabo empleando un equipo de microondas CEM referencia MARSX. En este equipo las muestras son introducidas en viales de teflón, los cuales permiten la liberación de la presión durante el calentamiento producido al aplicar la potencia requerida para la extracción. El equipo cuenta con un carrusel que permite el procesamiento de hasta 24 muestras de manera simultánea haciéndolo adecuado para análisis masivos como los realizados en este estudio (ver Figura 3.8).

Espectrómetro de Emisión Óptica: La determinación del contenido de metales sobre la solución resultante del proceso de extracción de los filtros que contenían material particulado se realizó empleando el equipo ICAP 6500 Duo marca Thermo Electron. Este espectrómetro de emisión óptica excita los átomos mediante su paso por un plasma formado gracias al uso de gas argón. Una vez excitados, los átomos emiten fotones a longitudes de onda específicas para cada elemento, lo que permite su identificación a través del sistema óptico con que cuenta el instrumento (ver Figura 3.9).

Adicionalmente, tal y como fue mencionado anteriormente, se utilizó una cámara de video digital de alta resolución para documentar las condiciones de tráfico en las inmediaciones de los lugares en los que se llevaron a cabo las mediciones (Logitech QuickCam Pro 5000).



Figura 3.5. Muestreador de alto volumen empleado en la determinación de PM_{2.5}.

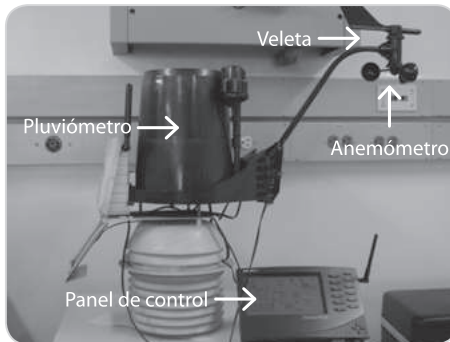


Figura 3.6. Estación meteorológica empleada en la campaña de campo.



Figura 3.7. Cromatógrafo iónico Dionex ICS-2000.



Figura 3.8. Equipo de microondas para la extracción de metales en los filtros.

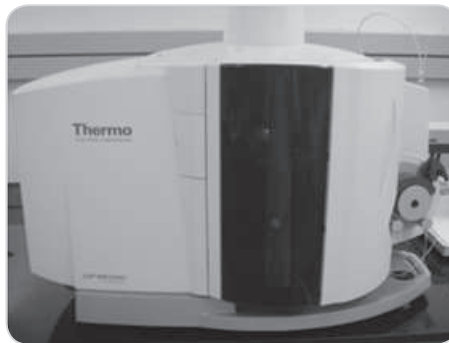


Figura 3.9. Espectrómetro de emisión empleado en la determinación de metales. (Este equipo se encontraba provisto de un auto-muestreador ASX-260 con capacidad para inyectar hasta 120 muestras en una misma secuencia de análisis).

3.1.2.2. Filtros utilizados para la recolección de material particulado

Para la selección de los filtros a ser utilizados durante la campaña de campo se tuvieron en cuenta criterios tales como el tipo de análisis a los que se serían sometidos los mismos; su estabilidad química, térmica y mecánica; la eficiencia de recolección de partículas; los niveles de elementos a analizar en el filtro blanco y la formación de “artefactos”⁵ positivos o negativos en el filtro.

Cada uno de estos criterios fue considerado (ver Tabla 3.2) teniendo en cuenta que los filtros serían utilizados para la determinación de iones, metales y carbono orgánico y elemental⁶.

Como resultado de la evaluación antes descrita se llegó a la decisión de utilizar filtros de cuarzo para la recolección de las muestras de material particulado. Dichos filtros, fabricados por Whatman (referencia QMA-1851-865) contaban con un tamaño de 20.3 x 25.4 cm y un espesor de 0.45 mm así como con una resistencia a la tracción de 200 g/15mm y un contenido de plomo inferior a 0.25 ug.

Tabla 3.2. Síntesis de la aplicabilidad de los materiales de los filtros utilizados para la recolección de material particulado en sistemas de alto volumen⁷.

Material del filtro	Métodos de análisis aplicables	Ventajas	Desventajas
Fibra de vidrio	IC ICP-AES XRF PIXE INAA	<ul style="list-style-type: none"> Alta eficiencia de recolección de partículas. Gama amplia de análisis posibles. 	<ul style="list-style-type: none"> Niveles altos de sodio, calcio y silicio en el filtro blanco. Absorción de HNO₃, NO₂ y SO₂.
Cuarzo	IC ICP-AES ICP-MS XRF PIXE Carbono orgánico y elemental	<ul style="list-style-type: none"> Alta eficiencia de recolección de partículas. Gama amplia de análisis posibles. 	<ul style="list-style-type: none"> Niveles altos de silicio, aluminio y sodio en el filtro blanco. Absorción de vapores orgánicos.
Teflón	XRF PIXE ICP-AES ICP-MS INAA	<ul style="list-style-type: none"> Bajos niveles de metales en el filtro blanco. Inerte. 	<ul style="list-style-type: none"> No permite análisis de carbono. Requiere de un agente humectante que puede introducir interferencias.
Éster de Celulosa	XRD	<ul style="list-style-type: none"> Bajos niveles de metales en el filtro blanco. Alta resistencia al flujo. 	<ul style="list-style-type: none"> No permite análisis de carbono ni de iones. Baja eficiencia de retención de partículas.
Polycarbonato	XRF PIXE	<ul style="list-style-type: none"> Bajos niveles de metales en el filtro blanco. 	<ul style="list-style-type: none"> No permite análisis de carbono ni de iones. Baja eficiencia de retención de partículas.

IC = Cromatografía iónica; ICP-AES = Plasma inductivamente acoplado con espectrofotometría de emisión atómica; XRF = Fluorescencia de rayos X; PIXE = Emisión de rayos X por protón inducido; INAA = Análisis por activación neutrónica instrumental; ICP-MS = Plasma inductivamente acoplado con espectrofotometría de masas; XRD = Difracción de rayos X.

⁵ Los “artefactos” hacen referencia a la detección incorrecta de ciertos materiales en los filtros debido a limitaciones y errores de la técnica experimental.

⁶ Durante el diseño experimental del estudio se consideró la posibilidad de documentar el contenido de carbón elemental en los filtros, a través de un acuerdo de cooperación con otra institución académica que contaba con la capacidad analítica para el desarrollo de dichos análisis. Esto, sin embargo, no fue posible en la práctica debido a diferentes inconvenientes logísticos.

⁷ Adaptado de Chow (1995).

3.1.3. Determinaciones analíticas

Una vez recolectados los filtros, fueron transportados al laboratorio de la Universidad para ser sometidos a diversas técnicas analíticas encaminadas a la determinación de su contenido de especies metálicas e iones.

Para el caso de aniones y cationes se cuantificó la presencia de trece especies distintas en las muestras de material particulado, incluyendo siete aniones (fluoruro, cloruro, nitrito, sulfato, bromuro, nitrato, y fosfato) y seis cationes (litio, sodio, amonio, potasio, magnesio, y calcio). Como parte del proceso de análisis se llevó a cabo una extracción por ultrasonido de los iones presentes en los filtros seguida de un análisis mediante cromatografía iónica⁸ de las soluciones provenientes de la extracción.

El proceso de análisis incluyó la determinación de los niveles de iones en los filtros blancos correspondientes a 12 lotes empleados en la campaña de campo realizada. Éstos fueron sometidos al mismo proceso de extracción que los filtros con muestra y la solución obtenida en cada caso fue analizada por duplicado.

El proceso de control de calidad a los análisis realizados, incluyó la aplicación de calibraciones al inicio de cada secuencia de análisis, la inyección de blancos de extracción hasta lograr la estabilidad en la señal del equipo y el enriquecimiento de filtros con muestra para la determinación del porcentaje de recuperación obtenido mediante el procedimiento de extracción.

Igualmente, se realizó la validación de la curva de calibración aplicada a lo largo de una secuencia de análisis mediante la inyección de estándares de concentración conocida y la comparación de la concentración reportada para éstos por el equipo respecto al valor real.

Respecto al nivel de reproducibilidad del método de análisis, se realizaron inyecciones con tres réplicas para determinadas muestras y se determinó la desviación estándar asociada a las lecturas realizadas.

Para el caso de metales se cuantificó la presencia de 23 especies en las muestras de material particulado, incluyendo plata (Ag), aluminio (Al), boro (B), bario (Ba), bismuto (Bi), calcio (Ca), cadmio (Cd), cobalto (Co), cromo (Cr), cobre (Cu), hierro (Fe), galio (Ga), indio (In), potasio (K), litio (Li), magnesio (Mg), manganeso (Mn), sodio (Na), níquel (Ni), plomo (Pb), estroncio (Sr), talio (Tl) y zinc (Zn).

Estas especies fueron seleccionadas considerando la composición del estándar de calibración utilizado en los análisis y su proceso de determinación comprendió las etapas de extracción ácida mediante microondas⁹ (siguiendo el método EPA I.O 3-1) y de análisis del extracto empleando la técnica de ICP-OES¹⁰.

Cada secuencia de análisis incluyó muestras de los filtros blancos de los lotes asociados a las muestras analizadas. De esta manera, se cuantificó el nivel de metales en 12 filtros blancos y 278 filtros con muestra. La validación de los resultados reportados por el equipo empleado se realizó mediante el procesamiento de muestras certificadas correspondientes al material de referencia estándar SRM-1648 (material particulado urbano) del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología de Estados Unidos (NIST). En cada secuencia de análisis realizada se incluyó una muestra de este material certificado sometido de manera previa a extracción por microondas empleando las mismas condiciones utilizadas para el procesamiento de las muestras de filtros recolectados en campo.

La selección de la línea de emisión a emplear para la lectura de cada metal en las muestras bajo estudio se basó en los resultados obtenidos durante el desarrollo de la curva de calibración, en el nivel de ajuste a la concentración certificada para el material de referencia y en la configuración de las campanas de emisión.

⁸ Las condiciones durante la determinación analítica de iones incluyeron el uso de hidróxido de potasio (30 mM) para aniones y ácido metanosulfónico (20 mM) para cationes y una temperatura de 30 y 20 grados centígrados para aniones y cationes, respectivamente. Para aniones se utilizó supresor ASRS ULTRA II (2mm), una corriente de 23 mA, un volumen de inyección de 10 uL y un tiempo de corrida de 14 minutos. Para el caso de los cationes se utilizó supresor CSRS ULTRA II (2mm), una corriente de 19 mA, un volumen de inyección de 2.5 uL y un tiempo de corrida de 12 minutos.

⁹ Durante el proceso de extracción se utilizó una mezcla de ácido clorhídrico (16.78% p/p) y ácido nítrico (5.55% p/p). El volumen de solución adicionado fue de 10 mL y el número de viales usados igual a 24. La potencia fue de 1,600 W para un tiempo de 23 minutos (un sólo ciclo de extracción). Una vez concluido el proceso de extracción, las muestras fueron diluidas y filtradas utilizando filtros de jeringa con membrana de nylon de 0.45 µm.

¹⁰ Las condiciones durante la determinación analítica de metales incluyeron un tiempo de toma de muestra de 45 segundos, una velocidad de la bomba de 100 rpm, y un tiempo de estabilización de la misma de 5 segundos. La potencia RFP utilizada fue de 1,150 W, el flujo de gas en el nebulizador fue de 0.8 l/min, en el gas auxiliar de 0.5 l/min y en el enfriamiento de 14 l/min. Se usaron tres réplicas por cada muestra y se llevaron a cabo corridas de autotipo.

El control de calidad de las lecturas reportadas por el equipo incluyó la aplicación de calibraciones al inicio de cada secuencia de análisis, la cuantificación de los niveles de metales en la solución de extracción sometida al proceso de microondas y el enriquecimiento de filtros con muestra para la determinación del porcentaje de recuperación obtenido mediante el procedimiento de extracción empleado.

Respecto al nivel de reproducibilidad del método de análisis, tanto las muestras como los patrones de calibración se inyectaron por triplicado, haciendo posible determinar la desviación estándar asociada a la lectura obtenida para cada muestra procesada.

3.2. Modelo de receptores

Una vez revisados y analizados los antecedentes disponibles en la literatura científica internacional en lo que se refiere al uso de modelos receptores con el fin de llevar a cabo procesos de identificación de fuentes de contaminación por material particulado, se concluyó que el método más apropiado para el caso de Bogotá (dada la información disponible) era el Análisis de Componentes Principales. Este PCA fue complementado por medio del denominado método de Rotación Varimax así como por medio de una regresión lineal múltiple.

De forma previa a la aplicación de estos modelos se llevó a cabo un proceso de validación de la información de entrada con el fin de recuperar información faltante (por medio de regresiones lineales) así como para contar con información coherente (v.g., se eliminaron valores iguales e inferiores a cero) para los análisis a realizar.

La metodología utilizada se llevó a cabo en dos etapas (ver Figura 3.10): **1)** Aplicación del PCA seguida por Rotación Varimax, en donde se identifican y determinan los patrones visibles (componentes principales) en el conjunto de datos obtenidos a través de la caracterización química de las muestras de material particulado recolectadas; **2)** Regresión lineal múltiple, en donde se cuantifica el aporte a las concentraciones de material particulado presentes en los puntos de medición para cada uno de los componentes identificados en la etapa anterior.

Para la aplicación de las etapas descritas anteriormente se utilizó el paquete estadístico SPSS (versión 13.0), el cual incorpora la función de reducción de datos mediante el análisis de componentes principales, permitiendo además la rotación de los componentes obtenidos mediante el Método de Varimax.

Este mismo software permitió generar correlaciones (mediante el método de regresión lineal múltiple) para los componentes identificados en las muestras de material particulado recolectadas durante la campaña de campo. Esto significa que la herramienta analítica utilizada hizo posible una ejecución integral de las etapas requeridas para obtener tanto las fuentes contribuyentes como la magnitud de sus aportes al problema de contaminación bajo estudio.

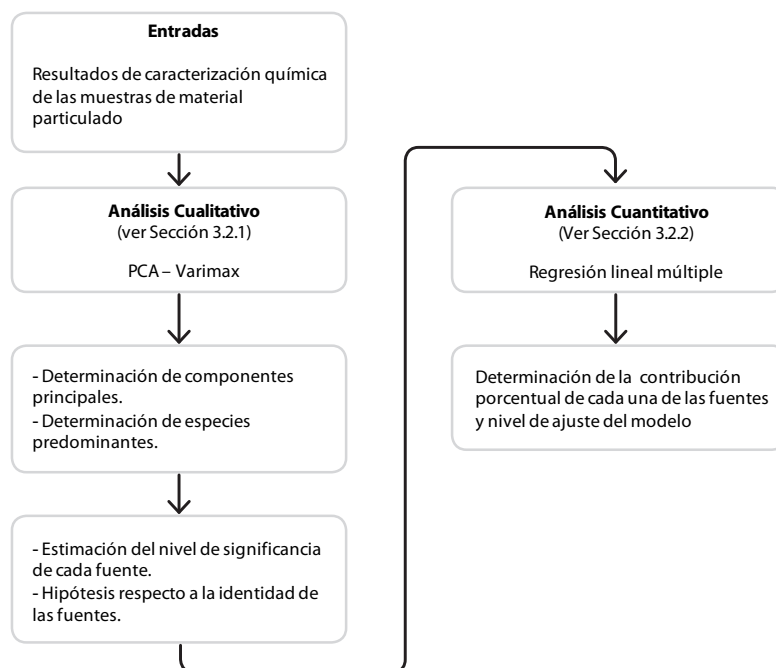


Figura 3.10. Representación esquemática de la metodología empleada para la identificación de fuentes.

3.2.1. Análisis cualitativo - PCA

La ejecución de un análisis de PCA requiere del establecimiento de una serie de preferencias basadas en los criterios que se describen a continuación.

Criterios Descriptivos: Determinan las opciones referentes al cálculo y despliegue de los denominados “estadísticos generales” de los datos (v.g., media y desviación estándar) así como de los parámetros asociados a la matriz de correlación, tales como su determinante, el estadístico Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) y la Prueba de Esfericidad de Bartlett. Estos dos últimos parámetros son indicativos de qué tan apropiados son los datos de cara a un análisis de factores.

Criterios de Extracción: Determinan el método de extracción de los factores, la matriz sobre la que se realiza el análisis, y el criterio de selección de los componentes con base en la magnitud de los valores propios de la matriz de correlación. Respecto a este último criterio, en este trabajo se seleccionaron como representativos aquellos componentes cuyos valores propios fuesen mayores a uno.

Criterios de Rotación: Determinan el tipo de rotación a aplicar para la identificación de los componentes principales y las opciones de despliegue de la solución rotada. Tal y como ha sido mencionado previamente, en este estudio se utilizó la rotación ortogonal Varimax. Este tipo de rotación permite una interpretación efectiva de los componentes identificados dado que reduce el número de variables que presentan una influencia significativa sobre los mismos.

Puntuaciones: Determinan las opciones referentes a las puntuaciones factoriales (o puntuaciones de componentes). Éstas reflejan la significancia de cada muestra dentro de cada componente determinado y constituyen las variables a partir de las cuales se estima la contribución de cada componente identificado. Durante el desarrollo de este estudio la selección efectuada incluyó la opción de despliegue de la matriz de coeficientes de puntuaciones factoriales, el cálculo de las puntuaciones de componentes mediante regresión lineal y la inclusión dentro de la hoja de datos de las puntuaciones de componentes. Estas últimas fueron consideradas como nuevas variables para ser utilizadas en la etapa de regresión multilineal.

Opciones: Determinan las preferencias relacionadas con la exclusión de “valores perdidos” del conjunto de datos (muestras en las que no se cuenta con información de concentración para todas las especies analizadas), organización de los coeficientes obtenidos, y exclusión de valores absolutos de coeficientes menores a 0,1.

Como resultado del análisis ejecutado en esta etapa del proyecto se obtuvieron todos los componentes que permitían “explicar la varianza¹¹” de los datos referentes a las concentraciones de material particulado.

Una vez obtenidos los componentes principales y contando con las puntuaciones de componentes como nuevas variables dentro de la hoja de trabajo, se procedió al cálculo de las puntuaciones absolutas de componentes (AFS por sus siglas en inglés). Para esto se utilizó la metodología descrita por Thurston & Spengler (1985) en donde se incluye una muestra ficticia con concentración cero para todas las especies analizadas y se calculan las puntuaciones de componentes asociadas con dicha muestra. Estas concentraciones corresponden al nivel de referencia (cero real) y la substracción de las mismas de las puntuaciones de componentes obtenidas originalmente (puntuaciones normalizadas) permiten obtener las AFS.

3.2.2. Regresión lineal múltiple

Las AFS obtenidas mediante la metodología antes descrita (que son utilizadas como trazadores de las fuentes que han sido identificadas) se relacionaron con las concentraciones de material particulado mediante una regresión lineal múltiple, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$PM_i = \sum_{j=1}^n a_j \cdot AFS_{ji} + a_0$$

En donde PM_i corresponde a la concentración de material particulado en una muestra i , n representa el número de fuentes (componentes) identificadas, a_j indica el coeficiente hallado mediante la regresión multilíneal correspondiente al componente j , AFS_{ji} corresponde a la puntuación absoluta del componente j para la muestra i y a_0 representa la constante incluida en la correlación multilíneal para los casos en que el ajuste realizado no intercepte el origen.

Para estos propósitos se llevaron a cabo múltiples iteraciones de tal forma que se lograra excluir todas las muestras con desviaciones superiores a tres desviaciones estándar (las cuales fueron catalogadas como “outliers”). Para cada caso y con el fin de determinar la validez de la correlación obtenida, se analizaron los resultados correspondientes al “Factor F” de la regresión Anova así como los estadísticos de co-linealidad resultantes.

La contribución porcentual de la fuente j a la concentración de material particulado en la muestra i (P_{ji}), se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$P_{ji} = \frac{a_j \cdot AFS_{ji}}{PM_i} \cdot 100$$

Finalmente, la contribución de la fuente j a la concentración de material particulado en cada uno de los puntos de medición se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$P_j = \frac{\sum_{i=1}^m P_{ji}}{m}$$

¹¹ La expresión “explicar la varianza” hace referencia a que tan apropiado y acertado es el modelo estadístico seleccionado al momento de predecir el comportamiento y la distribución observada en los datos obtenidos en campo.

4. Resultados - caracterización de material particulado

En este capítulo se presentan los principales resultados de esta etapa del proyecto. En primer lugar se muestran los resultados asociados con las muestras de material particulado (PM₁₀ y PM_{2.5}) y las condiciones meteorológicas que se presentaron durante la campaña de campo. Posteriormente se ilustran los resultados obtenidos para los análisis de iones y especies metálicas presentes en dichas muestras.

4.1. Concentración de material particulado en los puntos de monitoreo

La Figura 4.1 muestra las concentraciones de PM₁₀ encontradas en los sitios de monitoreo (zona industrial, zona de alto tráfico vehicular, y zona residencial). Para la zona industrial se obtuvo un valor medio de 110 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para un rango entre 25 y 240 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Para el caso de la zona con alto tráfico vehicular, las concentraciones de PM₁₀ variaron entre 25 y 110 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ mientras que el promedio fue de 53 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Finalmente, en la zona residencial el rango de concentraciones observado fue entre 7 y 125 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para un valor medio de 54 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

La Figura 4.2 muestra las concentraciones de PM_{2.5} encontradas en dos de los sitios de monitoreo (no se realizaron mediciones de este contaminante en la zona industrial). Para la zona de alto tráfico vehicular se obtuvo un valor medio de 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y un rango de concentraciones entre 12 y 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Para el caso de la zona residencial, las concentraciones de PM_{2.5} variaron entre 2 y 65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ mientras que el promedio fue de 26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

De estos resultados es claro que la zona industrial es la que presenta los más altos niveles de contaminación para la fracción respirable del material particulado. Esto se observa no sólo en sus mayores niveles medios sino también en los valores extremos. Para el caso de la zona residencial y de alto tráfico los valores obtenidos fueron comparables tanto para PM₁₀ como para PM_{2.5}.

En este sentido es necesario resaltar que las mediciones realizadas en este estudio, dados los objetivos del mismo, corresponden a “aire ambiente” y no al nivel de exposición de la población (ver Sección 3.1.2). Este detalle metodológico es el que explica que en la zona de alto tráfico vehicular no se observen niveles de contaminación superiores a aquellos encontrados en la zona residencial, en donde la calidad del aire es el resultado de todas las dinámicas de emisiones y de condiciones meteorológicas de la ciudad.

Tal como fue mencionado en el capítulo que describe la metodología, de forma simultánea a la captura de muestras de material particulado se llevaron a cabo mediciones de condiciones meteorológicas que incluyeron, entre otras, intensidad de precipitación y dirección y velocidad del viento.

A partir de estas mediciones se hizo un intento por correlacionar las variables meteorológicas con las concentraciones observadas de material particulado. De estos análisis se logró concluir que si bien tanto la precipitación como la velocidad del viento explican algunos de los eventos extremos de contaminación (ver figuras 4.3 y 4.4), dichas variables no se correlacionan de forma significativa entre sí. Con la única excepción de las mediciones de PM₁₀ y velocidad de viento en la zona residencial ($r = 0.4$), el Coeficiente de Correlación de Pearson (r) entre niveles de contaminación por material particulado y variables meteorológicas fue inferior a 0.15.

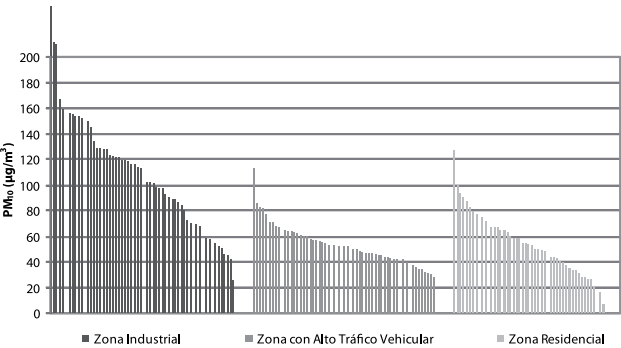


Figura 4.1. Concentraciones de PM₁₀ en los puntos de medición.
(Las mediciones en los distintos puntos de monitoreo no fueron realizadas de forma simultánea)

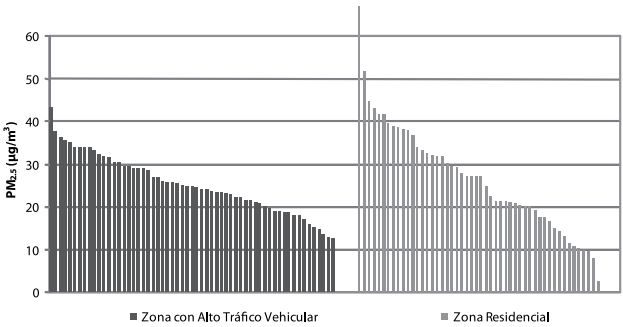


Figura 4.2. Concentraciones de PM_{2.5} en los puntos de medición.
(Las mediciones en los distintos puntos de monitoreo no fueron realizadas de forma simultánea)

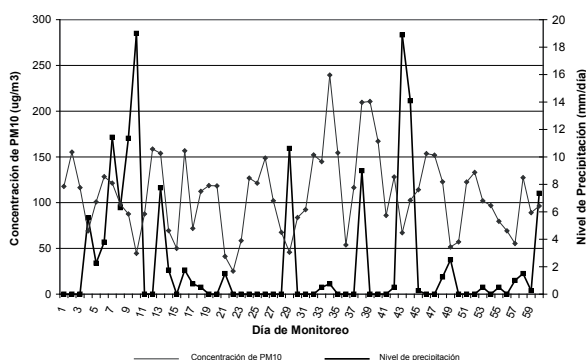


Figura 4.3. Concentraciones de PM₁₀ y niveles de precipitación en el punto de monitoreo localizado en la zona industrial.

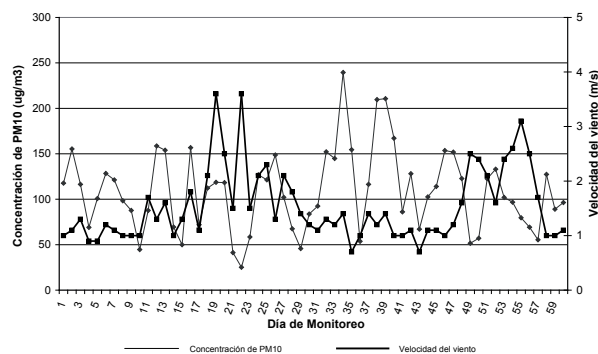


Figura 4.4. Concentraciones de PM₁₀ y velocidad del viento en el punto de monitoreo localizado en la zona industrial.

Finalmente, la Figura 4.5 muestra la proporción, caso a caso, entre las concentraciones de PM₁₀ y PM_{2.5} para los puntos de medición considerados en la fase de campo. Estos resultados demuestran una gran estabilidad tanto en la zona residencial ($49 \pm 8\%$) como en la zona con alto tráfico vehicular ($48 \pm 7\%$)¹² y permiten concluir que cuando se hace referencia a aire ambiente en las condiciones de Bogotá, la fracción fina del material particulado representa aproximadamente el 50% de la fracción respirable.

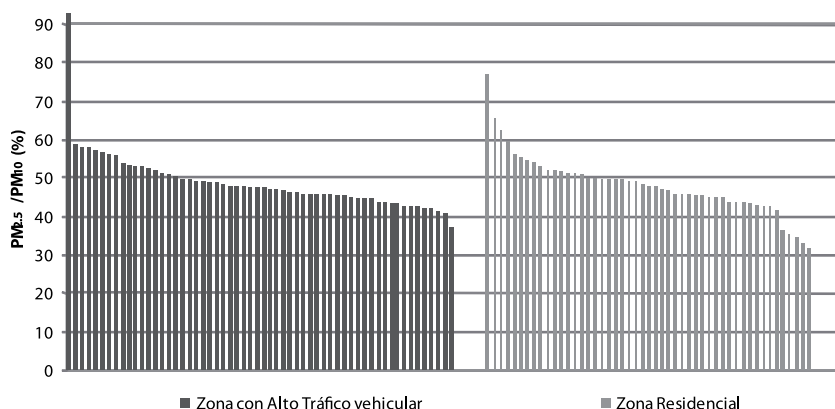


Figura 4.5. Razón PM_{2.5}/PM₁₀ en los sitios de monitoreo.

Los resultados presentados en las figuras anteriores muestran que las concentraciones medias de material particulado que se encuentran en la zona industrial corresponden al doble de aquellas que se pueden encontrar en otras zonas de la ciudad. Esto, tal y como ha sido discutido en otros apartes de este documento, es consecuencia no sólo de las emisiones (provenientes de fuentes vehiculares e industriales) que ocurren en esta parte de la ciudad sino también de las dinámicas meteorológicas que se observan al interior del perímetro urbano, especialmente en lo que se refiere a la dirección del viento.

¹² Estos valores hacen referencia a la media y la desviación estándar.

El 75% de los datos diarios de PM₁₀ en la zona industrial superaron la norma anual de calidad del aire establecida por la Resolución 601 de 2006 del MAVDT (70 ug/m³). De forma similar, el 20% de los datos diarios para esta misma zona violaron la norma diaria que hace parte de la misma resolución (150 ug/m³). Para el caso de las zonas de alto tráfico vehicular y de uso residencial, la excedencia de la norma anual fue del 12% y 24%, respectivamente. En ninguna de estas dos zonas se presentaron excedencias al valor de referencia para la norma diaria.

Dentro de las concentraciones registradas, las correspondientes a los días sábado y domingo presentaron valores menores a las reportadas para los días hábiles. En particular, para el punto ubicado en la zona industrial, las concentraciones medias del fin de semana correspondieron a un valor entre el 50% y el 70% de las concentraciones registradas en días laborales. Para el punto ubicado en la zona con alto tráfico vehicular, las concentraciones de PM₁₀ constituyeron entre el 90% y el 95% de los valores registrados durante los días hábiles de la semana correspondiente. En el punto de muestreo ubicado en la zona residencial, las concentraciones para los días sábado y domingo correspondieron entre el 30% y el 50% de los valores registrados en días laborales.

Estos resultados demuestran la importancia diferencial de las fuentes causantes del problema de contaminación en los diferentes puntos de la ciudad. Por ejemplo, a pesar de los cambios en las dinámicas de la ciudad durante un fin de semana, las concentraciones de PM₁₀ en la zona con alto tráfico vehicular siguen siendo muy similares a aquellas encontradas en días laborales. Al mismo tiempo, el caso contrario fue documentado para la zona residencial.

4.2. Contenido de iones en el material particulado de Bogotá

En esta sección se presentan los principales resultados concernientes al contenido de iones con carga positiva y negativa en los filtros recolectados (muestras de PM₁₀ y PM_{2.5}) durante la campaña de campo.

En la Figura 4.6 se ilustran cromatogramas típicos obtenidos durante la fase analítica del estudio para muestras de PM₁₀. La Tabla 4.1 resume los resultados de concentración media de iones en las muestras de material particulado para cada uno de los puntos de medición.

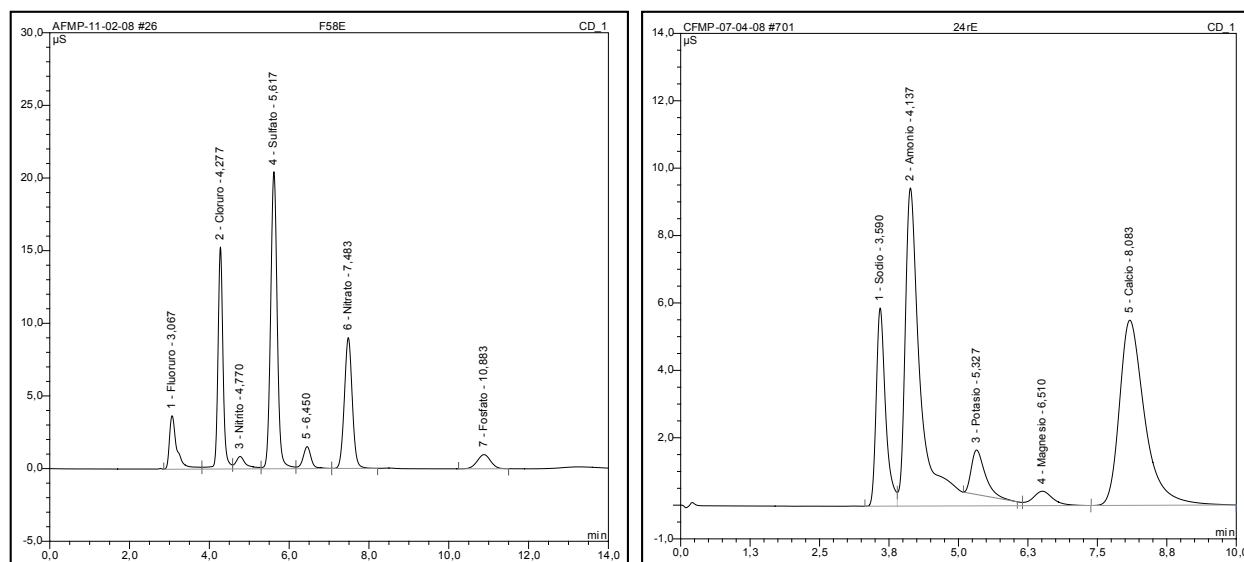


Figura 4.6. Cromatogramas típicos para muestras de PM₁₀: a) Resultados para aniones; b) Resultados para cationes.

Tabla 4.1. Contenido de iones (ug/m³) en el material particulado de Bogotá.

Ion	Zona industrial (PM ₁₀)	Zona con alto tráfico vehicular		Zona residencial	
		PM ₁₀	PM _{2.5}	PM ₁₀	PM _{2.5}
Fluoruro (F ⁻)	0.03	5E-3	<LD	0.01	9E-3
Cloruro (Cl ⁻)	0.66	0.11	9E-3	0.35	0.26
Nitrito (NO ₂ ⁻)	0.01	9E-3	9E-5	1E-3	4E-4
Sulfato (SO ₄ ⁼)	1.78	0.92	0.53	1.64	1.32
Bromuro (Br ⁻)	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Nitrato (NO ₃ ⁻)	1.07	0.73	0.28	1.50	1.25
Fosfato (PO ₄ ⁼)	0.09	0.03	0.01	0.06	0.06
Litio (Li ⁺)	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Sodio (Na ⁺)	0.07	0.03	0.01	0.07	0.04
Amonio (NH ₄ ⁺)	0.23	0.15	0.15	0.45	0.44
Potasio (K ⁺)	0.11	0.06	0.04	0.11	0.10
Magnesio (Mg ⁺⁺)	0.02	0.01	5E-3	0.02	3E-3
Calcio (Ca ⁺)	0.48	0.25	0.02	0.28	0.03

LD = Límite de detección de la técnica analítica empleada.

Estos resultados indican que para un elevado número de especies evaluadas, el contenido de iones y cationes es mayor en la zona industrial de la ciudad que en otras zonas de la misma. Este fue el caso para fluoruro, cloruro, nitrito, sulfato, fosfato, y calcio. En ninguno de los filtros recolectados se registró la presencia de bromuro o litio en niveles superiores al límite de detección de las técnicas analíticas utilizadas.

En el caso del PM₁₀, el anión con mayor abundancia (en las tres zonas de la ciudad) es el sulfato, seguido por el nitrato y el cloruro. Las mayores concentraciones para los iones sulfato y cloruro se presentaron en el punto de medición ubicado en la zona industrial, mientras que el mayor nivel de nitrato se registró en los filtros recolectados en la zona residencial.

Para la fracción fina del material particulado en la zona residencial, el anión con mayor abundancia correspondió al sulfato, seguido por el nitrato y cloruro. Para las muestras de esta misma fracción obtenidas en el punto de monitoreo ubicado en la zona con alto tráfico vehicular, la concentración de aniones siguió el orden sulfato, nitrato, fosfato.

Es interesante notar que para ninguna de las especies evaluadas se logró determinar que la zona de alto tráfico vehicular se encontrara asociada con los mayores contenidos de iones en las muestras de material particulado. Al mismo tiempo, fueron varios los casos (amonio y nitrato) en los que las muestras provenientes de la zona residencial mostraron los más altos contenidos de iones.

Estos resultados tienen dos implicaciones. En primer lugar, representan evidencia adicional de la forma en que la contaminación percibida en un lugar de la ciudad es consecuencia de lo que ocurre en zonas aledañas. En segundo lugar, demuestran que el conocimiento de las concentraciones de material particulado no es suficiente para entender el problema de contaminación. Esto último se debe a que la peligrosidad de dicho contaminante (asociada con el tipo de materiales que transporta en sus superficies) puede ser sustancialmente diferente en diversas zonas de la ciudad.

En la Figura 4.7 se presentan los contenidos porcentuales para los iones más comunes en las muestras de PM₁₀ y PM_{2.5}. La Figura 4.8 hace lo propio para el caso de cationes.

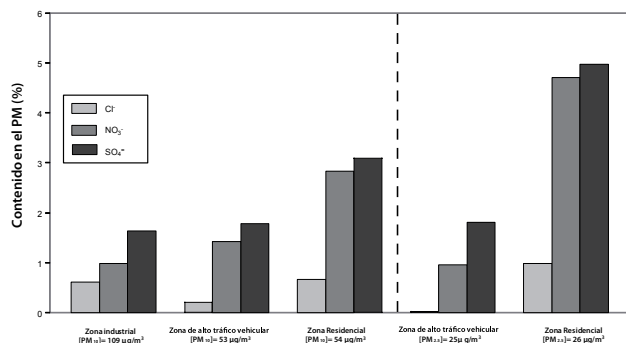


Figura 4.7. Contenido porcentual de aniones en el material particulado de Bogotá.

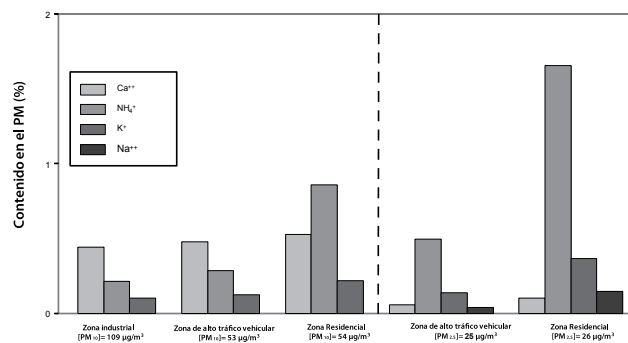


Figura 4.8. Contenido porcentual de cationes en el material particulado de Bogotá.

A partir de estos resultados es posible señalar que, de manera individual, los aniones con mayor abundancia en el PM₁₀ representan porcentajes entre el 0.2 y el 3% del material particulado recolectado. Para el caso del sulfato, el cual corresponde a la especie iónica de mayor importancia (en términos de su aporte a la masa del material particulado recolectado) se observa que tanto para la zona industrial como para la zona con alto tráfico vehicular, representa cerca del 1.5% del material particulado. Para el caso de la zona residencial, esta misma especie corresponde a un porcentaje cercano al 3% del material particulado.

En términos generales, los siete aniones analizados constituyen en promedio el 3.3% del PM₁₀ recolectado en la zona industrial, el 3.4% del material particulado presente en la zona con alto tráfico vehicular, y el 6.7% de esta fracción de material particulado presente en la zona residencial.

De acuerdo con los resultados anteriores, la zona con características industriales presenta un contenido de aniones comparable al registrado para la zona influenciada por el tráfico vehicular. En el caso de la zona residencial, los aniones constituyen una fracción de mayor importancia dentro del material particulado, duplicando lo registrado en las otras dos zonas de la ciudad.

Para el caso de la fracción fina del material particulado, los aniones con mayor abundancia representan individualmente porcentajes entre el 0.3 y el 5% del total de esta fracción (ver Figura 4.7). Los siete aniones cuantificados constituyen alrededor del 3% del PM_{2.5} para el caso de la zona con alto tráfico vehicular mientras que representan cerca del 11% del PM_{2.5} presente en la zona residencial.

Para el PM_{2.5}, la relación entre el porcentaje que constituyen los aniones en las muestras provenientes de la zona residencial y el registrado para las muestras recolectadas en la zona con alto tráfico vehicular es de alrededor de 4:1. Estos valores refuerzan el argumento de la importancia que tienen los aniones como constituyentes del material particulado presente en la zona de tipo residencial.

Para el caso de los cationes (ver Figura 4.8), estas especies constituyen de manera individual contenidos entre el 0.2% y el 0.8% del PM₁₀ hallado en los distintos puntos de monitoreo. El contenido de calcio es similar en todas las zonas mientras que el amonio presente en el PM₁₀ de la zona residencial es significativamente más alto al valor hallado en las muestras recolectadas en las otras dos zonas.

En términos generales, las concentraciones reportadas para los seis cationes analizados constituyen en promedio el 0.8%, 1% y 1.8% del PM₁₀ de las zona industrial, de alto tráfico vehicular y residencial, respectivamente. Estos porcentajes resultan inferiores a los correspondientes a los iones provistos de cargas negativas.

En lo referente al contenido de cationes en la fracción fina del material particulado (ver Figura 4.8) se logró identificar que dichas especies representan de forma individual entre el 0.1% y el 1.7% de dicho material. Los seis cationes analizados representan el 0.8% del PM2.5 en la zona con alto tráfico vehicular y el 2.3% del PM2.5 presente en la zona residencial.

Las figuras 4.9 y 4.10 muestran la forma en la que las especies iónicas que resultaron ser más abundantes en la ciudad de Bogotá se distribuyen en las diferentes fracciones del material particulado.

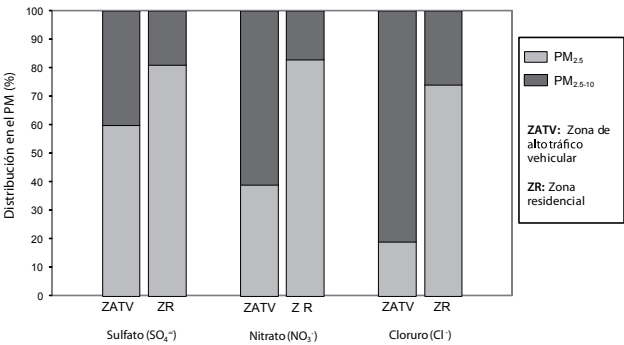


Figura 4.9. Distribución de aniones en las fracciones de material particulado en Bogotá.

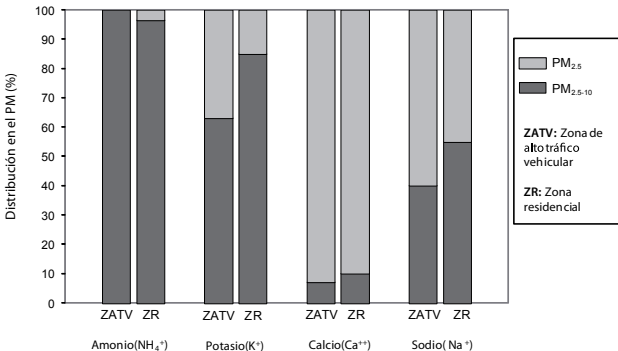


Figura 4.10. Distribución de cationes en las fracciones de material particulado en Bogotá.

Estos resultados muestran que los iones sulfato, amonio y potasio tienden a concentrarse en la fracción fina mientras que el calcio lo hace en la fracción gruesa. El sodio tiende a distribuirse de forma relativamente uniforme entre las dos fracciones en referencia mientras que la distribución de nitrato y el cloruro dependen de la zona de donde provengan las muestras de material particulado.

Finalmente, la Tabla 4.2 resume la composición porcentual del material particulado que puede ser atribuida a especies iónicas. Esta información será complementada con los resultados del contenido de metales que se discuten en el siguiente capítulo.

Tabla 4.2. Composición del material particulado (%) atribuible a especies iónicas en Bogota.

Especie	Zona industrial (PM ₁₀)	Zona con alto tráfico vehicular		Zona residencial	
		PM ₁₀	PM _{2.5}	PM ₁₀	PM _{2.5}
Aniones	3.5	3.5	3	7	11
Cationes	1	1	1	2	2.5
Total	4.5	4.5	4	9	13.5

4.3. Contenido de metales en el material particulado de Bogotá

La Tabla 4.3 resume los resultados obtenidos para el contenido de metales en muestras de PM₁₀ y PM_{2.5} recolectadas en las tres zonas de la ciudad que fueron objeto de este estudio (zona residencial, zona con alto tráfico vehicular, y zona industrial). Las figuras 4.11 y 4.12 muestran la misma información de manera gráfica.

En lo referente a PM₁₀, la zona industrial registró las mayores concentraciones para 11 de los 23 metales analizados. Estos correspondieron a aluminio, bario, calcio, hierro, galio, potasio, magnesio, manganeso, níquel, plomo y zinc. De este conjunto de especies se destacan los elevados valores encontrados para calcio, aluminio y hierro.

La zona residencial presentó los mayores niveles para 7 de los metales cuantificados en las muestras de PM₁₀ (bismuto, cadmio, cobalto, cobre, litio, sodio y estroncio). El punto de monitoreo ubicado en la zona con alto tráfico vehicular registró las mayores concentraciones para dos de los metales analizados (boro y cromo). Los análisis para plata, indio y talio en los filtros recolectados no mostraron resultados ajustados a los parámetros de validación establecidos para el método de determinación y por lo mismo no fueron tenidos en cuenta durante la etapa de análisis.

En la zona caracterizada por su actividad industrial el mayor nivel dentro de las especies metálicas en las muestra de PM₁₀ se registró para el calcio mientras que en las zonas de alto tráfico vehicular y de tipo residencial el metal más abundante fue el sodio, seguido por el potasio, hierro y cadmio.

Tabla 4.3. Contenido de metales (ug/m³) en el material particulado de Bogotá.

Metal	Zona industrial (PM ₁₀)	Zona con alto tráfico vehicular		Zona residencial	
		PM ₁₀	PM _{2.5}	PM ₁₀	PM _{2.5}
Aluminio (Al)	2.58	0.77	0.06	0.70	0.07
Boro (B)	6E-3	0.01	0.01	----- ^(a)	-----
Bario (Ba)	0.05	0.04	<LD	0.04	6E-3
Bismuto (Bi)	3E-4	<LD	<LD	2E-3	2E-3
Calcio (Ca)	3.52	0.93	0.11	0.80	0.14
Cadmio (Cd)	<LD	<LD	<LD	1E-3	7E-4
Cobalto (Co)	<LD	<LD	<LD	1E-4	2E-5
Cromo (Cr)	0.02	0.07	4E-4	0.01	2E-3
Cobre (Cu)	0.02	0.04	0.01	0.09	0.02
Hierro (Fe)	1.93	0.77	0.06	0.73	0.08
Galio (Ga)	0.02	1E-3	8E-5	4E-3	1E-3
Potasio (K)	0.61	0.22	0.08	0.32	0.177
Litio (Li)	<LD	<LD	<LD	6E-3	1E-4
Magnesio (Mg)	0.34	0.12	0.05	0.09	0.03
Manganeso (Mn)	0.03	4E-3	7E-4	0.01	5E-3
Sodio (Na)	0.93	0.94	0.58	1.52	0.67
Níquel (Ni)	0.04	0.02	0.02	1E-3	6E-4
Plomo (Pb)	0.67	0.04	0.02	0.30	0.12
Estroncio (Sr)	<LD	<LD	<LD	5E-3	1E-3
Zinc (Zn)	0.26	0.02	<LD	0.15	0.08

^(a) Valor no ajustado a los parámetros de calidad del método de análisis empleado. LD = límite de detección.

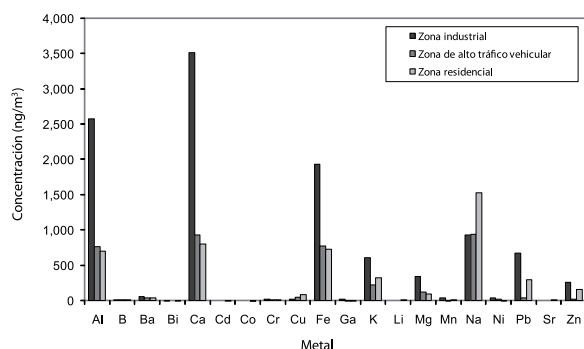


Figura 4.11. Contenido de metales en muestras de PM₁₀ en Bogotá.

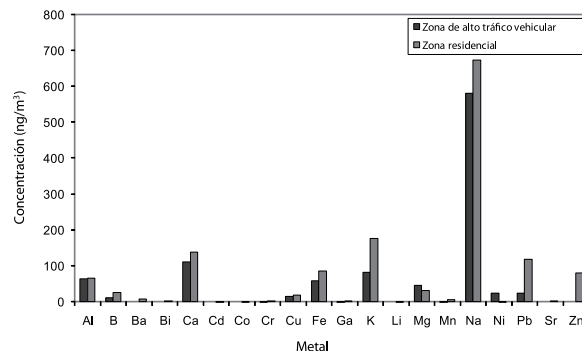


Figura 4.12. Contenido de metales en muestras de PM_{2.5} en Bogotá.

Las figuras 4.13 y 4.14 muestran el contenido porcentual de metales en las muestras de PM₁₀ y PM_{2.5} recolectadas en los distintos sitios de monitoreo al interior del perímetro urbano de Bogotá.

De acuerdo a estos resultados, la contribución individual de cada metal a la masa de PM₁₀ en Bogotá se encuentra en el rango entre 0.0003% y 3.2%. Los metales analizados representan el 7.5, 8.9, y 10.1% de las concentraciones de PM₁₀ registradas en las zonas de alto tráfico vehicular, de tipo residencial y de tipo industrial, respectivamente. En términos del PM_{2.5}, los resultados en referencia indican que los metales analizados constituyen de manera individual porcentajes entre el 6.7E-5 y el 2.5 % del total de la masa de esta fracción de material particulado. De forma global, las especies metálicas analizadas representan el 5.4% del PM_{2.5} recolectado en la zona residencial y el 4% del PM_{2.5} recolectado en la zona de alto tráfico vehicular.

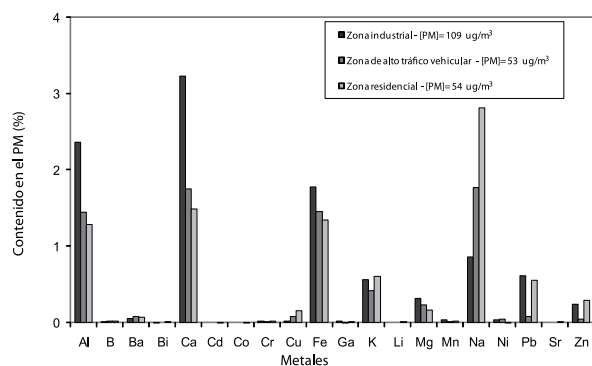


Figura 4.13. Contenido porcentual de especies metálicas en la fracción respirable del material particulado de Bogotá.

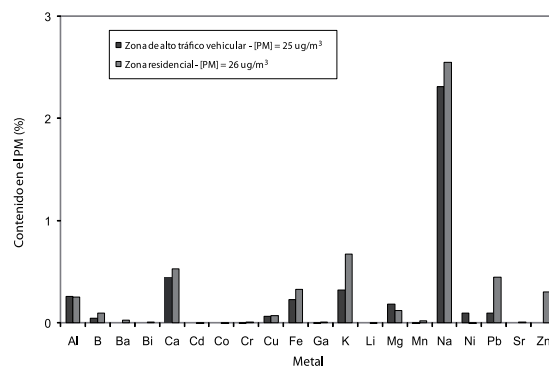


Figura 4.14. Contenido porcentual de especies metálicas en la fracción fina del material particulado de Bogotá.

Finalmente, la Tabla 4.4 muestra la distribución de los metales en las fracciones de material particulado capturadas en los puntos de medición. Estos resultados permiten establecer que varios de los metales de mayor interés (e.d., aquellos más abundantes en el material particulado de la ciudad – calcio, aluminio, hierro) se concentran de forma mayoritaria en la fracción gruesa de dicho contaminante.

El sodio y el potasio, metales para los que se logró documentar su importancia en términos de su contribución a la masa total de PM_{2.5} (ver Figura 4.12), tienden a concentrarse de forma algo más uniforme al interior de las distintas fracciones del material particulado (ver Tabla 4.4).

Tabla 4.4. Distribución de especies metálicas (%) en las fracciones de material particulado en Bogotá.

Metal	Zona con alto tráfico vehicular		Zona residencial	
	PM _{2.5-10}	PM _{2.5}	PM _{2.5-10}	PM _{2.5}
Aluminio (Al)	91.6	8.4	90.5	9.5
Boro (B)	5.6	94.4	-----	-----
Bario (Ba)	100	0	82.9	17.1
Bismuto (Bi)	-----	-----	9.3	90.7
Calcio (Ca)	88.0	12.0	82.8	17.2
Cadmio (Cd)	-----	-----	31.1	68.9
Cobalto (Co)	-----	-----	89.2	10.4
Cromo (Cr)	93.6	6.4	81.0	19.0
Cobre (Cu)	64.8	35.2	78.8	21.2
Hierro (Fe)	92.5	7.5	88.2	11.8
Galio (Ga)	94.5	5.5	60.0	40.0
Potasio (K)	63.7	36.3	45.5	54.5
Litio (Li)	-----	-----	98.4	1.6
Magnesio (Mg)	62.7	37.3	65.3	34.7
Manganeso (Mn)	84.4	15.6	52.0	48.0
Sodio (Na)	38.2	61.8	55.9	44.1
Níquel (Ni)	0	100	55.3	44.7
Plomo (Pb)	41.0	59.0	60.5	39.5
Estroncio (Sr)	-----	-----	77.0	23.0
Zinc (Zn)	100	0	48.6	51.4

4.4. Aporte de las especies iónicas y metálicas a la masa de material particulado

La Tabla 4.5 resume los resultados encontrados para el aporte de especies iónicas y metálicas a la masa total del material particulado de la ciudad de Bogotá en sus fracciones fina y respirable. En dicha tabla se excluyen los cationes diferentes al amonio (ver Tabla 4.2) teniendo en cuenta que éstos se encuentran incluidos dentro de las especies metálicas analizadas mediante la técnica de ICP-OES.

En este sentido es más apropiado utilizar los resultados obtenidos por la técnica antes mencionada dado que a través de la misma se logra la cuantificación total del metal. Esto contrasta con los resultados obtenidos por medio de cromatografía iónica (la técnica utilizada para la cuantificación de especies iónicas – ver Sección 3.1.3) en donde tan sólo se busca identificar las especies que se encuentran en forma iónica (en este caso cationes).

Tabla 4.5. Contribución de las especies iónicas y metálicas (%) a la masa del material particulado en Bogotá.

Especie	Zona industrial (PM ₁₀)	Zona con alto tráfico vehicular		Zona residencial	
		PM ₁₀	PM _{2.5}	PM ₁₀	PM _{2.5}
Aniones	3.5	3.5	3	7	11
Amonio	0.2	0.3	0.5	1	1.5
Metales	10	7.5	4	9	5.5
Total	14	11	7.5	17	18

Estos resultados muestran que las especies determinadas durante este estudio permiten explicar la composición del material particulado en porcentajes entre el 11 y el 16.5% para el caso del PM₁₀ así como entre el 7.5 y el 18% para el caso de PM_{2.5}.

El contenido de metales en las muestras de PM₁₀ provenientes de la zona residencial resultó mayor al encontrado en la zona con alto tráfico vehicular. Esto es, en primera instancia, algo sorpresivo dado que para este último lugar los niveles de contaminación se ven afectados de forma significativa por emisiones vehiculares que suelen caracterizarse por elevados contenidos de potasio, calcio, hierro y plomo (Hopke, 1985; Artaxo et al., 1999).

Los que estos resultados sugieren es que la zona residencial de la ciudad, a pesar de no estar caracterizada por elevadas emisiones de tipo industrial o vehicular, se está viendo afectada por emisiones ocurridas en otras zonas y que debido a fenómenos de transporte en la atmósfera terminan generando los valores anteriormente referenciados.

Razones similares pueden ser utilizadas para explicar el elevado contenido de aniones en la zona residencial, los cuales fueron incluso superiores a los encontrados en la zona industrial de la ciudad. En este caso, estos resultados pueden deberse a formación secundaria de material particulado la cual es, en términos relativos¹³, más importante para aquellas zonas que se encuentran alejadas de las principales fuentes de emisión.

Zacarias et al. (2008) reportó el contenido de aniones presente en material particulado recolectado en las ciudades de Sao Paulo (Brasil), Santiago de Chile y Bogotá. Para el caso de Bogotá, hizo uso de filtros correspondientes a la misma campaña de campo a la que hace referencia el proyecto objeto de este documento. Según los resultados presentados, los iones cargados negativamente constituyen, en promedio, el 4%, 20%, y 25% de la masa total de material particulado para las ciudades de Bogotá, Sao Paulo y Santiago de Chile, respectivamente.

Nótese que el valor reportado para Bogotá en el estudio antes mencionado es consistente con el que fue encontrado por el CIIA haciendo uso de una técnica analítica totalmente diferente (ver Tabla 4.5). Dicha consistencia es entonces una forma de validar y asegurar la calidad y representatividad de los datos encontrados en este estudio.

Del mismo modo, al comparar los resultados obtenidos para Bogotá y las otras dos ciudades latinoamericanas es posible observar que para iones tales como sulfato y nitrato, Bogotá exhibe valores sustancialmente inferiores. Al igual que en el caso recientemente discutido, estas diferencias pueden parecer sorpresivas en primera instancia.

Sin embargo, tal y como se encuentra documentado en detalle en la Parte 2-A del reporte final de este mismo estudio (Inventario de Emisiones Provenientes de Fuentes Fijas), el sector industrial de Bogotá utiliza gas natural de forma masiva y en proporciones bastante más importantes que en las otras dos ciudades. En particular, existe una gran diferencia con Santiago de Chile en donde la industria depende del carbón para sus procesos productivos.

De esta forma, el relativamente bajo contenido de iones en las muestras de material particulado de Bogotá no sólo es perfectamente plausible sino que además demuestra la importancia de llevar a cabo este tipo de estudios in-situ. Este tipo de trabajos permiten caracterizar las condiciones reales de la ciudad, las cuales son imposibles de replicar a partir de metodologías teóricas o basadas en datos obtenidos en lugares diferentes.

Finalmente, a pesar de que en ninguno de los lugares de medición se logró superar la barrera del 20% en lo que se refiere a los componentes que explican la masa total del material particulado (ver Tabla 4.5), dichos resultados son suficientes¹⁴ para la aplicación del modelo de receptores que permite la identificación de las fuentes responsables del problema de contaminación (Chan et al., 1997; Andrews et al., 2000; Harrison et al., 2003; Tsyro, 2005).

¹³ La cercanía a fuentes primarias de emisión se encuentra relacionada no sólo con mayores concentraciones de material particulado sino con un mayor aporte directo a dichas concentraciones por parte de las fuentes en referencia.

¹⁴ Es logística y presupuestalmente muy complejo lograr que en un sólo estudio se logren caracterizaciones que permitan el conocimiento de todos los componentes que hacen parte del material particulado. Para el caso de los resultados reportados en este trabajo el escenario ideal hubiese sido haber incluido determinaciones de carbón elemental de tal forma que se hubiese logrado documentar una mayor fracción de la masa de las muestras de material particulado analizadas.

5. Resultados - ejecución del modelo de receptores

En este capítulo se presentan de forma detallada los resultados relacionados con la ejecución del modelo de receptores. Dichos resultados hacen referencia a cinco corridas diferentes asociadas cada una de ellas a la forma en que los datos de campo fueron recolectados durante la etapa de caracterización del material particulado (ver Sección 3.1.2).

- Corrida 1 – PM₁₀ en la zona industrial.
- Corrida 2 – PM₁₀ en la zona de alto tráfico vehicular.
- Corrida 3 – PM_{2.5} en la zona de alto tráfico vehicular.
- Corrida 4 – PM₁₀ en la zona residencial.
- Corrida 5 – PM_{2.5} en la zona residencial.

En cada uno de estos casos los resultados se presentan para las siguientes consideraciones:

- a) Especies incluidas en el análisis.
- b) Número de componentes retenidos (fuentes identificadas) y varianza de los datos originales que es explicada por medio de los componentes retenidos.
- c) Cargas de cada especie analizada en los componentes retenidos después de aplicada la rotación tipo Varimax.
- d) Hipótesis sobre el tipo de fuente representada por cada factor identificado.
- e) Coeficientes obtenidos en la regresión lineal múltiple y grado de ajuste del modelo.
- f) Ecuación característica para el conjunto de muestras.
- g) Contribución promedio de cada fuente identificada a la concentración promedio de material particulado registrada en el punto de medición que es objeto de los análisis.

5.1. PM₁₀ en la zona industrial (corrida 1)

a) Especies incluidas

Para esta corrida se incluyeron resultados de 60 muestras de material particulado referentes a los contenidos de 19 especies químicas correspondientes a 14 elementos metálicos (Al, Ba, Ca, Cr, Cu, Fe, Ga, K, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, Zn) y 5 especies iónicas (F⁻, Cl⁻, SO₄⁼, NO₃⁻, NH₄⁺).

Para este conjunto de datos se obtuvieron los siguientes estadísticos:

- Parámetro de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) = 0.76.
- Prueba de esfericidad de Bartlett (nivel de significancia) = 3.3E-296.
- Parámetro de comunalidades = 0.65 - 0.97.

Para el caso del KMO, valores superiores a 0.7 (valor heurístico) sugieren que el conjunto de datos es adecuado para llevar a cabo un extracción haciendo uso de un análisis por componentes principales¹⁵. La Prueba de Bartlett hace referencia al nivel de significancia e indica si las variables están correlacionadas entre sí y por lo mismo si es posible agruparlas en factores comunes que sean descriptivos de las mismas. El parámetro de comunalidades representa el porcentaje de varianza de una variable dada que es explicado por los factores extraídos durante el análisis. En términos generales, comunalidades superiores a 0.5 se consideran adecuadas (Meyers et al., 2006).

b) Componentes retenidos y varianza explicada por los mismos

La Figura 5.1 presenta los valores propios de los componentes extraídos mediante el análisis PCA así como la varianza explicada por cada uno de ellos. En este caso, se identificaron cuatro valores propios cuya dimensión fue superior a la unidad y para los cuales se explica cerca del 83% de la varianza total. Esto significa que para el caso en referencia se cuenta con cuatro fuentes que generan un aporte significativo a la masa de material particulado (componentes retenidos).

¹⁵ Algunos autores consideran aceptables valores superiores a 0.5 (Dunteman G, 1989; Meyers et al., 2006; Garson, 2008).

c) Matriz rotada de cargas

La Figura 5.2 corresponde a la matriz rotada de cargas para los componentes retenidos. Dichas cargas permiten evaluar las variables predominantes en cada factor extraído, suministrando de esta forma herramientas para establecer la identidad de la fuente o fuentes representadas por cada componente.

En términos generales se considera que variables con carga superior a 0.7 son representativas de la identidad del componente bajo análisis¹⁶ y por lo tanto resultan útiles para la identificación del mismo (Duntelman G, 1989; Meyers et al., 2006).

d) Hipótesis sobre el tipo de fuentes representadas

De acuerdo a la matriz de componentes rotados encontrada, los elementos predominantes en cada factor extraído presentan identidades diferentes que pueden ser consideradas como trazadores de fuentes de emisión. Estos elementos permiten entonces plantear hipótesis sobre la identidad de dichas fuentes con base en perfiles de fuente que se encuentren reportados en la literatura científica. Del mismo modo, se puede hacer uso de los perfiles de fuente que han sido compilados por la EPA en la herramienta conocida como SPECIATE 4.0.

El primer componente identificado en este estudio para la zona industrial presentó cargas elevadas para materiales considerados de origen natural tales como Fe, Al, Mg, Mn, Ca, K, Sr y Na. Estos a su vez se encuentran asociados fundamentalmente a partículas de suelo o polvo resuspendido (Hopke, 1985, Artaxo et al., 1999; Ho et al., 2006). De esta forma, es posible considerar que la fuente relacionada con este primer componente tiene que ver con la contribución realizada por el material originado por la resuspensión de partículas de polvo proveniente de las vías sin pavimentar.

Adicionalmente, para este mismo componente se observaron cargas moderadas para especies tales como el cromo y zinc, las cuales han sido asociadas en estudios previos con las emisiones provenientes de la actividad vehicular (Ho et al., 2006).

De esta manera, la primera fuente aportante a los niveles de material particulado en el punto en referencia y a través de la cual se explica cerca del 45% de la varianza total de los datos, puede identificarse como polvo resuspendido proveniente de vías sin pavimentar enriquecido por elementos propios de la actividad vehicular.

Total Variance Explained									
Component	Initial Eigenvalues			Extraction Sums of Squared Loadings			Rotation Sums of Squared Loadings		
	Total	% of Variance	Cumulative %	Total	% of Variance	Cumulative %	Total	% of Variance	Cumulative %
1	9,157	45,787	45,787	9,157	45,787	45,787	9,023	45,116	45,116
2	4,478	22,388	68,174	4,478	22,388	68,174	4,165	20,826	65,941
3	1,872	9,359	77,534	1,872	9,359	77,534	1,857	9,286	75,228
4	1,047	5,236	82,769	1,047	5,236	82,769	1,508	7,542	82,769
5	,775	3,874	86,643						
6	,692	3,459	90,102						
7	,503	2,514	92,615						
8	,423	2,114	94,729						
9	,290	1,448	96,177						
10	,232	1,160	97,337						
11	,188	,940	98,277						
12	,137	,685	98,962						
13	,088	,441	99,403						
14	,047	,234	99,637						
15	,038	,189	99,826						
16	,016	,081	99,907						
17	,010	,048	99,955						
18	,005	,023	99,978						
19	,003	,013	99,991						
20	,002	,009	100,000						

Extraction Method: Principal Component Analysis.

Figura 5.1. Varianza explicada por los componentes extraídos mediante PCA para los datos correspondientes a la zona industrial.
(Esta imagen corresponde a la visión de la pantalla de un equipo de computación en el que se hace uso de la herramienta SPSS para ejecutar el análisis por PCA).

¹⁶ Bajo ciertas condiciones es posible considerar variables con cargas entre 0.4 y 0.7. En estos casos, dichas variables representan un grado de influencia moderado pero de todas formas pueden resultar relevantes en la interpretación de los resultados (Meyers et al., 2006; Garson, 2008).

Rotated Component Matrix ^a

	Component			
	1	2	3	4
Fe	,977			
Al	,966			
Mg	,956			-,125
K	,954		,147	
Ca	,915		,110	
Mn	,900	-,109		,261
Ga	,881	-,121	,201	,268
Ba	,872	,303	-,110	
PM	,868	,241		
Na	,796		-,108	-,107
SO4		,929		
NO3	-,124	,882	-,292	
NH4	-,321	,859	-,209	
Cl	,147	,812		,186
Zn	,397	,641	,152	,294
F	,386	,566	-,422	
Ni		-,282	,871	
Cr	,518		,779	
Pb				,878
Cu	-,139	,334	,186	,628

Extraction Method: Principal Component Analysis.

Rotation Method: Varimax with Kaiser Normalization.

a. Rotation converged in 6 iterations.

Figura 5.1. Matriz rotada de componentes retenidos para datos de la zona industrial.

(Esta imagen corresponde a la visión de la pantalla de un equipo de computación en el que se hace uso de la herramienta SPSS para ejecutar el análisis por PCA).

El segundo componente identificado presentó cargas elevadas para nitrato, sulfato, amonio, cloruro y zinc. Las primeras tres de estas especies suelen corresponder a aerosoles secundarios formados a partir de la reacción de gases emitidos como resultado de procesos de combustión. Esto significa que tales especies se pueden relacionar con emisiones provenientes de fuentes vehiculares e industriales.

El cloruro y el zinc suelen presentar altas correlaciones tanto entre sí como con las diversas especies de formación secundaria en la atmósfera. De esta forma, es factible suponer que todas estas especies provienen de una misma fuente de emisión.

Adicionalmente, el cloruro es considerado como un trazador de emisiones de vehículos diésel mientras que el zinc es referenciado como trazador de partículas de llantas de vehículos que son desprendidas a causa de la abrasión resultante de su operación (Hopke, 1985; Ho et al., 2006; Mazzei et al., 2006). Asimismo, los perfiles 3156 y 34003C reportados en la herramienta SPECIATE 4.0 (correspondientes a partículas de llantas) consideran como elementos constitutivos de este tipo de partículas al cloruro y zinc.

En resumen, la fuente en referencia al segundo componente, la cual explica el 20% de la varianza de los datos, puede considerarse como representativa de la actividad vehicular tanto para automotores de carga liviana como de carga pesada.

El tercer componente para los datos obtenidos en la zona industrial de Bogotá demostró altas cargas para níquel y cromo, presentando además una correlación significativa entre estas dos especies. Esto sugiere un origen común para las mismas.

De acuerdo a lo reportado en la literatura científica, estos elementos son excelentes marcadores de fuentes industriales de diversos tipos, incluyendo procesos metalúrgicos así como procesos en los que se emplea el calentamiento de pigmentos para la producción de materiales vítreos (Rodríguez, 2002; Oravisjarvi et al., 2003; Ho et al., 2006). De esta manera, el tercer componente extraído puede relacionarse con el aporte de la actividad de tipo industrial.

El cuarto componente para los datos analizados presentó cargas importantes para plomo y cobre. Estos dos elementos no se encuentran correlacionados significativamente entre sí lo que indica que podrían provenir de fuentes diferentes.

Distintas referencias bibliográficas relacionan el plomo con emisiones de vehículos que operan con gasolina, aún en lugares en los que la gasolina contenga bajos niveles de dicha sustancia (Hopke, 1985; Pacyna & Pacyna, 2001). Al mismo tiempo, el plomo es relacionado con fuentes estacionarias, tales como industrias que hagan uso de procesos pirometalúrgicos en ausencia de hierro (Pacyna & Pacyna, 2001, Oravisjarvi et al., 2003). Por su parte, el cobre suele relacionarse con emisiones de vehículos diésel (Ho et al., 2006) así como con procesos industriales en los que interviene la metalurgia no ferrosa (Hopke, 1985; Pacyna & Pacyna, 2001).

De esta manera, el cuarto factor identificado podría corresponder a dos fuentes de emisión diferentes, una que contribuye con el plomo y la otra que aporta al cobre identificado. Sin embargo, con la información disponible resulta complejo establecer con exactitud el tipo o identidad de estas fuentes. Por esta razón, la fuente en referencia se considerará como una mezcla de plomo y cobre con preponderancia del primer elemento.

La Tabla 5.1 resume los resultados descritos en los párrafos anteriores en lo referente a la identidad de las fuentes contribuyentes al material particulado presente en el punto de medición ubicado en la zona industrial de Bogotá.

Tabla 5.1. Asignación de las fuentes identificadas para la zona industrial (PM₁₀).

Fuente	Especies predominantes	Asignación empleada
1	Fe, Al, Mg, Ca, K, Mn, Ga, Ba, Na	Polvo resuspendido <u>enriquecido</u> por actividad vehicular
2	SO ₄ ⁼ , NO ₃ ⁻ , NH ₄ ⁺ , Cl ⁻ , Zn	Vehículos
3	Ni, Cr	Industria (Ni+Cr)
4	Pb, Cu	Pb + Cu

e) Regresión lineal múltiple

La Figura 5.3 presenta los resultados obtenidos para la regresión lineal múltiple. Esta figura incluye también los resultados relativos al análisis ANOVA y al coeficiente de correlación alcanzado para la regresión efectuada. De acuerdo a dichos resultados, la correlación entre la concentración de material particulado y las puntuaciones factoriales absolutas (representativas de cada una de las fuentes identificadas en los pasos anteriores) presentó un coeficiente de determinación de 0.95. Esto indica que las variables predictoras lograron describir de manera apropiada la concentración de material particulado que fue registrada en el lugar de estudio.

Esta misma figura muestra que al interior de los coeficientes de regresión determinados, el correspondiente a AFS4 resultó no significativo desde el punto de vista estadístico (considerando una distribución t con α de 0.05). Esto significa que la contribución de la cuarta fuente, descrita como plomo y cobre principalmente, no genera un aporte significativo a los niveles de material particulado presentes en el lugar analizado.

f) Ecuación característica

A partir de estos resultados se puede formular la ecuación característica que determina la concentración de material particulado para una muestra que ha sido recolectada en condiciones equivalente a las encontradas en la zona industrial de Bogotá:

$$PM = 15.754 + 54.816 \bullet AFS1_i + 11.861 \bullet AFS2_i + 4.744 \bullet AFS3_i$$

En donde AFS1_i, AFS2_i y AFS3_i corresponden a las puntuaciones factoriales absolutas de la muestra *i* para las fuentes 1, 2 y 3, respectivamente (cada una de estas fuentes hace referencia a los componentes descritos en el numeral d de esta sección). La constante en la ecuación anterior representa el aporte de las fuentes que no lograron ser identificadas a partir de los datos generados en este estudio.

g) Contribución porcentual de las fuentes

Por último, haciendo uso de la ecuación antes descrita y de la totalidad de la información recolectada en campo se establecieron las contribuciones de cada una de las fuentes a la masa de material particulado que se encuentra en la zona industrial de Bogotá (ver Figura 5.4).

Coefficients ^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	Correlations			Collinearity Statistics	
		B	Std. Error	Beta			Zero-order	Partial	Part	Tolerance	VIF
1	(Constant)	15,754	5,054		3,117	,003					
	AFS1	54,816	2,032	,923	26,972	,000	,905	,969	,905	,963	1,039
	AFS2	11,861	1,219	,328	9,733	,000	,270	,818	,327	,990	1,010
	AFS3	4,744	1,233	,129	3,849	,000	,165	,490	,129	,996	1,004
	AFS4	,299	1,256	,008	,238	,813	,180	,035	,008	,963	1,038

a. Dependent Variable: PM

Model Summary ^b

Model	R	RSquare	Adjusted RSquare	Std. Error of the Estimate
1	,973 ^a	,947	,943	8,89717

a. Predictors: (Constant), AFS4, AFS3, AFS2, AFS1

b. Dependent Variable: PM

Figura 5.3. Coeficientes de regresión, análisis ANOVA y coeficiente de determinación para la regresión lineal entre concentración de material particulado y puntuaciones factoriales absolutas para las mediciones en la zona industrial de Bogotá.

(Esta imagen corresponde a la visión de la pantalla de un equipo de computación en el que se hace uso de la herramienta SPSS para ejecutar los análisis).

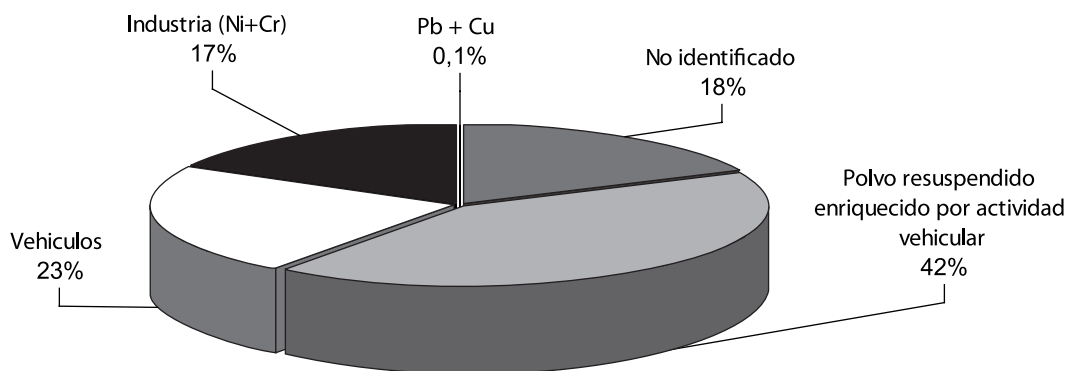


Figura 5.4. Contribución de las fuentes que aportan a la concentración de PM₁₀ en la zona industrial de Bogotá.

Estos resultados indican de forma bastante clara la importancia que tienen las fuentes vehiculares en la ciudad. Incluso al interior de la zona industrial, este tipo de emisiones juegan un papel preponderante. Por un lado, las emisiones de los automotores explican de forma directa el 23% del material particulado observado en la zona en referencia. Adicionalmente, dichas emisiones contribuyen a la fracción que corresponde al 42% del material particulado al ser un elemento enriquecedor del polvo resuspendido.

En este punto cabe resaltar que la actividad industrial en los alrededores del punto de medición hace que la mayor parte del tránsito corresponda a vehículos de carga pesada, por lo que el porcentaje de material particulado aportado en la categoría en referencia podría deberse en su mayoría a este tipo de transporte. El 17% de la concentración de material particulado en la zona bajo estudio es aportada por actividades industriales

Cerca del 20% de la masa del contaminante en referencia no pudo ser explicada por los componentes retenidos e identificados dentro de los análisis efectuados en este estudio. Esto podría resolverse si en futuros esfuerzos se incluyen especies adicionales tales como el vanadio y el carbono orgánico y elemental.

NOTA: En las siguientes secciones del documento tan sólo se presentan los resultados más importantes y que fueron utilizados para generar las principales conclusiones de esta parte del estudio.

5.2. PM₁₀ en la zona de alto tráfico vehicular (corrida 2)

Para esta corrida se incluyeron resultados de 57 muestras de material particulado referentes a los contenidos de 19 especies químicas correspondientes a 14 elementos metálicos (Al, Ba, Ca, Cr, Cu, Fe, Ga, K, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, Zn), un elemento no metálico (B), y 4 especies iónicas (Cl⁻, SO₄⁼, NO₃⁻, NH₄⁺).

Después de aplicados los análisis de componentes retenidos (usando los valores propios obtenidos a través del PCA) y de rotar la matriz de cargas así como después de considerar diversas hipótesis sobre el tipo de fuentes representadas se logró generar la matriz de asignaciones para las fuentes identificadas (ver Tabla 5.2), las cuales explican el 87% de la varianza total.

Tabla 5.2. Asignación de fuentes para la zona de alto tráfico vehicular (PM₁₀).

Fuente	Especies predominantes	Asignación empleada
1	Fe, Ca, Ba, Al, Mg, Cl ⁻ , Zn, Cr	Polvo resuspendido <u>enriquecido</u> por actividad vehicular
2	NH ₄ ⁺ , SO ₄ ⁼ , NO ₃ ⁻ , Pb, Zn	Vehículos
3	Ga, Mn, Cr	Industria
4	Ni	Ni

A partir de esta asignación se realizó la regresión lineal múltiple a través de la cual se obtuvo la siguiente ecuación característica:

$$PM = 11.460 + 10.812 \bullet AFS1_i + 9.319 \bullet AFS2_i + 1.009 \bullet AFS3_i + 1.153 \bullet AFS4_i$$

En donde AFS1_i, AFS2_i, AFS3_i y AFS4_i corresponden a las puntuaciones factoriales absolutas de la muestra i para las fuentes 1, 2, 3 y 4, respectivamente (cada una de estas fuentes hacen referencia a los componentes descritos en la Tabla 5.2). La constante representa el aporte de las fuentes que no lograron ser identificadas a partir de los datos generados en este estudio.

Por último, haciendo uso de la ecuación antes descrita y de la totalidad de la información recolectada en campo se establecieron las contribuciones de cada una de las fuentes a la masa de material particulado (de tamaño inferior a 10 micras) que puede encontrarse en las zonas de alto tráfico vehicular al interior del perímetro urbano de Bogotá (ver Figura 5.5).

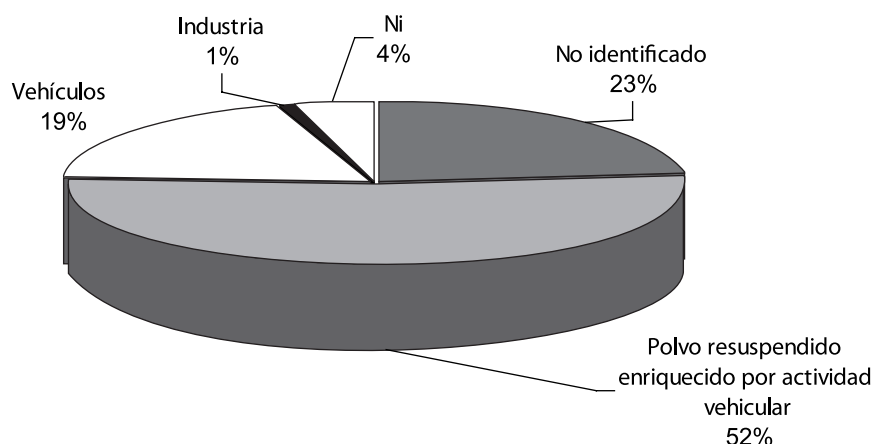


Figura 5.5. Contribución de las fuentes que aportan a la concentración de PM₁₀ en zonas de alto tráfico vehicular en Bogotá.

Estos resultados confirman nuevamente la importancia de las fuentes vehiculares. En este caso, su aporte directo a las concentraciones de PM₁₀ fue del 19% mientras que de forma indirecta aportaron a la fracción de polvo resuspendido, la cual correspondió a más del 50% de la masa de material particulado.

Respecto al impacto directo de las fuentes vehiculares no fue posible separar las mismas entre vehículos de carga pesada que utilizan ACPM y vehículos operados con gasolina. Esto se debe a que, tal y como ha sido mencionado anteriormente, en este trabajo no se realizaron determinaciones de carbón elemental.

Por otra parte, el 4% del material particulado determinado puede ser explicado por una o varias fuentes de tipo estacionario cuyo perfil de emisión presenta una concentración relevante de níquel. El 1% de la concentración del contaminante en referencia puede asociarse con una fuente de tipo industrial relacionada con la actividad del acero. Finalmente, para el punto bajo estudio, cerca del 23% del material particulado proviene de fuentes diferentes a las identificadas mediante el análisis efectuado.

5.3. PM_{2.5} en la zona de alto tráfico vehicular (corrida 3)

Para esta corrida se incluyeron resultados de 59 muestras de material particulado referentes a los contenidos de 16 especies químicas correspondientes a 10 elementos metálicos (Al, Ca, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Na, Ni, Pb), un elemento no metálico (B), y 5 especies iónicas (Cl⁻, SO₄⁼, NO₃⁻, PO₄⁼, NH₄⁺).

Después de aplicar los análisis de componentes retenidos (usando los valores propios obtenidos a través del PCA) y de rotar la matriz de cargas así como después de considerar diversas hipótesis sobre el tipo de fuentes representadas se logró generar la matriz de asignaciones para las fuentes identificadas (ver Tabla 5.3), las cuales explican el 80% de la varianza total.

Tabla 5.3. Asignación de fuentes para la zona de alto tráfico vehicular (PM_{2.5}).

Fuente	Especies predominantes	Asignación empleada
1	Mg, Na, B, Ca y Al	Polvo resuspendido (<u>no enriquecido</u>) / Suelo natural
2	SO ₄ ⁼ , NO ₃ ⁻ , NH ₄ ⁺ , Cl ⁻ , Fe, Pb	Vehículos + Fe
3	Cr, Ni, Pb	Industria
4	Cu, Cl ⁻	Vehículos diésel (emisiones no provenientes del tubo de escape)
5	PO ₄ ⁻³ , Fe	PO ₄ ⁻³ + Fe

A partir de esta asignación se realizó la regresión lineal múltiple a través de la cual se obtuvo la siguiente ecuación característica:

$$PM = 8.133 + 0.534 \bullet AFS1_i + 6.459 \bullet AFS2_i + 2.282 \bullet AFS3_i + 1.125 \bullet AFS4_i + 1.183 \bullet AFS5_i$$

En donde AFS1_i, AFS2_i, AFS3_i, AFS4_i, y AFS5_i corresponden a las puntuaciones factoriales absolutas de la muestra *i* para las fuentes 1, 2, 3, 4 y 5, respectivamente (cada una de estas fuentes hace referencia a los componentes descritos en la Tabla 5.3). La constante representa el aporte de las fuentes que no lograron ser identificadas a partir de los datos generados en este estudio.

Por último, haciendo uso de la ecuación antes descrita y de la totalidad de la información recolectada en campo se establecieron las contribuciones de cada una de las fuentes a la masa de material particulado (de tamaño inferior a 2.5 micras) que puede encontrarse en las zonas de alto tráfico vehicular al interior del perímetro urbano de Bogotá (ver Figura 5.6).

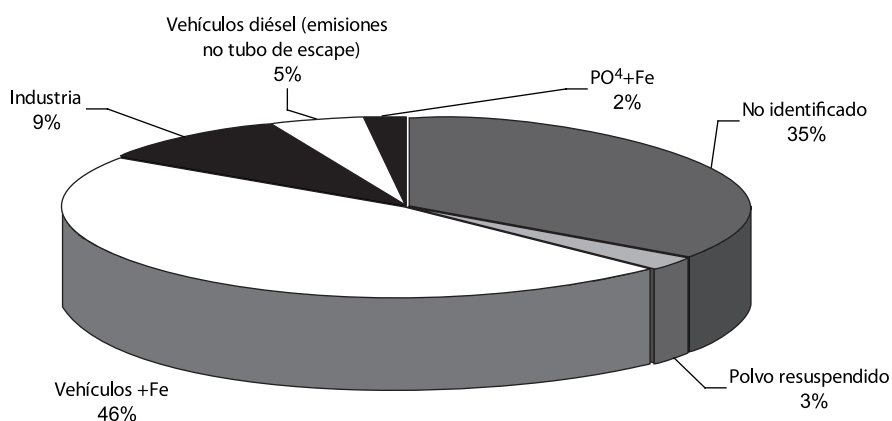


Figura 5.6. Contribución de las fuentes que aportan a la concentración de PM_{2.5} en zonas de alto tráfico vehicular en Bogotá.

La figura anterior permite determinar que cuando se hace referencia a la fracción fina del PM, cerca de la mitad de la masa es explicada por emisiones provenientes de fuentes vehiculares. Del mismo modo, menos del 10% de las concentraciones de material particulado en esta zona de la ciudad obedecen al aporte de fuentes industriales.

De forma contraria a lo observado para PM₁₀, en el caso del PM_{2.5} el polvo resuspendido es muy poco importante en términos de su aporte a las concentraciones observadas para este contaminante. Para este mismo caso, una tercera parte de la masa observada no pudo ser explicada a partir de las especies que fueron parte de este estudio.

5.4. PM₁₀ en la zona residencial (corrida 4)

Para esta corrida se incluyeron resultados de 46 muestras de material particulado referentes a los contenidos de 20 especies químicas correspondientes a 13 elementos metálicos (Al, Ba, Ca, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, Zn), un elemento no metálico (B), y 6 especies iónicas (F⁻, Cl⁻, SO₄⁼, NO₃⁻, PO₄⁼, NH₄⁺).

Después de aplicados los análisis de componentes retenidos (usando los valores propios obtenido a través del PCA) y de rotar la matriz de cargas así como después de considerar diversas hipótesis sobre el tipo de fuentes representadas se logró generar la matriz de asignaciones para las fuentes identificadas (ver Tabla 5.4), las cuales explican el 87% de la varianza total.

Tabla 5.4. Asignación de fuentes para la zona residencial (PM₁₀).

Fuente	Especies predominantes	Asignación empleada
1	Al, Ca, Fe y Mg	Polvo resuspendido <u>enriquecido</u> por actividad vehicular
2	SO ₄ ⁼ , NO ₃ ⁻ , NH ₄ ⁺	Aerosoles secundarios
3	B, K, Ba, Mg	Combustión de madera
4	Pb, Zn	Vehículos
5	Cr, Cu	Industria

A partir de esta asignación se realizó la regresión lineal múltiple a través de la cual se obtuvo la siguiente ecuación característica:

$$PM = 7.988 + 18.630 \bullet AFS1_i + 8.183 \bullet AFS2_i + 3.145 \bullet AFS3_i + 6.567 \bullet AFS4_i + 0.507 \bullet AFS5_i$$

En donde AFS1_i, AFS2_i, AFS3_i, AFS4_i y AFS5_i corresponden a las puntuaciones factoriales absolutas de la muestra i para las fuentes 1, 2, 3, 4 y 5, respectivamente (cada una de estas fuentes hacen referencia a los componentes descritos en la Tabla 5.4). La constante representa el aporte de las fuentes que no lograron ser identificadas a partir de los datos generados en este estudio.

Por último, haciendo uso de la ecuación antes descrita y de la totalidad de la información recolectada en campo se establecieron las contribuciones de cada una de las fuentes a la masa de material particulado (de tamaño inferior a 10 micras) que puede encontrarse en las zonas residenciales del perímetro urbano de Bogotá (ver Figura 5.7).

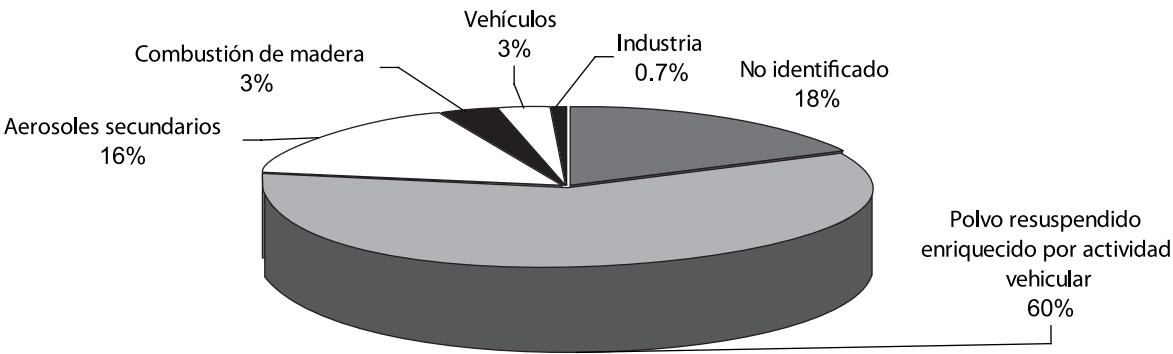


Figura 5.7. Contribución de las fuentes que aportan a la concentración de PM₁₀ en zonas residenciales de Bogotá.

De forma consistente con lo discutido en secciones previas, estos resultados muestran que la fracción respirable del material particulado se encuentra altamente influenciada por el polvo resuspendido que es enriquecido por las emisiones asociadas con la actividad vehicular.

Del mismo modo, tal y como fue discutido en la Sección 4.4, la presencia de aerosoles secundarios es muy importante en la zona residencial que fue evaluada. Dicho material logra explicar más del 15% de la masa de material particulado allí presente.

Por otro lado, se logró documentar que el 3% del material particulado que se observa en esta zona de la ciudad proviene de la combustión de madera, posiblemente producida en establecimientos tales como restaurantes y asaderos cercanos al lugar de medición. Un porcentaje de la misma magnitud puede ser atribuido de forma directa a la actividad vehicular mientras que menos del 1% puede ser atribuida a la actividad industrial en general.

5.5. PM_{2.5} en la zona residencial (corrida 5)

Para esta corrida se incluyeron resultados de 50 muestras de material particulado referentes a los contenidos de 19 especies químicas correspondientes a 13 elementos metálicos (Al, Ba, Bi, Ca, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Pb, Zn), y seis especies iónicas (F⁻, Cl⁻, SO₄⁼, NO₃⁻, PO₄⁼, NH₄⁺).

Después de aplicados los análisis de componentes retenidos (usando los valores propios obtenidos a través del PCA) y de rotar la matriz de cargas así como después de considerar diversas hipótesis sobre el tipo de fuentes representadas se logró generar la matriz de asignaciones para las fuentes identificadas (ver Tabla 5.5), las cuales explican el 82% de la varianza total.

Tabla 5.5. Asignación de fuentes para la zona residencial (PM_{2.5}).

Fuente	Especies predominantes	Asignación empleada
1	SO ₄ ⁼ , NO ₃ ⁻ , NH ₄ ⁺ , F ⁻ , Cl ⁻	Aerosoles secundarios
2	Na, Mg, Ca, Al	Polvo resuspendido (<u>no enriquecido</u>) / Suelo natural resuspendido
3	Mn, Zn, Cr	Industria relacionada con el hierro
4	Ba, K	Combustión de madera
5	Bi, PO ₄ ⁻³ , Cu	Cu / Bi

A partir de esta asignación se realizó la regresión lineal múltiple a través de la cual se obtuvo la siguiente ecuación característica:

$$PM = 2.139 + 9.664 \bullet AFS_1 + 1.862 \bullet AFS_2 + 5.027 \bullet AFS_3 + 1.424 \bullet AFS_4 + 1.958 \bullet AFS_5$$

En donde AFS_{1i}, AFS_{2i}, AFS_{3i}, AFS_{4i} y AFS_{5i} corresponden a las puntuaciones factoriales absolutas de la muestra *i* para las fuentes 1, 2, 3, 4 y 5, respectivamente (cada una de estas fuentes hace referencia a los componentes descritos en la Tabla 5.5). La constante representa el aporte de las fuentes que no lograron ser identificadas a partir de los datos generados en este estudio.

Por último, haciendo uso de la ecuación antes descrita y de la totalidad de la información recolectada en campo se establecieron las contribuciones de cada una de las fuentes a la masa de material particulado (de tamaño inferior a 2.5 micras) que puede encontrarse en las zonas residenciales del perímetro urbano de Bogotá (ver Figura 5.8).

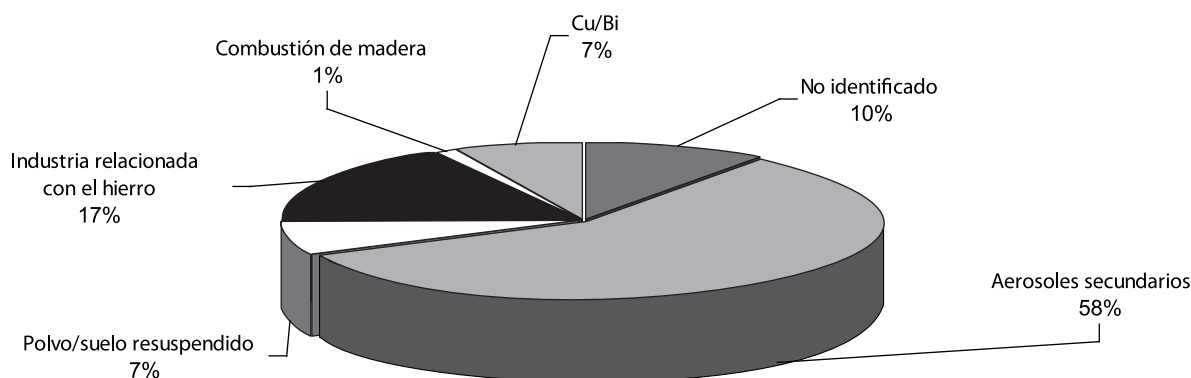


Figura 5.8. Contribución de las fuentes que aportan a la concentración de PM_{2.5} en zonas residenciales de Bogotá.

Estos resultados confirman una vez más la importancia de los aerosoles secundarios al momento de determinar los niveles de contaminación por material particulado fino en zonas de la ciudad que se encuentran relativamente alejadas de las principales fuentes de emisión. En este caso, cerca del 60% de la masa de material particulado presente en la zona residencial evaluada correspondió a este tipo de especies.

Al igual que en la zona de alto tráfico vehicular, el polvo resuspendido no resultó ser tan importante cuando se hace referencia a PM_{2.5}, en contraste de lo que sucede cuando se hace referencia a PM₁₀. En esta misma zona se demuestra cómo la contribución de las fuentes industriales al problema global de contaminación en la ciudad es significativa. Finalmente, para la zona residencial, cerca del 90% de la masa del material particulado fue posible de determinar a partir de las mediciones realizadas en este estudio.

5.6. Resumen de resultados – análisis comparativo

La Tabla 5.6 resume los resultados presentados en las secciones anteriores y obtenidos a partir de las cinco corridas del modelo de receptores utilizado. Dichos resultados demuestran la gran importancia del polvo y el suelo resuspendido. Estas emisiones se ven enriquecidas por el efecto de otras fuentes (en especial las fuentes vehiculares) y terminan convirtiéndose en uno de los principales componentes del material particulado que se registra en las diferentes zonas de la ciudad. Esto, sin embargo tan sólo aplica para el PM₁₀. En el caso del material particulado fino, el aporte de esta componente no es relevante.

Tabla 5.6. Contribución de las fuentes identificadas a las concentraciones de material particulado en Bogotá.

Tipo de fuente	Zona industrial	Zona con alto tráfico vehicular		Zona residencial	
	PM ₁₀	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM ₁₀	PM _{2.5}
Polvo resuspendido enriquecido por actividad vehicular	42	52	0	60	0
Polvo resuspendido no enriquecido / Suelo natural	0	0	3	0	7
Vehículos	23	19	51	3	0
Industria	17	1	9	0.7	17
Aerosoles secundarios	0	0	0	16	58
Combustión de madera	0	0	0	3	1
Fuentes sin catalogar	0.1	4	2	0	7
No identificado	18	23	35	18	10

Tal y como era de esperarse, las emisiones asociadas con la flota vehicular generaron un mayor impacto en la zona de la ciudad en la que se presenta un alto flujo de automotores. Este impacto se ve reflejado de forma bastante más significativa en la fracción fina que en la fracción respirable del material particulado. Para este mismo tipo de fuente, se observó una contribución elevada en la zona industrial de la ciudad. Esto último se debe a que en dicha zona también se presenta una importante actividad vehicular, especialmente de vehículos de carga pesada. Lo contrario ocurrió en la zona residencial evaluada, en donde el impacto directo de las fuentes móviles tiene una contribución muy baja en lo que se refiere a las concentraciones de material particulado.

El PM₁₀ presente en la zona industrial es en donde se puede observar la distribución más uniforme para las fuentes identificadas. En este caso, si bien domina el polvo resuspendido y enriquecido por las emisiones vehiculares, también se presentan contribuciones significativas para las emisiones directas de los vehículos así como para aquellas relacionadas con la actividad industrial.

Finalmente, tal y como ha sido discutido previamente, debe resaltarse el papel que están jugando los aerosoles secundarios (formados como el resultado de reacciones en la atmósfera a partir de las emisiones provenientes de fuentes industriales y vehiculares) en los niveles de contaminación que se observan en las distintas zonas de la ciudad. Como era de esperarse, dicho papel se centra en aquellas zonas que no se encuentran afectadas de forma directa por fuentes primarias de emisión.

Esto último representa un tema para el cual se cuenta con información muy limitada en Bogotá y las demás ciudades del país. Según los resultados aquí encontrados y dadas las implicaciones de los mismos, la generación de mejor documentación en este sentido debe considerarse como una prioridad para las autoridades ambientales de nivel local y regional.

6. Análisis de incertidumbre

Los autores de este trabajo consideran que los resultados relacionados tanto con el contenido de iones y especies metálicas en las muestras de material particulado como con las corridas del modelo de receptores y la identificación de fuentes, corresponden a valores confiables y que representan la realidad actual de la ciudad de Bogotá en una forma que no puede ser replicada haciendo uso de resultados obtenidos en ejercicios anteriores. Esto significa que la caracterización fisicoquímica del material particulado aquí elaborada así como la asignación de fuentes responsables de dicho material en distintas zonas de la ciudad son resultados que pueden ser utilizados por las autoridades distritales para la toma de decisiones en lo que se refiere a su política de control de la contaminación del aire.

Al mismo tiempo, sin embargo, esto no quiere decir que la metodología utilizada en este estudio (así como en cualquier trabajo de esta naturaleza) no cuente con limitaciones que generan un cierto grado de incertidumbre en los resultados.

Las principales fuentes de error en nuestros resultados se encuentran relacionadas con los siguientes aspectos: 1) Representatividad y número de sitios de monitoreo utilizados para la caracterización del PM; 2) No se lograron considerar todas las especies que hacen parte del material particulado (v.g., la caracterización no incluyó carbón elemental); 3) Incertidumbres y errores asociados tanto con el procedimiento de toma de muestra como durante la parte analítica en el laboratorio; 4) Limitaciones asociadas con la técnica de PCA (v.g., la varianza total que es posible explicar a partir del modelo utilizado nunca es del 100%); 5) El grado de adecuación muestral (medido en términos del parámetro KMO) no fue ideal para todas las corridas realizadas; 6) Limitaciones asociadas con la regresión lineal multivariada (v.g., el grado de ajuste de los modelos nunca es del 100%); 7) Alta sensibilidad del modelo de receptores hacia las hipótesis sobre el tipo de fuente representada por cada factor identificado.

Estos aspectos a su vez se encuentran relacionados con limitaciones y situaciones que no era posible resolver durante el desarrollo de la campaña de campo e incluyen temas tales como los costos asociados con los análisis de iones y de metales y la no disponibilidad de los perfiles de fuente para la ciudad de Bogotá.

Al mismo tiempo, sin embargo, dado el esfuerzo realizado y el avance logrado en el conocimiento de las propiedades del material particulado presente en la atmósfera, obtenido de forma rigurosa y masiva así como para las condiciones específicas y reales de la ciudad, es ahora posible realizar proyectos focalizados a resolver las limitaciones específicas antes enumeradas. De esta forma, se abre la puerta para que las actualizaciones y mejoras al modelo de receptores aquí utilizado no requieran de estudios de esta envergadura y complejidad en términos del tiempo y los recursos financieros necesarios para su ejecución.

En este sentido se resalta una vez más que la interpretación de los resultados obtenidos mediante este tipo de análisis debe ser una tarea extremadamente cuidadosa y profunda que considere los distintos perfiles de emisión reportados en la literatura así como las características particulares de los factores obtenidos (presencia o ausencia de determinados elementos). Esto es de vital importancia pues el mismo conjunto de datos puede tener diferentes interpretaciones atendiendo a los elementos de juicio considerados por quien desarrolla los análisis.

7. Conclusiones

A través de un extenso programa de recolección y caracterización de muestras de material particulado en conjunto con la aplicación de la técnica de modelación por receptores fue posible realizar una identificación exitosa de las principales fuentes de contaminación en Bogotá. Este ejercicio demostró ser de gran importancia ya que a través del mismo fue posible identificar particularidades específicas para la ciudad en lo que se refiere a los responsables de su problema de calidad del aire.

Esto significa que se debe continuar con esfuerzos similares para ampliar y complementar los resultados aquí encontrados (incluyendo un mayor número de especies en los análisis, tales como el vanadio y el carbón elemental) para el caso de Bogotá y otras ciudades del país. Esto es especialmente cierto dado que no es posible extrapolar los resultados encontrados para ciudades diferentes o incluso para zonas con características distintas al interior de una misma ciudad.

Por ejemplo, al comparar resultados obtenidos para Bogotá y otras dos ciudades latinoamericanas (Sao Paulo y Santiago de Chile) respecto al contenido de sulfato y nitrato en el material particulado, se observó que la ciudad colombiana exhibe valores sustancialmente inferiores. Esta diferencia obedece a características propias de cada ciudad, en este caso relacionadas con el tipo de combustible utilizado por la industria (contrario a lo que ocurre en Sao Paulo y Santiago, una gran proporción de la industria formal de Bogotá utiliza gas natural como su principal fuente de energía).

Al mismo tiempo, sin embargo, dado el actual desconocimiento de los denominados perfiles de fuente, las técnicas de modelación por receptores que son aplicables en Bogotá y otras ciudades del país son de gran complejidad y requieren de extrema precaución y de amplia experiencia durante la etapa de interpretación de resultados. Esta realidad limita la aplicación masiva de estos métodos pero la misma puede ser resuelta a través del involucramiento de instituciones idóneas en estos temas.

Los resultados de este estudio confirman una vez más que la zona industrial de Bogotá presenta niveles de contaminación por material particulado que son bastante más elevados que los encontrados en otras zonas de la ciudad (promedio diario de PM₁₀ de 110 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, rango entre 25 y 250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Esto es cierto incluso al comparar dicha zona con regiones de la ciudad en donde se presenta una alta actividad vehicular. En este sentido, se debe resaltar que los análisis aquí presentados hacen referencia exclusiva a concentraciones en el aire ambiente y no a los niveles de exposición personal a los que se encuentran sujetos los habitantes de Bogotá.

A partir de las mediciones desarrolladas en tres lugares distintos de la ciudad (zonas industrial, residencial y de alto tráfico vehicular) fue posible determinar que la proporción PM_{2.5}/PM₁₀ es bastante uniforme y que la misma se encuentra alrededor del 50%. Del mismo modo, en las condiciones en las que se llevaron a cabo las mediciones, no fue posible establecer una correlación clara entre los niveles de contaminación por material particulado y variables meteorológicas tales como precipitación y velocidad del viento. Lo que esto sugiere es que se requieren análisis más complejos y haciendo uso de herramientas más sofisticadas para lograr documentar la relación existente entre calidad del aire y meteorología al interior del perímetro urbano de la ciudad.

Los iones con mayor presencia en la ciudad son el sulfato (1.78 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en muestras de PM₁₀ recolectadas en la zona industrial), nitrato (1.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en PM₁₀ de la zona residencial), cloruro (0.66 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en muestras de PM₁₀ de la zona industrial) y amonio (0.45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en muestras de PM_{2.5} en la zona con alto tráfico vehicular).

La contribución individual de cada metal a la masa de PM₁₀ en Bogotá se encuentra en el rango entre 0.0003% y 3.2%. Los metales analizados representan el 7.5, 8.9, y 10.1% de las concentraciones de PM₁₀ registradas en las zonas de alto tráfico vehicular, de tipo residencial y de tipo industrial, respectivamente. En términos del PM_{2.5}, los metales analizados constituyen de manera individual porcentajes entre el 6.7E-5 y el 2.5 % del total de la masa de esta fracción de material particulado. De forma global, las especies metálicas analizadas representan el 5.4% del PM_{2.5} recolectado en la zona residencial y el 4% del PM_{2.5} recolectado en la zona de alto tráfico vehicular.

Asimismo, se logró establecer que varios de los metales de mayor interés (e.d., aquellos más abundantes en el material particulado de la ciudad – calcio, aluminio, hierro) se concentran de forma mayoritaria en la fracción gruesa de dicho contaminante. El sodio y el potasio, metales para los que se logró documentar su importancia en términos de su contribución a la masa total de PM_{2.5}, tienden a concentrarse de forma algo más uniforme al interior de las distintas fracciones del material particulado.

A través de la caracterización química de las muestras de material particulado fue posible establecer de forma cuantitativa que la contaminación percibida en un lugar de la ciudad es consecuencia de lo que ocurre no sólo al interior de la misma sino también de las dinámicas de emisiones que se presentan en zonas aledañas. Esto es de particular importancia para las zonas residenciales, en donde se encontraron elevados niveles de algunos iones y metales a pesar de que en dichas zonas no se encuentran fuentes de emisión primaria que tengan un impacto significativo.

Del mismo modo, dichos resultados demostraron que el conocimiento de las concentraciones de material particulado no es suficiente para entender el problema de contaminación en un lugar específico de la ciudad. Esto se debe a que la peligrosidad de dicho contaminante (asociada con el tipo de materiales que transporta en sus superficies) puede ser sustancialmente distinta en diferentes zonas de la ciudad.

Los resultados de la modelación por receptores permitieron determinar de forma bastante clara la importancia que las fuentes vehiculares tienen sobre los niveles de contaminación en la ciudad. El impacto directo e indirecto de dichas fuentes fue relevante en todas las zonas evaluadas, en especial para el caso del PM₁₀ y con mayor énfasis en la zona caracterizada por la alta actividad vehicular.

En un segundo lugar, en términos de su aporte a las concentraciones de material particulado en las diferentes zonas de la ciudad, se ubican las fuentes industriales, las cuales generaron contribuciones significativas en todas las zonas evaluadas. En este caso, el impacto relativo fue mayor para PM_{2.5} que para PM₁₀ y se observó un mayor énfasis en la zona caracterizada por la alta actividad industrial.

Uno de los resultados más interesantes de la modelación por receptores, dado lo novedoso del concepto para el contexto de Bogotá, tiene que ver con la documentación lograda a propósito de la importancia de los aerosoles secundarios al momento de determinar las concentraciones de material particulado. Esto es de especial relevancia para el caso del PM_{2.5} en zonas residenciales (alejadas de las principales fuentes de emisiones de contaminantes).

Estos resultados confirman nuevamente que la atmósfera de la ciudad funciona de forma similar a un sistema interconectado, en donde las emisiones generadas en un lugar geográfico pueden tener implicaciones negativas en zonas relativamente alejadas. El reconocimiento de esta realidad es fundamental, ya que significa que las políticas de control de la contaminación deben planificarse de manera integral y considerando a toda la ciudad (y algunos de sus alrededores) como un mismo sistema.

Otro resultado igualmente interesante tiene que ver con la contribución del polvo resuspendido a los niveles de contaminación por material particulado. En este sentido, dicho material (una vez enriquecido por el efecto de las emisiones asociadas con actividad vehicular) representó entre el 42 y el 60% de la masa de PM₁₀ presente en las diferentes zonas que fueron evaluadas. Un efecto contrario se observó para el PM_{2.5}, en donde el material resuspendido (no enriquecido) tan sólo alcanzó a representar entre el 3 y el 7% de la masa de material particulado.

Finalmente, los resultados de la modelación por receptores generan un gran aporte al incesante debate acerca de la importancia que tienen las fuentes industriales frente a las fuentes vehiculares. En este sentido se logró documentar que, como era de esperarse, cada una de dichas fuentes genera una contribución importante a la masa de partículas en las zonas de la ciudad caracterizadas por la presencia de las mismas (las fuentes industriales en la zona industrial y las fuentes vehiculares en la zona con alto tráfico de automotores).

Más interesante aun es el caso del PM_{2.5} en la zona residencial, en donde las fuentes industriales tuvieron un aporte directo mayor al aporte directo de las fuentes vehiculares pero en donde al mismo tiempo, los aerosoles secundarios dominaron la masa del material particulado. Dado que estos últimos se encuentran más cercanamente asociados a las emisiones provenientes de fuentes vehiculares, estos resultados significan que, sin importar la región de la ciudad en donde nos encontremos, estaremos siempre sujetos a los efectos de las emisiones tanto de fuentes fijas como de fuentes móviles.

8. Referencias

- Abu-Allaban, Gertler & Lowenthal. 2002. A preliminary apportionment of the sources of ambient PM₁₀, PM_{2.5}, and VOCs in Cairo. *Atmospheric Environment*, **36**(35): 5549-5557.
- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA). CFR 40, part 58, Appendix E.
- Alvarez R. 1994. Estadística multivariante y no paramétrica con SPSS: Aplicación a las ciencias de la salud. España. Editorial Diaz de Santos.
- Almeida, Pio, Freitas, Reis & Trancoso. 2006. Approaching PM_{2.5} and PM_{2.5-10} source apportionment by mass balance analysis, principal component analysis and particle size distribution. *Science of the Total Environment*, **368**: 663-674.
- Artaxo, Oyola & Martínez R. 1999. Aerosol composition and source apportionment in Santiago de Chile. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, **150** (1-4): 409-416.
- Bruinen de Bruin, Koistinen, Yli-Tuomi, Kephelopoulos, & Jantunen, M. 2006. A review of: source apportionment techniques and marker substances available for identification of personal exposure, indoor and outdoor sources of chemicals. JRC—European Commission, p. 54.
- Buset, Evans, Richard, Brook & Toom-Sauntry. 2006 Use of advanced receptor modelling for analysis of an intensive 5-week aerosol sampling campaign. *Atmospheric Environment*, **40** (Suppl. 2): S482-S499.
- Carvalho, Souza, Martinis & Korn. 1995. Monitoring of the ultrasonic irradiation effect on the extraction of airborne particulate matter by ion chromatography. *Analytica Chimica Acta*, **317**: 171-179.
- Celis, Morales, Zaror, Claudio & Inzuza. 2003. A study of the particulate matter PM₁₀ composition in the atmosphere of Chillan, Chile. *Chemosphere*, **54**(4): 541-550.
- Chan, Simpson, McTainsh, Vowles, Cohen & Bailey. 1997. Characterization of chemical species in PM_{2.5} and PM₁₀ aerosol in Brisbane, Australia. *Atmospheric Environment*, **31**(22): 3773-3785.
- Chan & Mozurkewich. 2006. Application of absolute principal component analysis to size distribution data: identification of particle origins. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, **6**, 10493-10522.
- Chan, Vowles, McTainsh, Simpson, Cohen, Bailey & McOrist. 2000. Characterisation and source identification of PM₁₀ aerosol samples collected with a high volume cascade impactor in Brisbane (Australia). *Science of Total Environment*, **262**(1-2):5-19.
- Charron & Harrison. Fine (PM_{2.5}) and coarse (PM_{2.5-10}) particulate matter on a heavily trafficked london highway : sources and processes. 2005. *Environmental Science and Technology*, **39**(20): 7768-7776.
- Chow, J. 1995. Measurement methods to determine compliance with ambient air quality standards for suspended particles. Air & Waste Management Association, 45: 320-382.
- Chu-Fang, Pen-Chi, Man-Ting & Hung-Lung. 2007. Improvement of receptor model use in analytical aspect. *Atmospheric Environment*, **41**: 9146-9158.
- Chung-Shin, Chang-Gai & San-Ho. 2000. Characterization and source apportionment of ambient particulate matter in southern Taiwan. *Journal of Aerosol Science*, **31**: S368-S369.
- Cooper & Watson. 1980. Receptor oriented methods of fair particulate source apportionment. *Journal of the Air Pollution Control Association*, **30**: 1116-1125.
- Davis, B.L. 1984. X-ray diffraction analysis and source apportionment of Denver Aerosol. *Atmospheric Environment*, **18** (10): 2197-2208.

Dunteman.1989. Principal Component Analysis. Sage Publications.

Eatough, Aghdaie, Cottam, Gammon, Lewis & Farber. 1990. Loss of semi-volatile organic compounds from particles during sampling on filters. *Air & Waste Management Association*, 146-156.

Eltayeb, Xhoffer, Van Espen & Van Grieken. 1993. Source and Composition of aerosol from Khartoum, Sudan. *Atmospheric Environment*, **27B** (1): 67-76.

Fung & Wong. 1995. Apportionment of air pollution sources by receptor models in Hong Kong. *Atmospheric Environment*, **29**(16): 2041-2048.

Garson. 2008. Statnotes from North Carolina State University, Public Administration Program. [En línea]

Guor-Cheng, Cheng-Nan, Yuh-Shen, Peter Pi-Cheng, Ding-Guor & Chia-Chium, C.1999. Characterization of chemical species in PM_{2.5} and PM₁₀ aerosols in suburban and rural sites of central Taiwan. *Science of the Total Environment*, **234**(1-3): 203-212.

Harrison, Jones & Lawrence. 2003. A pragmatic mass closure model for airborne particulate matter at urban background and road sites. *Atmospheric Environment*, **37**: 4927-4933.

Henry, Lewis, Hopke & Willianson. 1984. Review of receptor model fundamentals. *Atmospheric Environment*, **18**: 1507-1515.

Henry, R.C. 1987. Current factor analysis receptor models are ill-posed. *Atmospheric Environment*, **21**(2): 1815-1820.

Henry, R.C. Duality in multivariate receptor models. 2005. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, **77** (1-2):59

Ho, Cao, Lee & Chan. 2006. Source apportionment of PM_{2.5} in urban area of Hong Kong. *Journal of Hazardous Materials B*, **138**: 73-85.

Hopke, Lamb, & Natush. 1980. Multielemental characterization of urban roadway dust. *Environmental Science and Technology*, **14** (2): 164-172.

Hopke, P.K. 1985. Receptor modeling in environmental chemistry. New York, John Wiley and Sons.

Hopke, P.K. 2003. Recent developments in receptor modeling. *Journal of Chemometrics*. **17**: 255-265

Jackson J. 1991. A User's guide to principal components. New York , Jhon Wiley and Sons.

Jonson, Kittelson & Watts. 2005. Source apportionment of diesel and spark ignition exhaust aerosol using on-road data from the Minneapolis metropolitan area. *Atmospheric Environment*, **39**: 2111-2121.

Kim, Hopke, Larson, Covert. 2004. Análisis of ambient particle size distributions using positive matriz factorization and unmix. *Environmental Science and Technology*, **38**: 202-209.

Kleeman, M. J. 2003. Final Report: Review of source apportionment techniques for airborne particulate matter, prepared for California Air Resources Board and the California Environmental protection Agency.

Lee, Liu, Wang, Russell, & Edgerton. 2008. Source apportionment of PM_{2.5}: Comparing PMF and CMB results for four ambient monitoring sites in the southeastern United States. *Atmospheric Environment*. **40**: 2533-2551.

Lee, Brook, Dabek-Zlotorzynska & Mabury. 2003 Identification of the major sources contributing to PM_{2.5} observed in Toronto. *Environmental Science and Technology*, **37**(21): 4831-4840.

- Lonati, Giugliano, Butelli, Romele & Tardivo. 2005. Major chemical components of PM_{2.5} in Milan (Italy). *Atmospheric Environment*, **39**(10): 1925-1934.
- Manno, Varrica & Dongarra. 2006. Metal distribution in road dust samples collected in an urban area close to a petrochemical plant at Gela, Sicily. *Atmospheric Environment*, **40**: 5929-5941.
- Meyers, Gamst & Guarino. 2006. Applied Multivariate Research, Design and Interpretation. Sage Publications.
- Mazzei, D'Alessandro, Lucarelli, Nava, Prati, Valli & Vecchi, R. 2008. Characterization of particulate matter sources in an urban environment. *Science of the Total Environment*, **401**(1-3): 81-89.
- Mazzei, D'Alessandro, Lucarelli, Marengo, Nava, Prati, Valli & Vecchi. 2006. Elemental composition and source apportionment of particulate matter near a steel plant in Genoa (Italy). *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, **249**: 548-551
- McDow & Huntzicker. 1990. Vapor adsorption artifact in the sampling of organic aerosol: Face velocity effects. *Atmospheric Environment*, **24**: 2563-2572.
- Oravisjarvi, Timonen, Wiikinkoski, Ruuskanen, Heinanen & Ruuskanen. 2003. Source contributions to PM_{2.5} particles in the urban air of a town situated close to a steel Works. *Atmospheric Environment*, **37**: 1013-122.
- Pacyna & Pacyna. 2001. An assessment of global and regional emissions of trace metals to the atmosphere from anthropogenic sources worldwide. *Environmental Reviews*, **9**: 269-298.
- Paoletti, De Berardis & Diociaiuti. 2002. Physico-chemical characterisation of the inhalable particulate matter (PM₁₀) in an urban area: an analysis of the seasonal trend. *Science of the Total Environment*, **292**(3): 265-275.
- Parek, Ghauri, Siddiqi & Husain. 1987. The use of chemical and statistical methods to identify sources of selected elements in ambient air aerosols in Karachi, Pakistan. *Atmospheric Environment*, **21**(6): 1267-1274.
- Paatero, P. 1997. Least squares formulation of robust, non-negative factors analysis. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, **37**: 23-35.
- Paatero, Hopke, Song & Ramadan. 2002. Understanding and controlling rotations in factor analysis models. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, **60**(1-2): 253-264.
- Paatero, Hopke, Begum & Biswas. 2005. A graphical diagnostic method for assessing the rotation in factor analytical models of atmospheric pollution. *Atmospheric Environment*, **39**(1): 193-201.
- Pierson & Brachaczek. 1983. Particulate matter associated with vehicles on the road. II. *Aerosol Science and Technology*, **2**: 1-40.
- Querol, Alastuey, Rodríguez, Plana, Ruiz, Cots, Massague Puig. 2001. PM₁₀ and PM_{2.5} source apportionment in the Barcelona Metropolitan area, Catalonia, Spain. *Atmospheric Environment*, **35**(36): 6407-6419.
- Ramadan, Eickhout, Xin-Hua, Buydens & Hopke. 2003. Comparison of Positive Matrix Factorization and Multilinear Engine for the source apportionment of particulate pollutants. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, **66**: 15-28.
- Departamento Administrativo de Medio Ambiente (DAMA). Resolución 1208 de 2003.
- Rodríguez S. 2002; Sources and processes affecting levels and composition of atmospheric particulate matter in the Western Mediterranean. Tesis de doctorado de Ingeniería Minera y de Recursos Naturales. Universidad Politécnica de Cataluña.

Roscoe, Hopke, Dattner & Jenks. 1982. The use of principal component factor analysis to interpret particulate compositional data sets. *Journal of the Air Pollution Control Association*, **32**: 637-642

Samara, Kouimtzis, Tsitouridou, Kanias & Simeonov. 2003. Chemical mass balance source apportionment of PM₁₀ in an industrialized urban area of Northern Greece. *Atmospheric Environment*, **37**(1): 41-54.

Sánchez de la Campana, De la Rosa, Querol, Alastuey & Mantilla. 2007. Geochemistry and origin of PM₁₀ in the Huelva region, Southwestern Spain. *Environmental Research*, **103**: 305-316.

Seigneur, Pai, Louis, Hopke & Grosjean. 1997. Review of air quality models for particulate matter. American Petroleum Association.

Seinfeld. 1998. Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change. New York, John Wiley and Sons.

State of Oregon, Department of Environmental Quality. Standard Operating Procedure. 2003.

Stevens, Dzubay, Lewis & Chaw. 1984. Source apportionment methods applied to the determination of the origin of ambient aerosols that affect visibility in forested areas. *Atmospheric Environment*, **18** (2): 261-272.

Tsai Ying & Chien-Lung. 2006. Atmospheric aerosol composition and source apportionments to aerosol in southern Taiwan. *Atmospheric Environment*, **40**: 4751-4763.

Thurston & Spengler. 1985. A quantitative assessment of source contributions to inhalable particulate matter pollution in metropolitan Boston. *Atmospheric Environment*, **19**(1): 9-25.

Tsyro, S.G. 2005. To what extent an aerosol water explain the discrepancy between model calculated and gravimetric PM₁₀ and PM_{2.5}. *Atmospheric Chemistry Physics*, **5**: 515-532.

Turpin, Huntzicker & Hering. 1994. Investigation of organic aerosol sampling artifacts in the Los Angeles basin. *Atmospheric Environment*, **28**: 3061-3071.

Wahlin, Berkowicz & Palmgren. 2006. Characterisation of traffic-generated particulate matter in Copenhagen. *Atmospheric Environment*, **40**: 2151-2159.

Yoshizumi, K. 1990. Source apportionment of aerosols in the Tokyo metropolitan area by chemical element balances. *Energy and Buildings*, **15-16**: 711-717.

Zacarias, Araújo, Córdova, Behrentz, & Vasconcellos. 2008. Water-soluble ions in airborne particles over three South American urban areas. South American Emission Megacities and Climate Workshop. Brasil, April 2-4.

