EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL MATERIAL PARTICULADO EN BOGOTÁ

LUISA FERNANDA BAUTISTA VANEGAS

Trabajo de tesis para optar al titulo de
Magister en Ingeniería

Asesor
Eduardo Behrentz, Ph. D.

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C.
2010

AGRADECIMIENTOS

A Dios, a mis padres por su apoyo incondicional en el desarrollo de este trabajo. A mis hermanas y sobrinas por el interés, ayuda y compañía.

A Eduardo Behrentz por haber aceptado ser mi asesor de tesis, por sus consejos profesionales y personales.

A Mónica Espinosa por su gran ayuda durante el desarrollo de esta investigación, por su paciencia y toda la información suministrada.

Al personal del laboratorio ambiental de la Universidad de los Andes, por su colaboración en la etapa de análisis químico, especialmente a Edna Lorena Delgado, Olga Lucía Gómez y Nancy Janneth Henao.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN 6
1. OBJETIVOS 7
1.1. Objetivo general 7
1.2. Objetivos específicos 7
2. ANTECEDENTES 8
3. METODOLOGÍA 11
3.1. Planeación de la campaña de campo 11
3.1.1 Definición de los criterios de selección de los puntos de monitoreo 11
3.1.2 Selección de puntos de monitoreo 12
3.2. Ejecución de la campaña de campo 17
3.2.1. Instrumentos, equipos y materiales para la recolección de muestras 17
3.2.2. Recolección de muestras 17
3.3. Determinación de la concentración de material particulado 18
3.4. Análisis químico de las muestras de material particulado 19
3.4.1. Cuantificación de iones presentes en las muestras de material particulado 19
3.4.2. Cuantificación de metales presentes en las muestras de material particulado 19
3.5. Análisis de resultados 20
4. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS 21
4.1. Concentración de material particulado en los puntos de monitoreo 21
4.2. Concentración de iones en muestras de material particulado de Bogotá 24
4.3. Concentración de metales en muestras de material particulado de Bogotá 31
5. ANALISIS DE INCERTIDUMBRE 38
CONCLUSIONES 39
RECOMENDACIONES 41
BIBLIOGRAFIA 42

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de la metodología 11
Figura 2. Ubicación de los puntos de monitoreo 12
Figura 3. Punto de monitoreo de la zona industrial de Puente Aranda 13
Figura 4. Punto de monitoreo de la zona industrial de Fontibón 13
Figura 5. Punto de monitoreo de la zona residencial de Pasadena 14
Figura 6. Punto de monitoreo de la zona residencial de Santa Isabel 14
Figura 7. Punto de monitoreo de la zona residencial de Chapinero 15
Figura 8. Punto de monitoreo de la zona con influencia de alto trafico vehicular (Av. Suba) 15
Figura 9. Punto de monitoreo ubicado en el campus universitario (Universidad de los Andes) 16
Figura 10. Muestreador de alto volumen empleado en la determinación de $PM_{2.5}$ 17
Figura 11. Concentración de PM_{10} y $PM_{2.5}$ en los puntos de monitoreo 21
Figura 12. Razón $PM_{2.5}/PM_{10}$ en los puntos de monitoreo 22
Figura 13. Contenido de iones en la fracción respirable del material particulado de Bogotá 26
Figura 14. Contenido de iones en la fracción fina del material particulado de Bogotá 26
Figura 15. Contenido porcentual de aniones en el PM_{10} de Bogotá 27
Figura 16. Contenido porcentual de aniones en el $PM_{2.5}$ de Bogotá 28
Figura 17. Distribución de aniones en las fracciones del material particulado en Bogotá 29
Figura 18. Comparación del contenido de iones en el material particulado de Bogotá 30
Figura 19. Contenido de metales en muestras de la fracción respirable del material particulado 33
Figura 20. Contenido de metales en muestras de la fracción fina del material particulado 33
Figura 21. Contenido porcentual de especies metálicas en el PM_{10} de Bogotá 34
Figura 22. Contenido porcentual de especies metálicas en el $PM_{2.5}$ de Bogotá 34
Figura 23. Comparación del contenido de metales en el material particulado de Bogotá 36

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Descripción de los puntos de monitoreo 16
Tabla 2. Matriz experimental de la campaña de campo.....18
Tabla 3. Concentración de material particulado.....23
Tabla 4. Contenido de iones en las fracciones del material particulado.....25
Tabla 5. Contenido de metales en la fracción respirable del material particulado.....32
Tabla 6. Contenido de metales en la fracción fina del material particulado.....32
Tabla 7. Contenido porcentual de metales en las fracciones del material particulado.....35

INTRODUCCIÓN

El material particulado (PM) es un contaminante de gran interés en el estudio de la calidad del aire de la ciudades. En Bogotá es considerado como el principal factor que genera problemas de calidad del aire en la ciudad, de acuerdo con los datos reportados en la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB).

De acuerdo con la literatura científica, en los grandes centros urbanos la exposición al material particulado representa un riesgo significativo sobre la salud de la población. Los efectos están asociados a sus características físicas y químicas (Dockery et al., 1993; Pope et al., 2002; Valavanidis et al., 2006;). Algunos estudios indican que la fracción fina del PM es más peligrosa para la salud humana (Schwartz et al., 1996; Chow et al., 2002; Fernandez et al., 2003).

Asimismo, considerando el contenido de especies químicas que se pueden adherir al contaminante, la inhalación de partículas con contenido de iones y metales puede producir diferentes efectos sobre la salud de la población expuesta. Según la Agencia para Sustancias Toxicas y Registro de Enfermedades (ATSDR), la inhalación de partículas de aluminio puede generar problemas en el sistema nervioso, relacionado con la enfermedad de Alzheimer. En el caso de inhalar partículas que contienen cromo se puede producir problemas respiratorios como asma, tos o respiración jadeada. La inhalación de níquel puede generar bronquitis crónica y alteraciones a nivel celular en el pulmón. En cuanto al contenido de especies iónicas, la literatura científica ha determinado que la inhalación de partículas de sulfato, genera en los niños alergias respiratorias, asociadas a bajos niveles de capacidad pulmonar (Stern et al., 1989).

De igual manera, la identificación de las principales fuentes de emisión del contaminante en estudio, es un factor relevante en la planeación de las políticas de control de la contaminación en la ciudad. Dentro de estas fuentes se incluye la importancia del polvo resuspendido proveniente del suelo natural o alimentado por la actividad vehicular, que influye en la concentración de la fracción respirable de material particulado y en el contenido de especies metálicas como aluminio, hierro, calcio, potasio, magnesio, entre otros. Las emisiones de tipo vehicular e industriales tiene una alta relación con el contenido de plomo, cobre, zinc, níquel y especies iónicas como sulfato, nitrato y cloruros presentes en el material particulado (Chow, 1995; SDA-CIIA, 2008).

Teniendo en cuenta la problemática, surge la necesidad de conocer más en detalle las propiedades de las partículas presentes en la atmosfera de Bogotá. Por esta razón el presente trabajo pretende evaluar las características físicas y químicas del material particulado a nivel de exposición personal a los que se encuentran sujetos los habitantes de la ciudad.

1. OBJETIVOS

1.1. Objetivo general

Evaluar las características físicas y químicas de la fracción respirable y fina del material particulado presente en la atmosfera de la ciudad de Bogotá, contemplando su concentración y el contenido de especies químicas a nivel de exposición personal.

1.2. Objetivos específicos

- Realizar una campaña de campo para la recolección de muestras de material particulado en su fracción fina y respirable, en diferentes zonas de la ciudad de Bogotá.
- Determinar el contenido de iones y metales en muestras de material particulado recolectadas en diferentes lugares de la ciudad.
- Realizar un análisis comparativo de las características físicas y químicas del material particulado presente en Bogotá con la información reportada en literatura indexada.

2. ANTECEDENTES

El material particulado presente en la atmósfera se encuentra asociado con el aumento en la incidencia de enfermedades respiratorias y cardiovasculares, para la población expuesta a este contaminante (Dockery et al., 1993; Schwartz J, 1994; Seaton et al., 1995; Pope et al., 2002). Lo anterior se atribuye a sus propiedades físicas y la toxicidad de las diferentes especies químicas que lo componen (Ghio, 2004).

Actualmente existen diversas técnicas de análisis fisicoquímico para caracterizar el material particulado, se han desarrollado estudios enfocados hacia la identificación y cuantificación de las concentraciones de este contaminante presente en el aire, la distribución del tamaño y el contenido de metales, iones y compuestos orgánicos. Los resultados de estas investigaciones han permitido establecer el nivel de contaminación por material particulado y por lo tanto han sido útiles en la formulación de las políticas de calidad del aire.

Röösli et al. (2000), realizó un estudio sobre la variación espacial y temporal de la composición química de la fracción respirable del material particulado en diferentes zonas rurales y urbanas de Suiza. Para la recolección de las muestras fue utilizado un muestreador de alto volumen. Los compuestos químicos (metales, iones y carbono elemental) se determinaron por medio de método de espectrometría estándar, espectroscopia de emisión atómica de plasma acoplado por inducción y cromatografía iónica. De acuerdo a los resultados, se presentaron altas concentraciones de calcio, carbono elemental, titanio, hierro y manganeso, especialmente en los días laborales, según el autor este comportamiento indica que estos componentes se generan principalmente por actividades antropogénicas.

Bilos et al. (2001), caracterizó y aplicó la metodología de espectrometría de absorción atómica para determinar las concentraciones de 10 especies de metales contenidas en muestras de partículas suspendidas, obtenidas en cuatro zonas de La Plata (Argentina), incluyendo el puerto, una zona residencial, industrial y el centro de la ciudad. Según los resultados, la concentración de cobre, zinc, cadmio y plomo presenta altos valores en la estación de monitoreo del centro reflejando la importancia de las emisiones vehiculares provenientes del tubo de escape. De manera posterior se realizó un análisis comparativo de las concentraciones obtenidas con los niveles cuantificados en otras zonas del mundo, indicando altos valores para hierro y calcio.

Celis et al. (2003), empleó las técnicas analíticas de emisión de rayos X inducida por partículas (PIXE) y de espectrometría de fluorescencia de rayos X (XRF) para hallar la concentración de 25 especies de metales y el método de cromatografía iónica para determinar y cuantificar 3 especies de iones, adheridas al PM_{10} presente en tres zonas incluyendo residencial, comercial e industrial de la ciudad de Chillan (Chile). De esta manera, se demostró que las mayores concentraciones de la fracción respirable del material particulado se presentan en el centro de la ciudad durante los meses de invierno, asimismo se determinó que los principales constituyentes son en su orden materia orgánica, nitrato, carbono elemental, amonio, sulfato, potasio, silicio, hierro, calcio y aluminio, provenientes del alto tráfico de la ciudad, fuentes fijas y vías sin pavimentar.

Arbilla et al. (2003) analizó 43 muestras de partículas suspendidas totales (PST) presente en tres sectores que incluye residencial, industrial y comercial del distrito industrial de Santa Cruz de la ciudad de Río de Janerio (Brasil). Las especies metálicas fueron determinadas por medio del método de espectroscopia de emisión atómica por plasma acoplado inductivamente. Dentro del estudio se compararon las concentraciones de los compuestos con los límites establecidos por estándares internacionales, los niveles de plomo, manganeso, cromo y níquel excedieron la norma de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), mientras que los valores promedio de cadmio y níquel se encontraron por debajo del estándar. Al tener en cuenta los valores establecido por la

Organización Mundial de la Salud (OMS), la concentración de níquel es mayor que el valor límite de riesgo para cáncer de pulmón.

Como parte de este mismo estudio, las concentraciones obtenidas fueron comparadas con valores registrados en otros lugares del mundo, encontrando que la concentración de hierro excede los valores reportados en ciudades como Chicago (Estados Unidos) y Beijing (China). De manera similar se comporta la concentración de zinc, al ser comparada con otras áreas industriales de Chicago y de Tito Scalo (Italia).

Ho et al. (2003), realizó la caracterización química de 70 filtros de cuarzo con muestras de PM_{10} y $PM_{2.5}$, cuantificando elementos metálicos, iones y carbono elemental presentes en tres zonas de la ciudad de Hong Kong, que incluye una zona de alto tráfico vehicular, una industrial y una estación de monitoreo de referencia; empleando las técnicas analíticas de espectrometría de absorción atómica, cromatografía de iones, espectrometría de emisión atómica y de masas. De esta manera, se encontró altas concentración de plomo y cobre en las zonas de alto tráfico vehicular e industrial, lo cual indica que estos elementos provienen principalmente de emisiones antropogénicas. En cuanto a los iones, el sulfato es el principal constituyente en ambas fracciones del material particulado.

Chen et al. (2003), llevó a cabo un estudio para cuantificar la composición química de muestras de material particulado menor a 10 micras recolectadas en cuatro zonas al sur de la ciudad de Taiwan (China), utilizando los métodos de cromatografía iónica y espectroscopia de emisión atómica con plasma acoplado. Los resultados indican que las especies iónicas como sulfato, nitrato, amonio y cloruro predominan en las muestras de los cuatro lugares monitoreados. Asimismo, se estableció que las concentraciones de sodio y magnesio registran los mayores valores en zonas donde se presentan emisiones naturales provenientes del mar, en sectores industriales se registraron los mayores valores para zinc, hierro, plomo y silicio.

Lonati et al. (2004) determinó los componentes químicos de la fracción fina del material particulado ($PM_{2.5}$) de la ciudad de Milan (Italia), los lugares de monitoreo seleccionados contemplan el centro de la ciudad y una zona con alto tráfico vehicular. Para la recolección de las muestras fue utilizado el muestreador de alto volumen gravimétrico DIGITEL DA-80H, la caracterización química incluyó el análisis de las concentraciones de iones, compuestos orgánicos y especies elementales presentes en las muestras, determinadas por medio de técnicas como cromatografía líquida de alta presión y espectrometría de energía dispersiva de fluorescencia de rayos X. Al tener en cuenta los valores registrados en los dos lugares seleccionados, las mayores concentraciones de las especies iónicas analizadas se presentan en el sitio de alto tráfico vehicular, lo anterior coincide con los altos valores de concentración de $PM_{2.5}$ del lugar. En el centro de la ciudad, la materia orgánica y el nitrato son los compuestos de mayor contribución.

Viana et al. (2006), seleccionó las ciudades de Barcelona y Tarragona (España) para caracterizar el material particulado (PM_{10} y $PM_{2.5}$) generado principalmente por el alto tráfico vehicular y la industria. Las muestras fueron recolectadas en equipos de alto volumen y posteriormente analizadas por medio de técnicas de cromatografía iónica, espectrometría de emisión atómica por plasma y espectrometría de masas por plasma acoplado. Dentro de los resultados, se obtuvo la cuantificación de diferentes compuestos, siendo el carbono elemental, la materia orgánica, el sulfato, el nitrato las especies de mayor contribución en ambas fracciones de material particulado y para las dos zonas consideradas en cada ciudad. En cuanto a los metales, los elementos que registraron las mayores concentraciones fueron cobre, zinc, cadmio, antimonio, bario y plomo. Al comparar las concentraciones de ambas fracciones del material particulado, en Barcelona se presenta los valores más altos en comparación con los datos registrados en la ciudad de Tarragona, debido a la alta influencia del tráfico vehicular.

Shah & Shahenn (2007), analizaron el contenido de 10 metales presentes en muestras de material particulado de diferentes fracciones recolectadas en la ciudad de Islamabad (Pakistán), por medio de

la técnica analítica de espectrometría de absorción atómica. Las concentraciones de hierro, sodio, zinc, potasio y plomo registran la mayor contribución a la masa total especialmente en las muestras de partículas entre 10 y 15 micras y aquella provenientes de zonas industriales y de alto tráfico vehicular. Dentro de este mismo estudio, se comparó los niveles de las especies metálicas con valores reportados en otras zonas urbanas del mundo, determinando que las concentraciones del grupo analizado son considerablemente mayores que las encontradas en ciudades como Debrecen (Hungría), Detroir (Estados Unidos), Frankfurt (Alemania) y Birmingham (Reino Unido), entre otros.

Saitoh et al. (2008) identificó y cuantificó los principales componentes químicos contenidos en diferentes fracciones del material particulado presente en el monte Moriyoshi (Japón), mediante las técnicas PIXE y de cromatografía iónica. Se determinó 23 elementos metálicos y 10 especies iónicas, registrando las mayores concentraciones para sodio, aluminio y cloro en la fracción respirable del material particulado durante la época de invierno y para el caso de los iones, las concentraciones de cloruro, nitrato, sulfato, sodio y amonio presentan las mayores contribuciones durante el verano.

Dentro del contexto local, SDA-CIIA (2008), realizó en la ciudad de Bogotá un estudio de caracterización del material particulado y modelos de receptores, contemplando tres zonas de la ciudad: industrial, residencial y con influencia del alto tráfico vehicular. Fueron recolectados un total de 278 filtros con muestras de PM_{10} y $PM_{2.5}$, que posteriormente se sometieron a análisis de cromatografía iónica y espectrometría de emisión óptica por plasma acoplado por inducción, con el fin de determinar el contenido de especies químicas. Dentro de los resultados, se destaca que la zona industrial presenta los más altos niveles de contaminación para la fracción respirable del material particulado. Considerando ambas fracciones, el anión con mayor abundancia en las tres zonas de la ciudad fue el sulfato, seguido del nitrato y el cloruro. Para el caso del PM_{10}, la zona industrial registró las mayores concentraciones para aluminio, bario, calcio, hierro, galio, potasio, magnesio, manganeso, níquel, plomo y zinc. En cuanto a los resultados del modelo de receptores, estos demuestran la gran importancia del polvo y el suelo resuspendido, convirtiéndose en uno de los principales componentes del material particulado que se registra en diferentes zonas de la ciudad.

Con el fin de evaluar el impacto en la calidad del aire generado por las emisiones de los barcos que arriban a la isla de Haulbowline (Irlanda), Hellebust et al. (2009) realizó un estudio para determinar la concentración de PM_{10}, $PM_{2.5}$ y sus principales compuestos químicos, por medio del análisis de cromatografía iónica y espectroscopia de emisión óptica por plasma acoplado. Los principales compuestos inorgánicos presentes en el material particulado fueron sulfato, amonio, nitrato, cloruro y los iones de sodio, generados principalmente por la sal de mar y aerosoles inorgánicos secundarios. Al comprar las concentraciones de las dos fracciones monitoreadas, el $PM_{2.5}$ registra los mayores valores lo cual se atribuye a las emisiones de los buques. Para el caso de los metales adheridos al contaminante, el zinc, magnesio, hierro y calcio, registran las mayores concentraciones y están asociados con las emisiones provenientes de los motores de los buques y barcos por la combustión de compuestos derivados del petróleo.

Los estudios referenciados anteriormente forman parte de un grupo de investigaciones que contemplan las diversas técnicas de caracterización química para la determinación de los principales componentes y el análisis de la contaminación por material particulado en diferentes ciudades. Es importante mencionar otros trabajos realizados para las ciudades de La Coruña (Beceiro-González et al. 1997), Debrecen (Borbély-Kiss et al., 1998), Oporto (Alves et al., 1998), Nueva York (Gao et al., 2002), Mumbai (Venkataraman et al., 2002), Taejon (Kim et al., 2002), Thessaloniki (Tsitouridou et al., 2003), Ciudad de México (Gutiérrez-Castillo et al., 2005), Helsinki (Sillanpää et al., 2005), Atenas (Manalis et al., 2005) y algunas áreas urbanas de Europa (Sillanpää et al., 2006).

3. METODOLOGÍA

En términos generales, la metodología empleada para el desarrollo del presente estudio, contempla seis etapas: 1) Revisión bibliográfica; 2) Planeación de la campaña de campo; 3) Ejecución de la campaña de campo; 4) Determinación de la concentración del material particulado 5) Análisis químico de metales e iones; 5) Análisis de resultados considerando las características físicas y químicas del material particulado (Ver Figura 1).

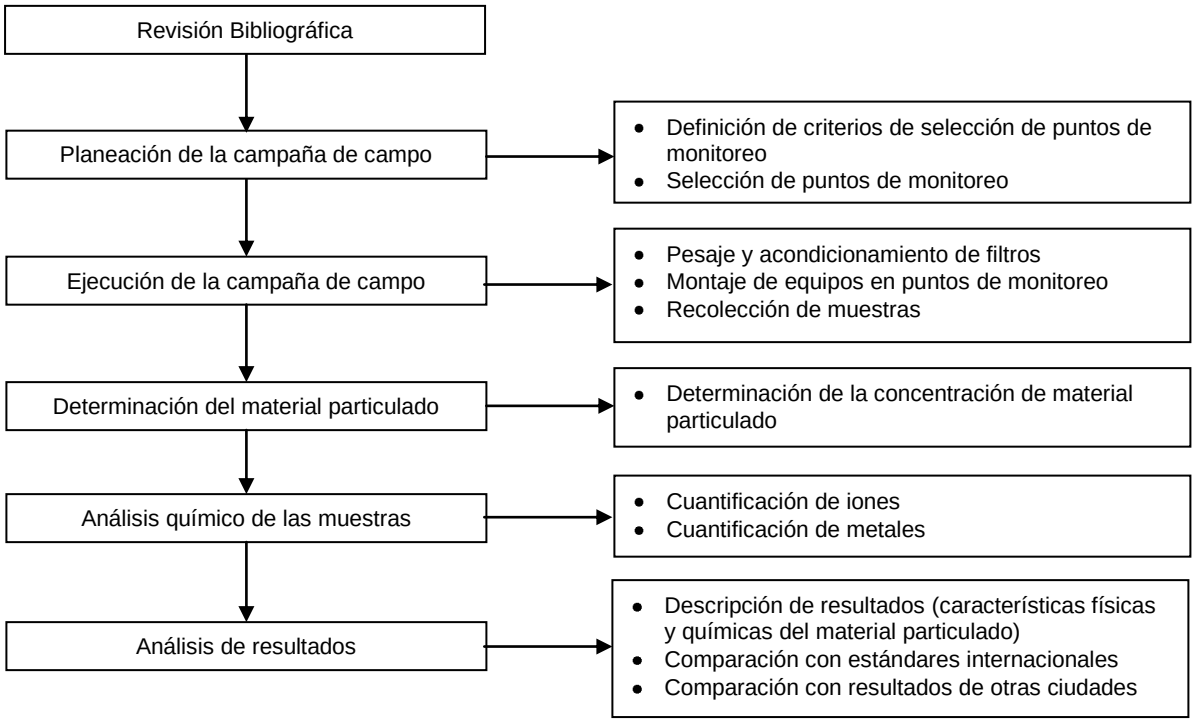


Figura 1. Diagrama de la metodología

3.1. Planeación de la campaña de campo

3.1.1. *Definición de los criterios de selección de los puntos de monitoreo*

Dentro de la planeación de la campaña de recolección de muestras de material particulado en su fracción fina y respirable, se consideró la definición de los criterios de selección de los sitios a monitorear. Dentro de estos criterios se incluyó que los puntos de monitoreo seleccionados debían estar dentro del perímetro urbano de la ciudad, el fácil acceso al lugar para la instalación de los equipos a nivel del suelo, además de tener en cuenta características relacionadas con el flujo vehicular y las actividades desarrollas en el entorno.

Se hicieron recorridos por diferentes sectores de la ciudad con el fin de seleccionar los puntos de muestreo, incluyendo zonas residenciales, con influencia de tráfico vehicular y sectores con alta actividad industrial. Estas tres zonas fueron consideradas con el objetivo de comprar con resultados de estudios anteriores realizado en la ciudad.

Posteriormente se inicio el trámite para obtener los permisos de instalación de los equipos muestreadores en los lugares en los que se requería.

3.1.2. Selección de puntos de monitoreo

Teniendo en cuenta las anteriores consideraciones, se escogieron siete lugares de monitoreo: 1) Dos zonas industriales, con influencia del tráfico de vehículos de carga pesada y servicio de transporte público colectivo y masivo; 2) Tres zonas residenciales, con influencia intermedia del tráfico vehicular; 3) Zona de alto tráfico vehicular, incluyendo transporte público colectivo y masivo, así como vehículos particulares; 4) Zona universitaria con moderada influencia de tráfico vehicular (buses de transporte público colectivo y vehículos particulares).

A continuación se describen detalladamente los puntos de medición seleccionados teniendo en cuenta aspectos que se consideran relevantes en los niveles de contaminación (v.g. presencia de vías y su cercanía, actividades predominantes en el lugar). En la Figura 2 se presenta la ubicación de los puntos seleccionados.

Fuente: www.bogota.gov.co

Figura 2. Ubicación de los puntos de monitoreo

Zonas industriales

Punto de monitoreo 1: el primer lugar de medición seleccionado fue ubicado en la localidad de Puente Aranda situada hacia el centro occidente de la ciudad, específicamente en la Carrera 46 # 13 -18. Esta zona refleja la actividad industrial de la ciudad. Los equipos fueron ubicados al aire libre dentro de las instalaciones administrativas de una industria, cercana a varias vías principales (Calle 13, Avenida las Américas, Carrera 50) con alta presencia de vehículos de transporte de carga, servicio público colectivo y masivo, además de vehículos particulares, predominando los vehículos de transporte masivo y de carga.

No hay influencia directa de las emisiones vehiculares sobre el punto de medición, ya que las paredes de la empresa donde fueron ubicados los equipos intervienen como barrera. Junto al lugar de medición se encuentra una industria de producción de grasas y aceites, los proceso son desarrollados con gas natural y energía eléctrica (Ver Figura 3).

Figura 3. Punto de monitoreo de la zona industrial de Puente Aranda

Punto de monitoreo 2: se ubicó en el sector de Fontibón, situado hacia el occidente de la ciudad, en la Carrera 127 # 22 – 90. La medición se realizo en una vía sin pavimentar y cerrada con escasa presencia de vehículos, sin embargo cerca al lugar se encuentran vías principales de tránsito vehicular (Calle 13 y Calle 26), en las que predominan los vehículos de carga y transporte público colectivo. Al igual que en el punto de medición anterior, no hay influencia directa de las emisiones provenientes de las vías de alto trafico de la zona, ya que los equipos fueron ubicados dentro de un complejo industrial, cuya paredes actúan como barrera. Los equipos fueron instalados a las afueras de una planta de reencauche de llantas de vehículos de carga, la mayoría de procesos se realizan con energía eléctrica (Ver Figura 4).

Figura 4. Punto de monitoreo de la zona industrial de Fontibón

Zonas residenciales

Punto de monitoreo 3: ubicado en el barrio residencial de Pasadena, hacia el norte de la ciudad. Los equipos fueron instalados en la Carrera 51 # 103B – 65, sobre una vía de bajo flujo vehicular. Sin embargo la zona está rodeada de vías principales (Calle 100, Autopista Norte, Avenida Suba) en las que predomina el transporte público colectivo y masivo. No hay influencia directa de las emisiones del tráfico de estas vías, debido a la barrera formada por las edificaciones de lugar.
El sector se encuentra alejado de las zonas industriales de la ciudad y cuenta con algunas zonas verdes alrededor del punto de medición. Es importante mencionar que los equipos fueron ubicados en medio de las entradas a un parqueadero de un edificio residencial (Ver Figura 5).

Figura 5. Punto de monitoreo de la zona residencial de Pasadena

*Punto de monitoreo 4: e*l segundo lugar seleccionado para cuantificar el material particulado presente en una zona residencial, se ubico en el barrio Santa Isabel al sur de la ciudad, en la carrera 31 con calle 1°. Este sector está rodeado de una vía de alto tráfico vehicular (Carrera 30) con presencia de transporte público colectivo y masivo. Los equipos fueron ubicados sobre una vía secundaria donde solo transitan vehículos particulares. La zona limita al norte con el sector industrial de Puente Aranda (Ver Figura 6).

Figura 6. Punto de monitoreo de la zona residencial de Santa Isabel

*Punto de monitoreo 5: e*l tercer punto de monitoreo seleccionado en una zona residencial se ubicó en el sector de Chapinero hacia el centro oriente de la ciudad, en la carrera 19ª con calle 63 C.

Influenciado por emisiones de vehículos de transporte público colectivo y masivo que transitan por vías principales (Calle 63, Avenidas Caracas) cercanas al lugar. Aunque estas emisiones no afectan directamente debido a la barrera formada por el conjunto de casas que se encuentran alrededor del

lugar de medición. Los equipos fueron instalados a las afueras de una casa situada en la intersección de dos vías secundarias donde transitan únicamente vehículos particulares (Ver Figura 7).

Al finalizar la jornada de medición se presentó un incendio en los cerros orientales, se observó humo y cenizas en el lugar. Esta zona se encuentra alejada de los sectores industriales de la ciudad.

Figura 7. Punto de monitoreo de la zona residencial de Chapinero

Zona de alto tráfico vehicular

Punto de monitoreo 6: para el caso de la zona de alto tráfico se escogió la Avenida Suba con Calle100, en un club social y deportivo. El sector es residencial y comercial, alejado de las zonas industriales, con presencia predominante de transporte público colectivo y masivo. El monitoreo fue realizado durante periodo de tiempo que incluyó horas pico y valle del tránsito vehicular.

Los equipos fueron instalados al aire libre a una distancia de tres metros de la vía principal (Av. Suba). Es importante mencionar que en la zona se presentaron lluvias el día anterior a la jornada de monitoreo (Ver Figura 8).

Figura 8. Punto de monitoreo de la zona con influencia de alto trafico vehicular (Av. Suba)

Campus universitario

Punto de monitoreo 7: Los equipos fueron instalados en el primer piso de la facultad de Ingeniería de la Universidad de los Andes, al oriente de la ciudad, sobre una vía secundaria de tráfico moderado, donde transitan principalmente vehículos de servicio público colectivo (Ver Figura 9).

Figura 9. Punto de monitoreo ubicado en el campus universitario (Universidad de los Andes)

En la Tabla 1 se presenta un resumen de las características de los puntos de monitoreo incluidos en la campaña de campo.

Tabla 1. Descripción de los puntos de monitoreo

Punto de monitoreo	**Tipo de zona**	**Ubicación**	**Tráfico vehicular de la zona**	**Tipo de transporte predominante**	**Características y/o condiciones en el punto de monitoreo**
1	Industrial	Puente Aranda centro occidente	Alto	Carga, público colectivo y masivo	Cercanía a industria de grasas Los equipos se ubicaron dente de instalaciones administrativas
2	Industrial	Fontibón occidente	Alto	Carga, público colectivo	Vía sin pavimentar y cerrada Los equipos se ubicaron al frente de una planta reencauchadora
3	Residencial	Pasadena nororiente	Moderado	Público colectivo, vehículos particulares	Los equipos se ubicaron a la salida de parqueaderos de un edificio residencial
4	Residencial	Santa Isabel sur oriente	Moderado	Público colectivo y masivo	Cercanía a industria litográfica
5	Residencial	Chapinero oriente	Moderado	Público colectivo y masivo	Tránsito de vehículos particulares Se presentó incendio en cerros orientales
6	Con influencia de tráfico vehicular	Avenida Suba nororiente	Alto	Público colectivo, masivo y vehículos particulares	Los equipos fueron ubicados a 3 metros de la vía principal sin intervención de barrera física
7	Campus universitario	U. de los Andes oriente	Moderado	Público colectivo y vehículos particulares	Los equipos fueron ubicados a 7 metros de la vía principal de la zona

3.2. Ejecución de la campaña de campo

3.2.1. Instrumentos, equipos y materiales para la recolección de muestras

Para el desarrollo de la fase de campo se utilizaron dos equipos muestreadores de alto volumen, uno para la recolección de material particulado menor a 10 micras (Hi-Vol PM_{10}), marca Graseby/GMW, referencia 1200 con controlador volumétrico de flujo (CVF) y el otro para tomar muestras de material particulado menor a 2.5 micras (Hi-Vol $PM_{2.5}$), equipo marca Tisch Environmental, referencia TE-6070-2.5-HVS. (Ver Figura 10)

Figura 10. Muestreador de alto volumen empleado en la determinación de $PM_{2.5}$

En la selección de los filtros se tuvo en cuenta criterios definidos en estudios similares realizados anteriormente en la ciudad de Bogotá (SDA-CIIA, 2008) dentro de los que se encuentran: el tipo de análisis a los que serian sometidos los mismos, que en este caso son utilizados para determinar iones y metales; la estabilidad química, térmica y mecánica, la eficiencia de recolección de partículas.

Con lo anterior, se decidió el uso de filtros de cuarzo para la recolección de material particulado en sus dos fracciones (PM_{10} y $PM_{2.5}$), marca Whatman, referencia QMA-1851-865, con tamaño de 20.3 cm x 25.4 cm y un espesor de 0.45 mm. Estos filtros presentan una alta eficiencia a la recolección de partículas y una amplia gama de análisis, sin embargo contiene altos niveles de silicio, aluminio, sodio y absorbe vapores orgánicos.

Adicionalmente, durante las jornadas de medición se utilizaron manómetros para determinar la presión del la bomba de succión, termómetro para establecer la temperatura ambiente, balanza analítica con 5 dígitos de precisión y guantes de nitrilo para manipular los filtros.

3.2.2. Recolección de muestras

Dentro de la campaña de campo, se incluyó el acondicionamiento y pesaje de los filtros blanco que serían utilizados para la recolección de las muestras, teniendo en cuenta condiciones de temperatura y humedad relativa controladas, de acuerdo con lo estipulado en el Apéndice B de la parte 40 del Código Federal de Regulación de los Estados Unidos.

El acondicionamiento se llevó a cabo durante 24 horas para luego pesar cada filtro a utilizar. Estos procesos se realizaron en el "cuarto de temperatura y humedad controladas" del laboratorio de aire de la Universidad de los Andes, que garantiza las condiciones requeridas de acuerdo a este Código.

Al finalizar cada jornada de monitoreo los filtros con muestra fueron sometidos nuevamente a un acondicionamiento durante 24 horas y pesados, con el fin de determinar la masa recolectada. Es importante mencionar que en estos procedimientos, los filtros fueron manipulados con guantes de nitrilo para evitar la contaminación de los mismos fuera de los puntos de monitoreo.
Antes de trasladar los equipos a la zona de estudio, fueron instalados los filtros en cada portafiltros, con el objetivo de evitar la captura de partículas fuera del lugar de muestreo. En el lugar de monitoreo, se ubicaron los equipos a nivel del suelo, asimismo antes de iniciar cada jornada de medición se calibró cada equipo en el lugar para verificar el flujo de operación.

Al iniciar la operación de los equipos, se registró la temperatura y presión ambiental, así como el flujo a través del filtro (presión de la bomba de succión), obtenido con la lectura del manómetro. Durante la jornada de muestreo se verifico la presión de la bomba con frecuencia para descartar la saturación del filtro.

Entre febrero y marzo del 2010, se recolectó un total de 18 filtros. En cada jornada de muestreo se recogieron dos muestras, correspondientes a PM_{10} y $PM_{2.5}$. Los muestreos se llevaron a cabo durante jornadas de 12 horas continuas. En la Tabla 2 se presenta la matriz experimental utilizada:

Tabla 2. Matriz experimental de la campaña de campo

Punto de Monitoreo	Tipo de Zona	Lugar especifico	Fecha de Monitoreo
1	Zona industrial	Puente Aranda	17/02/2010 y 18/02/2010
2	Zona industrial	Fontibón	09/03/2010
3	Zona residencial	Santa Isabel	27/02/2010
4	Zona residencial	Pasadena	26/02/2010 y 27/02/2010
5	Zona residencial	Chapinero	05/03/2010
6	Zona alto tráfico vehicular	Avenida Suba	11/03/2010
7	Zona universitaria	Centro	15/03/2010

Es importante señalar que la mediciones no fueron realizadas de manera simultánea en los diferentes puntos de monitoreo y fueron realizadas durante los días hábiles de la semana.

Una vez finalizado el monitoreo, se registró nuevamente la presión de succión, para calcular el caudal del aire, variable necesaria para determinar la concentración de partículas presentes en el lugar. Los filtros fueron retirados de los equipos utilizando guantes de nitrilo y depositados en bolsas herméticas para evitar la pérdida de muestras y contaminación con material particulado proveniente de otros lugares. Inmediatamente fueron transportados al cuarto de acondicionamiento.

3.3. Determinación de la concentración de material particulado

La concentración del material particulado en las dos fracciones consideradas en el presente estudio, se determinó teniendo en cuenta la masa recolectada en cada filtro durante el muestreo (M_{PM}), y el volumen de aire muestreado a condiciones estándar ($V_{std\ aire}$), de acuerdo con la ecuación 1.

$$C_{PM} = \frac{M_{PM}}{V_{std\ aire}} \quad \text{Ecuación 1}$$

La masa recolectada se obtiene a partir de la diferencia de peso del filtro antes y después de tomar la muestra. El volumen de aire muestreado se calcula con el flujo de operación del equipo y el tiempo de muestreo, según la ecuación 2.

$$V_{std\ aire} = Q \times t \quad \text{Ecuación 2}$$

En donde:

$V_{std\ aire}$= volumen de aire muestreado (ajustado a condiciones estándar)
Q = caudal de aire que pasa por el equipo
t = tiempo de muestreo

El caudal de aire es un valor promedio estimado de acuerdo con los datos reportados en las tablas de caudales teóricos ajustadas por el fabricante del equipo según la fracción de material particulado a recolectar.

Para determinar este valor medio se ingresa a la tabla con la temperatura ambiente y la razón Po/Pa, medidos y calculados al iniciar y finalizar el muestreo, así se obtiene dos valores de caudal que luego son promediados. La razón de presión se calcula de acuerdo con la ecuación 3.

$$\frac{P_0}{P_a} = \left(1 - \frac{P_f}{P_a}\right) \quad \text{Ecuación 3}$$

En donde:

Pa = presión atmosférica (mmHg)
Pf = diferencia de presión a través del filtro (mmHg)

3.4. Análisis químico de las muestras de material particulado

Al finalizar la campaña de campo, las muestras fueron enviadas al laboratorio ambiental de la Universidad de los Andes para su respectivo análisis químico. A continuación se mencionan los procesos y equipos utilizados durante esta fase de análisis.

3.4.1. Cuantificación de iones presentes en las muestras de material particulado

En este caso, se cuantificó 6 especies de aniones, incluyendo bromuro, cloruro, fluoruro, nitrato, nitrito y sulfato. Para la cuantificación fue empleado el proceso de cromatografía iónica, al cual fue sometido un total de 15 muestras que incluyen 1 filtro blanco sin muestra y 14 filtros con muestra.

Dentro de los equipos utilizados en esta etapa de análisis se incluyo un baño ultrasonido, marca Elma referencia LC130H que facilita el proceso de extracción. Para determinar el contenido de iones, se sometieron las muestras a un sistema de cromatografía iónica, marca Dionex referencia ICS-2000, que permite la determinación de iones a través de un detector de conductividad.

3.4.2. Cuantificación de metales presentes en las muestras de material particulado

Respecto a los metales, se cuantificó 26 especies incluyendo aluminio, arsénico, bario, boro, bismuto, calcio, cadmio, cobalto, cromo, cobre, hierro, galio, indio, mercurio, plata, potasio, magnesio, manganeso, sodio, níquel, plomo, estroncio, talio y zinc.

El proceso de extracción fue realizado siguiendo el Método I.O 3.1 de la EPA, posteriormente se empleo la técnica analítica de Espectroscopia de Emisión Óptica de Plasma Acoplado por Inducción (ICP-OES, por sus siglas en ingles), siguiendo el procedimiento establecido por el Método I.O 3-4 de la EPA. La secuencia de análisis incluyo un total de 15 muestras, conformadas por 14 filtros con muestra y un filtro blanco.

Fue utilizado un equipo microondas, marca CEM referencia MARSX, que permite la extracción y digestión de metales de las muestras a analizar. Para la determinación del contenido de metales fue utilizado un espectrómetro de emisión óptica**,** marca ICAP 6500 Duo marca Thermo Electron. Este basa su funcionamiento en la excitación de átomos mediante su paso por un plasma formado con el uso de gas argón. Los átomos ya excitados emiten fotones a longitudes de onda específicas para cada elemento metálico. Estas longitudes son identificadas por medio del sistema óptico con el que cuenta el equipo.

En el Anexo 1 se presentan las líneas de emisión seleccionadas para cada metal y en el Anexo 2 se incluye los valores de los límites de detección tanto para las especies iónicas como para los metales analizados.

3.5. Análisis de resultados

Una vez calculadas las concentraciones de PM_{10}, $PM_{2.5}$ y el contenido de las diferentes especies químicas presentes en las muestras recolectadas, se realizó un análisis descriptivo de los resultados destacando las zonas en las cuales se presentan las mayores concentraciones de material particulado y los más altos niveles de las diferentes especies de iones y metales cuantificados.

Asimismo, los resultados obtenidos en el presente estudio, fueron comparados con datos reportados en estudios anteriores, tomando como referencia la investigación desarrolla en Bogotá en el año 2007 (SDA-CIIA, 2008). Se tuvo en cuenta los datos de las concentraciones promedio de material particulado y el contenido de iones y metales presentes en muestras de la fracción respirable y fina provenientes de los diferentes lugares seleccionados, los cuales presentan características similares a los sitios escogidos en el presente trabajo.

Posteriormente, los valores fueron confrontados con los niveles máximos permisibles de las concentraciones de material particulado, reglamentados a nivel nacional a través de la Resolución 601 de 2006, a nivel internacional por medio de la EPA. En el caso de las concentraciones de iones y metales se comparó con los estándares establecidos por la EPA y la OMS, específicamente para las concentraciones de plomo, manganeso, cromo y níquel.

Finalmente, se realizó un análisis comparativo con información reportada en otras ciudades del mundo (Los Ángeles, Santiago de Chile, Ciudad de México, Sao Pablo y Buenos Aires), relacionada con la concentración de material particulado y de especies químicas presentes en este contaminante.

4. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados de las concentraciones de material particulado asociadas a la campaña de campo. Posteriormente, serán analizados los resultados de la caracterización química que incluye el contenido de metales y especies de aniones presentes en las muestras recolectadas.

4.1. Concentración de material particulado en los puntos de monitoreo

En la Figura 11 se muestra las concentraciones de la fracción respirable y fina del material particulado en los diferentes puntos de monitoreo.

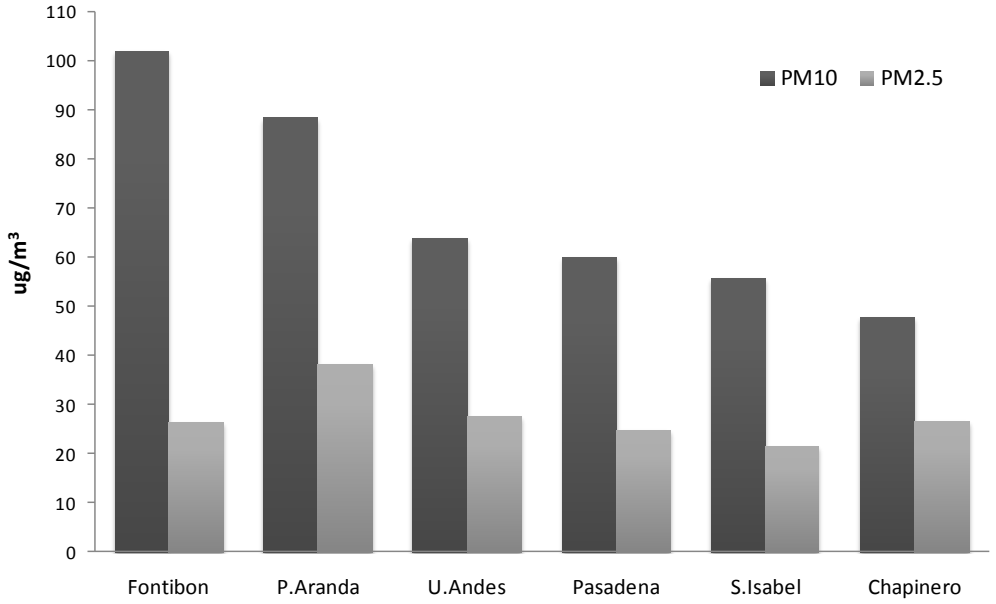


Figura 11. Concentración de PM_{10} y $PM_{2.5}$ en los puntos de monitoreo

De acuerdo con estos resultados, la concentración de PM_{10} se encuentra entre 22 y 102 µg/m^3, mientras que el $PM_{2.5,}$ se encuentra entre 8 y 26 µg/m^3. Teniendo en cuenta los dos puntos ubicados en las zonas Industriales, Fontibón es el lugar en el que se observa el mayor valor con 102 µg/m^3, asimismo este punto es el de mayor concentración de PM_{10} considerando la totalidad de lugares monitoreados. Para el caso de las zonas residenciales, en Pasadena se presenta la mayor concentración de esta fracción del contaminante con 60 µg/m^3, seguida de Santa Isabel con 56 µg/m^3. En Puente Aranda, Chapinero y el campus universitario, se presentan concentraciones de 88, 48 y 64 µg/m^3, respectivamente. La menor concentración se observa en el punto ubicado en la zona de alto tráfico vehicular con 22 µg/m^3.

En cuanto a la concentración de partículas menores a 2.5 micras, Puente Aranda es el lugar de monitoreo ubicado en una de las zonas industriales de la ciudad que presenta el mayor valor con 38 µg/m^3. De las zonas residenciales, en Pasadena se presenta la mayor concentración con 26 µg/m^3, seguida de Santa Isabel con 21 µg/m^3. En el campus universitario, Chapinero y Fontibón, se encuentran valores similares alrededor de 27 µg/m^3. Al igual que en la concentración de PM_{10}, Suba obtiene la menor concentración con 8 µg/m^3.

Al tener en cuenta estos resultados, las zonas industriales son las que presenta los mayores niveles de contaminación por la fracción respirable del material particulado, sin embargo, solo una de estas registra el mayor valor de concentración de la fracción fina (Puente Aranda). Los valores de $PM_{2.5}$ registrados en las zonas residenciales son similares, resultado esperado ya que estos lugares fueron seleccionados bajo los mismos criterios.

Del mismo modo, el punto ubicado en Chapinero registra la segunda concentración más baja de PM_{10}, mientras que para $PM_{2.5}$ es la tercera más alta. Algo similar ocurre en el lugar de monitoreo de Fontibón, que registra la más alta concentración para la fracción respirable y se encuentra dentro del valor promedio de concentración para $PM_{2.5}$. Esto podría ser explicado por el tipo de fuente presente en cada lugar, en el lugar residencial se refleja la presencia de emisiones provenientes de procesos de combustión, mientras que en la zona industrial podría haber mayor contribución de la resuspensión de polvo.

Asimismo, las concentraciones de la fracción gruesa del material particulado que se encuentran en la zona industrial de Fontibón y Puente Aranda son aproximadamente el doble de la que se registra en la zona residencial de Chapinero. Lo anterior se puede atribuir a la influencia que tiene la ubicación de cada punto en la ciudad, ya que los sitios situados al occidente de la ciudad tienden a presentar mayores concentraciones del contaminante; además de tener en cuenta las altas emisiones provenientes del alto tráfico vehicular y de las industrias del sector presentes en estas zonas.

En la Figura 12 se presenta la razón $PM_{2.5}/PM_{10}$, en la cual es posible observar que la concentración de la fracción fina corresponde cerca al 50% de la concentración de la fracción respirable de material particulado presente en la zona residencial de Chapinero, la zona industrial de Puente Aranda y el campus universitario. Mientras que en los puntos de monitoreo ubicados en Pasadena, Santa Isabel se presenta un valor similar, alrededor del 40%.

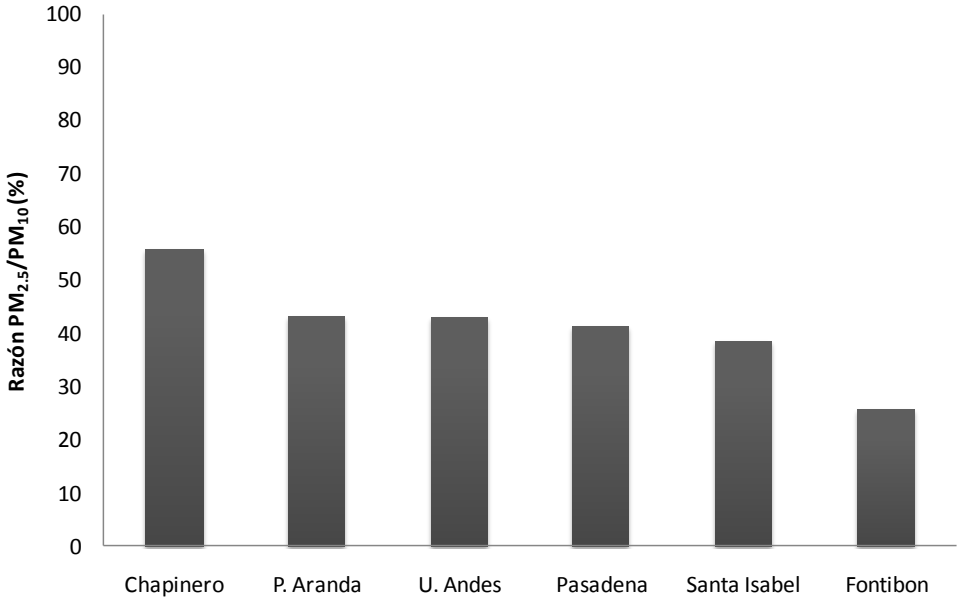


Figura 12. Razón $PM_{2.5}/PM_{10}$ en los puntos de monitoreo

El menor valor se presenta en la zona industrial de Fontibón con 26%, indicando que en este punto de monitoreo se presenta mayor concentración de la fracción respirable del material particulado, siendo 4 veces superior que la concentración de la fracción fina. Este resultado es congruente con lo encontrado por Vega et al. (2001), que evidencia que el $PM_{2.5}$ constituye entre el 20 y 30% del PM_{10}

en vías no pavimentadas, considerando que en este punto de monitoreo los equipos fueron instalados en una vía sin pavimentar.

Los resultados presentados anteriormente evidencian que las concentraciones de material particulado que se encuentran en las zonas industriales monitoreadas superan entre dos y cinco veces los valores registrados en otras zonas de la ciudad. Comportamiento que resulta ser más evidente para la fracción respirable del contaminante en estudio. Como ya se ha mencionado en esta sección, esto puede ser atribuido no solo a las emisiones provenientes de fuentes vehiculares e industriales que se generan en esta parte de la ciudad, sino también de las dinámicas meteorológicas que se observan al interior del perímetro urbano, especialmente a lo que se refiere a la dirección y velocidad del viento.

De acuerdo con la Resolución 601 de 2006, el nivel máximo permisible anual para PM_{10} es de 60 $\mu g/m^3$, al comparar los datos registrados en la campaña de campo, los dos lugares ubicados en las zonas industriales y el campus universitario superan la norma. A su vez, al tener en cuenta el nivel anual establecido por la EPA de 50 $\mu g/m^3$, las concentraciones encontradas en los puntos de monitoreo situados en la zonas industriales, el campus universitario, Pasadena y Santa Isabel exceden este estándar. En ningún caso se excedió la norma diaria de 150 $\mu g/m^3$, límite establecido tanto por la normatividad nacional como por la agencia.

Para el caso de la fracción fina, el estándar anual establecido por la EPA y adoptado por la legislación nacional de 15 $\mu g/m^{3,}$ es superado por las concentraciones registradas en todos los lugares monitoreados a excepción de la Av. Suba. La norma correspondiente al límite diario de 65 $\mu g/m^3$, no es excedido en ningún punto de monitoreo.

Teniendo en cuenta la anterior información, las zonas industriales presentan los niveles más altos de contaminación por material particulado en especial en la fracción respirable, incluso en aquellas zonas donde se presenta una fuerte influencia del tráfico vehicular, registrando valores superiores a los límites establecidos a nivel nacional e internacional. En la Tabla 3 se presentan los resultados de la presente investigación, los datos reportados para Bogotá durante 2007 (SDA-CIIA, 2008) y resultados encontrado en otras ciudades.

Tabla 3. Concentración de material particulado

Estudio	**Tipo de Zona**	**Punto de Monitoreo**	**[PM_{10}]** (ug/m^3)	**[$PM_{2.5}$]** (ug/m^3)
Bogotá 2010	Industrial	Puente Aranda	88	38
		Fontibón	102	26
	Residencial	Pasadena	60	25
		Santa Isabel	56	21
		Chapinero	48	27
	Influencia de tráfico vehicular	Suba	22	8
	Campus universitario	U. Andes	64	27
Bogotá 2007[1]	Industrial	Puente Aranda	110	SD
	Residencial	La Esmeralda	54	26
	Influencia de tráfico vehicular	Suba	53	25
Sao Pablo 2007[2]	Influencia de tráfico vehicular	U. Sao Pablo	38	SD
Buenos Aires 2008[3]	Influencia de tráfico vehicular	CNEA	63	SD
Ciudad de México 2006[4]	Urbana	IMP	95	56
Santiago de Chile 2006[5]	Influencia de tráfico vehicular	Zona Verde	SD	52

SD: Sin Dato; CNEA: Comisión Nacional de Energía Atómica; IMP: Instituto Mexicano de Petróleo
1. SDA-CIIA, 2008; 2. Vasconcellos et al., 2010; 3. Vasconcellos et al., 2010; 4. Múgica et al., 2009; 5. Cakmak et al., 2009

De acuerdo con los datos reportados en el estudio anterior, el punto ubicado en la zona industrial de Puente Aranda registró la mayor concentración de PM_{10} de la ciudad con un promedio de 110 µg/m^3, actualmente esta misma zona obtiene la segunda mayor concentración en esta fracción del contaminante con 88 µg/m^3. Es importante mencionar que los puntos de monitoreo fueron ubicados en sitios diferentes dentro de esta misma zona.

Para ambas fracciones del material particulado, las zonas residenciales presentan valores de concentración similares respecto al valor promedio obtenido para esta zona en el estudio de 2007, comportamiento esperado ya que los lugares presentan características parecidas debido a que los criterios de selección de los puntos de monitoreo son similares en ambos estudios, a pesar de que estos están ubicados en diferentes lugares.

Al comparar los resultados con los datos reportados en otras ciudades, las zonas industriales registran concentraciones de PM_{10} similares a las encontradas en Ciudad de México, el punto de monitoreo en esta ciudad está influenciado en su mayoría por emisiones industriales (Múgica et al., 2009). Fontibón es el único punto de monitoreo que presenta una concentración superior a los valores reportados en la totalidad de las ciudades consideradas en esta comparación. En Sao Pablo y Buenos aires se registran concentraciones menores que las que se presentan en las zonas industriales de Bogotá.

En el caso del $PM_{2.5}$, Ciudad de México y Santiago de Chile presentan valores de concentración mayores que los registrados en todos los puntos de monitoreo del presente estudio, alcanzando concentraciones que duplican los valores registrados en Fontibón, Pasadena, Santa Isabel y Chapinero.

En términos generales, es posible establecer que Bogotá presenta concentraciones de material particulado similares o inferiores a las que se presentan en lugares como Ciudad de México y Santiago de Chile. Lo anterior puede ser atribuido a las características propias de la ciudades y en este caso se podría relacionar con la influencia del tráfico vehicular, en especial en la ciudad de México, donde según estudios el 42% del $PM_{2,5}$ proviene de las emisiones vehiculares (Múgica et al., 2009)

4.2. Concentración de iones en muestras de material particulado de Bogotá

En la Tabla 4 se presentan los resultados de las concentraciones de especies iónicas con carga negativa contenidas en las muestras de material particulado recolectadas en los diferentes puntos de monitoreo y la información reportada en otras ciudades. En las figuras 13 y 14 muestra información similar de manera gráfica.

Tabla 4. Contenido de iones en las fracciones del material particulado

Ciudad	Tipo de Zona	Punto de Monitoreo	PM_{10}				$PM_{2,5}$		
			Cl^- (ng/m3)	F^- (ng/m3)	NO_3^- (ng/m3)	$SO_4^=$ (ng/m3)	Cl^- (ng/m3)	NO_3^- (ng/m3)	$SO_4^=$ (ng/m3)
Bogotá 2010	Industrial	Fontibón	217	< LD	2.258	3.522	< LD	654	1.275
		Puente Aranda	209	< LD	1.458	3.725	125	898	3.303
	Residencial	Pasadena	138	42	5.152	3.708	< LD	2.127	2.131
		Santa Isabel	445	< LD	2.290	3.554	< LD	515	1.142
		Chapinero	96	< LD	1.022	2.405	< LD	733	1.742
	Alto tráfico vehicular	Suba	< LD	< LD	627	1.482	< LD	< LD	596
	Campus universitario	U. Andes	165	< LD	2.566	4.993	--	--	--
Bogotá 2007[1]	Industrial	Puente Aranda	660	30	1.070	1.780	SD	SD	SD
	Alto tráfico vehicular	Suba	110	5	730	920	9	280	530
	Alto tráfico vehicular	La Esmeralda	350	10	1.500	1.610	260	1.250	1.320
Ciudad de México[2]	Urbana	IMP	400	SD	2.600	6.100	200	2.200	4.200
Sao Pablo[3]	Alto tráfico vehicular	U. Sao Pablo	331	< LD	3.353	6.938	SD	SD	SD
Buenos Aires[4]	Alto tráfico vehicular	CNEA	213	SD	845	1.433	SD	SD	SD
Los Ángeles[5]	Residencial	Simi Valley	SD	SD	SD	SD	SD	4.379	3.600
	Urbana	Los Ángeles	SD	SD	SD	SD	SD	6.650	4.500

-- Valor no ajustado a los parámetros de calidad del método de análisis empleados
LD: Límite de detección; SD: Sin dato; IMP: Instituto Mexicano del Petróleo; CNEA: Comisión Nacional de Energía Atómica de Argentina
1. SDA-CIIA, 2008; 2. Múgica et al., 2009; 3. Vasconcellos et al., 2010; 4; Vasconcellos et al., 2010; 5. Kim & Hopke et al., 2007

Los resultados de la concentración de iones presentes en la muestra de $PM_{2.5}$ proveniente del campus universitario fueron eliminados ya que los valores no se ajustaban a los parámetros de calidad del método de análisis empleado.

En el anexo 3 se presentan los resultados de los iones presentes en las muestras de material particulado provenientes de los diferentes puntos de monitoreo.

Para el caso del PM_{10}, los aniones cloruro (Cl^-), nitrato (NO^-_3) y sulfato ($SO^=_4$) registran la mayor concentración en la zona residencial de Santa Isabel, Pasadena y el campus universitario, respectivamente. Asimismo, para el punto de monitoreo de Pasadena se observa que solo en este lugar el fluoruro (F^-) presenta un nivel superior al límite de detección.

En las zonas industriales consideradas en el presente estudio, el anión de mayor abundancia es el sulfato, seguido de nitrato y cloruro. De la misma manera, en la zona de alto tráfico vehicular, el sulfato y el nitrato son las especies que se encuentra en un nivel superior al límite de detección.

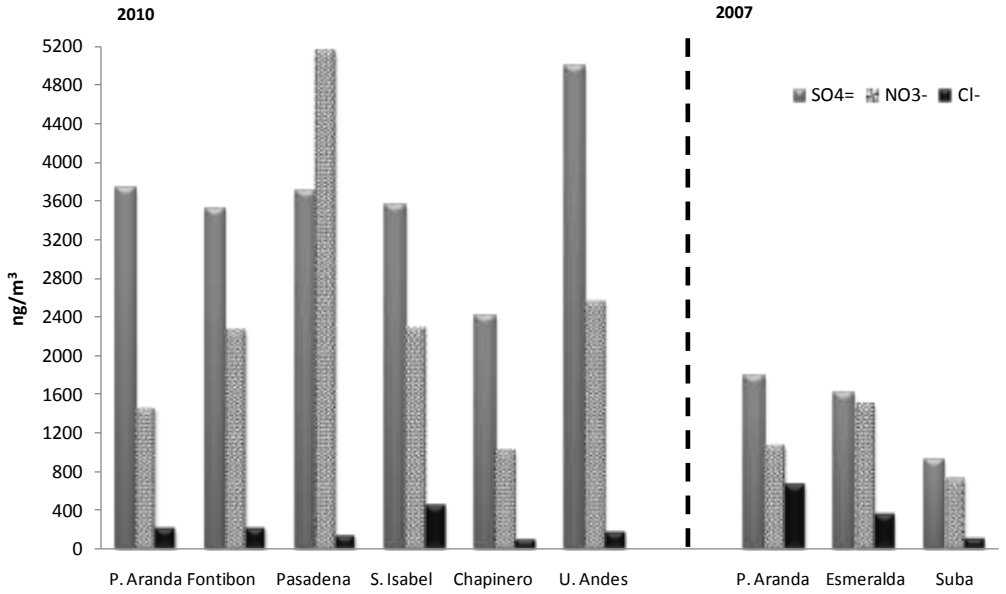


Figura 13. Contenido de iones en la fracción respirable del material particulado de Bogotá

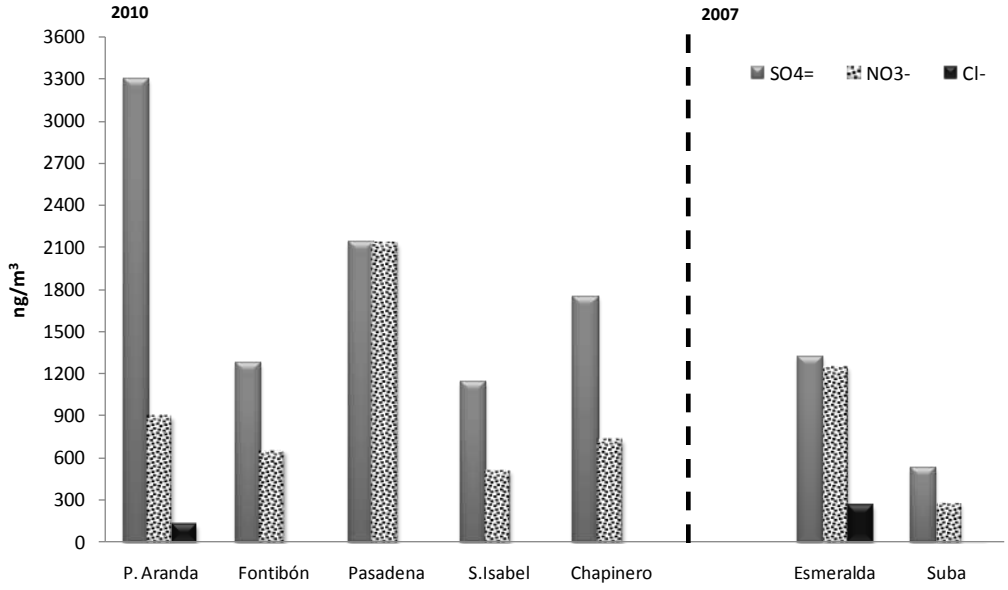


Figura 14. Contenido de iones en la fracción fina del material particulado de Bogotá

Para la fracción fina del material particulado, el sulfato es el anión con mayor presencia en el aire, la máxima concentración de esta especie se presenta en la zona industrial de Puente Aranda, mientras que en Pasadena se registró concentraciones similares para ambos iones.

El nivel de cloruro es inferior al límite de detección en todos los puntos de muestreo, excepto en el punto ubicado en Puente Aranda. Lo anterior coincide con los resultados de estudios realizados en

Bogotá (SDA- CIIA, 2008; Vasconcellos et al., 2010), en los que la zona industrial registra los mayores valores de concentración de cloruro, en los demás puntos de monitoreo este ion presenta valores inferiores al límite de detección. Del mismo modo, las muestras provenientes de la zona residencial de Pasadena mostraron el mayor contenido de nitrato en ambas fracciones del material particulado.

Los iones bromuro y nitrito fueron incluidos dentro del análisis químico, sin embargo los concentraciones en todos los puntos de monitoreo considerados y para ambas fracciones, fueron inferiores al límite de detección de las técnicas analíticas utilizadas. De acuerdo con estudios realizados en otras ciudades del mundo (Saitoh et al., 2008) se evidencia que las fuentes naturales son las principales fuentes de emisión de estos compuestos, sin embargo para establecer su escasa presencia se debe profundizar el origen y las principales fuentes de emisión de estas especies en Bogotá.

Al comparar con los datos reportados en 2007, la zona industrial de Puente Aranda en la actualidad presenta un mayor nivel de sulfato presente en la fracción respirable del material particulado, la concentración de nitrato en el aire en ambos periodos es similar. En la zona de alto tráfico vehicular se registra valores similares en los dos años referenciados, tanto para sulfato como para nitrato y en ambas fracciones del contaminante.

En la figura 15 y 16 se presentan los contenidos porcentuales para los aniones analizados en los filtros recolectados de PM_{10} y $PM_{2.5}$, respectivamente.

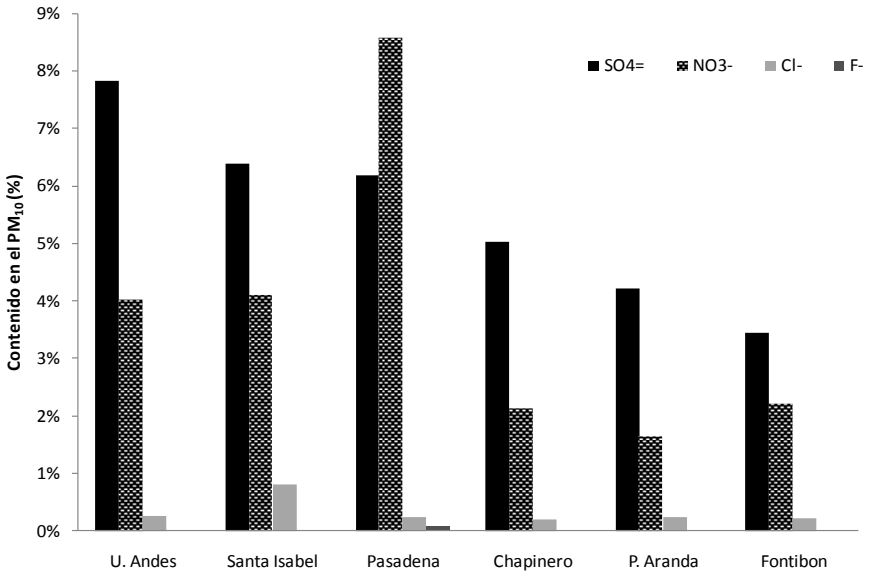


Figura 15. Contenido porcentual de aniones en el PM_{10} de Bogotá

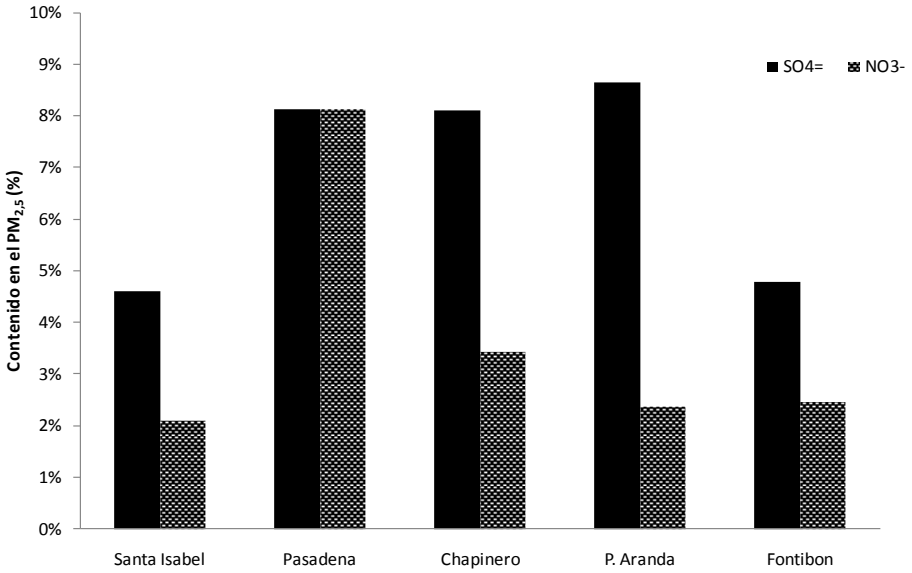


Figura 16. Contenido porcentual de aniones en el $PM_{2.5}$ de Bogotá

De acuerdo con los resultados, es posible determinar que el sulfato es el anión de mayor importancia en cuanto a su contribución al PM_{10}, representado porcentajes entre 3.5 y 7.8% del material particulado. Se observa que para los puntos ubicados en las zonas industriales, este ion representa cerca del 4%, mientras que el nitrato aporta alrededor del 2%; las zonas residenciales presentan porcentajes entre 5 y 6.3% para el caso del $SO_4^{=}$; en Pasadena se observa que el NO_3^- es el ion de mayor importancia con una contribución de 8.5% al material particulado recolectado en este punto de monitoreo. Asimismo, es interesante notar que en el campus universitario se registra el mayor aporte de sulfato con 7.8%.

Para el caso del ion cloruro, este representa un menor porcentaje en cada punto de monitoreo, entre el 0.2 y 0.8%, y solo en la zona residencial de Pasadena se evidencia el aporte de fluoruro con un 0.07%.

De manera general, la contribución de los aniones analizados en las muestras de PM_{10} recolectadas constituyen un total de 5.8 y 6.1% en Puente Aranda y Fontibón, respectivamente. Para el caso de las zonas residenciales, Pasadena presenta el mayor porcentaje con 15%, seguida de Santa Isabel (11.3%) y Chapinero (7.4%). En el campus universitario estas especies contribuyen 12%.

Según los resultados anteriores, las muestras recolectadas en el punto residencial de Santa Isabel y la Universidad de los Andes presentan un contenido de aniones similares, duplicando lo registrado en las zonas con características industriales. Mientras que en Pasadena se presenta la mayor contribución de aniones teniendo en cuenta el total de puntos muestreados. Lo anterior es consistente con el argumento que establece que los iones con mayor contribución en el presente estudio (sulfato y nitrato) provienen principalmente de fuentes móviles y sus procesos de combustión (Borbély-kiss et al.,1998; Lenschow et al., 2001; Gao et al., 2002), reflejando la influencia del tráfico vehicular en estas zonas.

En cuanto al $PM_{2.5}$ al igual que para PM_{10}, el sulfato es el anión de mayor contribución al material particulado (entre 4.6 y 8.7%), registrando el mayor porcentaje en el punto situado en Puente Aranda. Asimismo, en Pasadena y Chapinero el aporte de este ion es similar (8.14 y 8.12%), sin embargo en el punto ubicado en Santa Isabel, el porcentaje registrado es la mitad de lo reportado en estas dos zonas, a pesar de tener características similares. Las zonas industriales en esta fracción no presentan

un comportamiento similar, se registra un mayor aporte de $SO_4^=$ en Puente Aranda, en Fontibón es de 4.78%.

Para la fracción fina al igual que para la fracción respirable, el ion nitrato presenta la mayor contribución para el material particulado recolectado en la zona residencial de Pasadena, este resultado refuerza el argumento de la importancia de este ion en esta punto de la ciudad. Es interesante notar que en este mismo lugar y para el $PM_{2.5}$, la contribución del sulfato y el nitrato es similar, 8.14 y 8.12%, respectivamente.

El aporte de NO_3^- en el $PM_{2.5}$ de los diferentes puntos de monitoreo, se encuentra entre 2 y 8.12%. Puente Aranda y Fontibón tiene una contribución similar de 2.4%. En ningún lugar de muestreo se registro la presencia de fluoruro, mientras que el ion cloruro solo se presenta en la zona industrial de Puente Aranda con 0.33% de contribución a la fracción fina del material particulado recolectado en este lugar.

En términos generales, el aporte de aniones a la fracción fina del material particulado se encuentra entre el 6.7 y 16.3%, presentando la mayor contribución en Pasadena, seguida por Chapinero con 11.5%. Santa Isabel y Fontibón obtiene los menores porcentajes de contribución con 6.7 y 7.2%.

La ausencia de fluoruro en las muestras provenientes de los diferentes puntos monitoreados es un comportamiento esperado, tomando como referencia los resultados reportados en el estudio realizado en Bogotá durante el 2007 (SDA-CIIA,2008), cuya concentración fluctúa entre 5 y 30 ng/m^3, valores relativamente bajos a comparación de las registrados para las otras especies de aniones.

En la Figura 17 se presenta de manera gráfica la distribución de los aniones sulfato y nitrato, especies que resultaron ser más abundantes en las dos fracciones del material particulado recolectado en diferentes puntos de Bogotá.

De acuerdo con estos resultados, el ion nitrato tiende acumularse en la fracción respirable mientras que la distribución del sulfato depende de la zona de donde provengan las muestras, para el caso de los filtros recolectados en Puente Aranda, Chapinero y la Universidad de los Andes este anión fue mayor en el $PM_{2.5}$, para Santa Isabel y Fontibón fue mayor en el PM_{10}. En Pasadena tiende a distribuirse de manera uniforme entre las dos fracciones referenciadas.

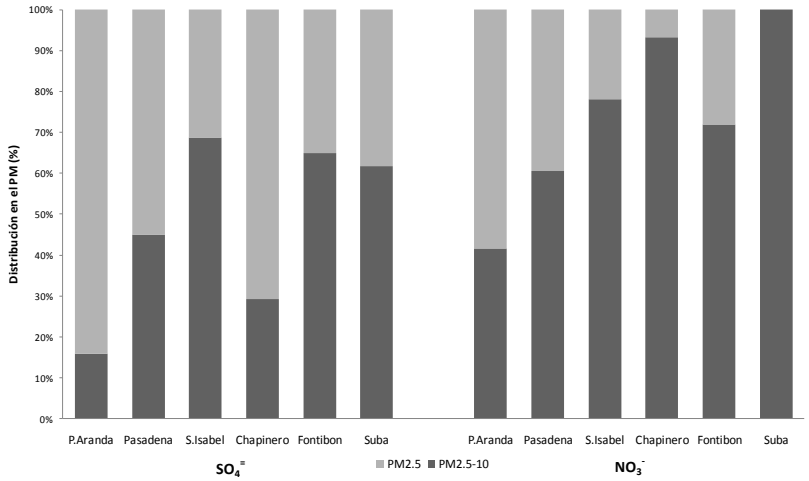
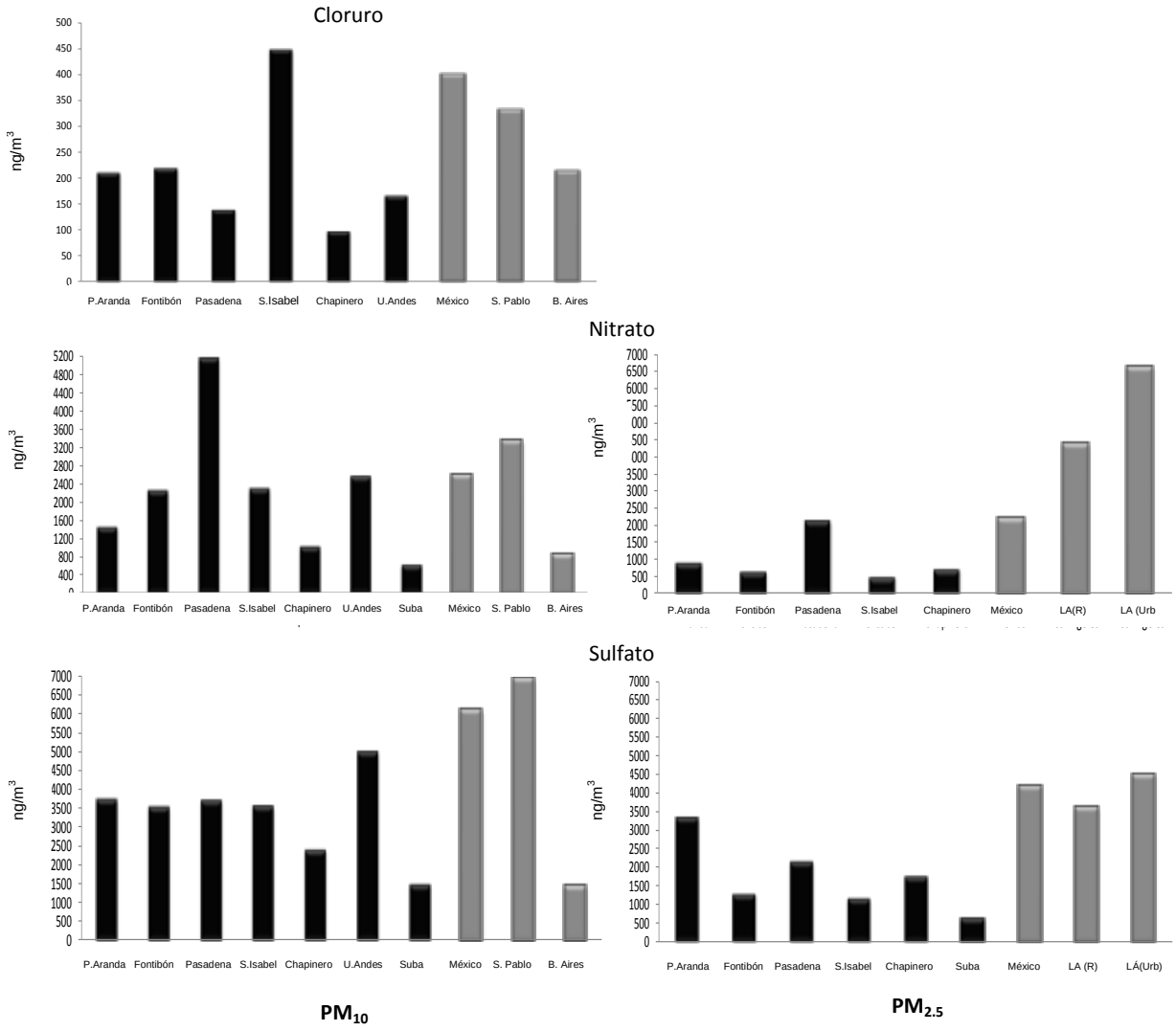


Figura 17. Distribución de aniones en las fracciones del material particulado en Bogotá

Teniendo en cuenta que los iones sulfato y nitrato proviene principalmente de la formación de aerosoles secundarios en la atmosfera, asociados a las emisiones del tráfico vehicular (Gutiérrez-Castillo et al., 2005; Sillanpa et al., 2006) y de acuerdo a los altos valores de concentración respecto a los datos reportados en estudios anteriores y su contribución a las fracciones del material particulado, es probable que la dinámica de la química atmosférica de Bogotá está favoreciendo la formación de estas especies. En la figura 18 se muestra las concentraciones de los iones sulfato, nitrato y cloruro para ambas fracciones del material particulado, reportadas en diferentes ciudades.



LA(R): Los Ángeles-zona residencial; LA(Urb): Los Ángeles-zona urbana

Figura 18. Comparación del contenido de iones en el material particulado de Bogotá con casos de estudio internacionales.

Para el caso del $PM_{10,}$ el cloruro contenido en muestras de esta fracción del punto de monitoreo ubicado en Santa Isabel presenta una concentración similar a la que se presenta en el lugar de medición de Ciudad de México, teniendo en cuenta que este último está influenciado por emisiones de tipo industrial (Múgica et al.,2009), en los demás puntos considerados las concentraciones son inferiores respecto a la información reportada en las otras ciudades.

En esta misma fracción, los valores de nitrato son similares o menores a las registrados en lugares como Ciudad de México y Sao Pablo, excepto por el valor reportado para el punto de monitoreo de Pasadena. El ion sulfato presenta concentraciones menores que las que se presenta en la capital mexicana y Sao Pablo.

De acuerdo a lo anterior, en Sao Pablo se presentan altas concentraciones de nitrato y sulfato, resultados esperados debido a que el 50% de la flota vehicular de esta ciudad utiliza etanol hidratado como combustible, el cual genera altas concentraciones de acetaldehído, este a su vez favorece la formación de smog fotoquímico en las zonas urbanas, generando un ambiente adecuada para la formación de aerosoles secundarios (Vasconcellos et al., 2010).

En cuanto a las concentraciones presentes en muestras de la fracción fina, se presentan valores de nitrato y sulfato menores a los reportados en Ciudad de México y Los Ángeles, esta ultima atribuye la alta presencia de estas especies a las prácticas de ganadería y agricultura desarrolladas cerca a la ciudad (Singh et al., 2002).

En términos generales, las concentraciones de iones presentes en las muestras recolectadas en los diferentes puntos de monitoreo considerados en el presente estudio, son similares o menores a las registradas en lugares como Ciudad de México, Sao Pablo y Los Ángeles.

4.3. Concentración de metales en muestras de material particulado de Bogotá

En las tabla 5 y 6 se presentan las concentraciones de las especies metálicas contenidas en las muestras de PM_{10} y $PM_{2.5}$, recolectadas en la campaña de campo.

En el anexo 4 se presentan los resultados de los metales presentes en las muestras de material particulado provenientes de los diferentes puntos de monitoreo.

Para el caso del PM_{10}, el punto de monitoreo ubicado en la zona industrial de Fontibón registra las mayores concentraciones para 12 de los 16 metales que reportaron valores mayores al límite de detección y del total de 26 especies analizadas (aluminio, boro, cadmio, calcio, cobre, cromo, estroncio, hierro, magnesio, manganeso, plomo y zinc). Destacándose las altas concentraciones de aluminio, calcio, hierro y potasio.

El punto de medición ubicado en la zona industrial de Puente Aranda presentó los mayores niveles para 4 de los metales cuantificados. Estos correspondieron a bario, cobalto, níquel y potasio. La zona influenciada por el alto tráfico vehicular registró las menores concentraciones del total de metales cuantificados.

Los metales que presentaron las menores concentraciones en los filtros de material particulado de la fracción respirable recolectados en la zona industrial de Fontibón corresponde a cadmio y cobalto, en Puente Aranda se registra bajas concentraciones para cromo y estroncio. El PM_{10} recolectado en las zonas residenciales de Pasadena y Santa Isabel, tiene bajo contenido de estroncio y boro, respectivamente. Mientras que el punto ubicado en el campus universitario presenta bajos niveles de cadmio.

Las figuras 19 y 20 muestran las concentraciones de las especies de metales que presentaron la mayores concentraciones en muestras de PM_{10} y $PM_{2.5}$, recolectadas en los diferentes puntos de monitoreo seleccionados.

Tabla 5. Contenido de metales en la fracción respirable del material particulado

Ciudad	Tipo de Zona	Punto de Monitoreo	Al	Ba	B	Cd	Ca	Co	Cu	Cr	Sr	Fe	Mg	Mn	Ni	Pb	K
Bogotá 2010	Industrial	Fontibón	654	55	17	1	2.616	2	76	18	17	3.656	158	230	14	194	439
	Industrial	P. Aranda	429	66	21	1	1.656	2	52	9	11	1.297	135	48	45	50	676
	Residencial	Pasadena	321	63	<LD	<LD	1.643	<LD	54	<LD	11	832	107	11	<LD	33	406
	Residencial	S. Isabel	269	60	12	<LD	1.143	<LD	37	10	9	731	101	13	<LD	77	447
	Residencial	Chapinero	202	58	9	<LD	754	<LD	75	<LD	6	847	72	10	<LD	6	394
	Alto tráfico vehicular	Suba	157	23	0	<LD	621	<LD	15	<LD	6	412	<LD	9	<LD	3	272
	Campus universitario	U. Andes	398	46	10	0	1.199	<LD	66	<LD	9	736	130	16	3	20	453
Bogotá 2007[1]	Industrial	P. Aranda	2.580	50	6	<LD	3.520	< LD	20	20	<LD	1.930	340	30	40	670	610
	Alto tráfico vehicular	Suba	770	40	10	<LD	930	<LD	40	70	<LD	770	120	4	20	40	220
	Residencial	Esmeralada	700	40	SD	1	800	0	90	10	5	730	90	10	1	300	320
Ciudad de México[2]	Urbana	IMP	2.900	SD	SD	SD	1.500	10	180	70	SD	3.300	400	60	50	330	SD
Santiago de Chile[3]	Alto tráfico vehicular	Centro de la ciudad	3.211	SD	SD	SD	6.122	SD	339	498	SD	8.649	SD	367	SD	SD	3.043
	Campus universitario	U. de Chile	1.202	SD	SD	SD	1.441	SD	SD	158	SD	1.902	SD	560	SD	SD	337
Los Ángeles[4]	Alto tráfico vehicular	Riverside	550	41	SD	SD	645	SD	9	1	SD	738	SD	13	1	3	280

LD: Límite de detección; SD: Sin dato; IMP: Instituto Mexicano de Petróleo.
Las concentraciones de arsénico, bismuto, galio, indio, litio, mercurio, selenio, sodio y talio, son menores al límite de detección en todos los puntos de monitoreo.
1. SDA-CIIA, 2008; 2. Múgica et al., 2009; 3. Morata et al., 2008; 4. Singh et al., 2002

Tabla 6. Contenido de metales en la fracción fina del material particulado

Ciudad	Tipo de Zona	Punto de Monitoreo	Al	Ba	B	Cd	Ca	Cu	Cr	Sr	Fe	Mg	Mn	Ni	Pb	K	Zn
Bogotá 2010	Industrial	Fontibon	33	3,69	8,39	0,66	<LD	33	6,88	1,62	764	<LD	133	4,56	137	239	228
	Industrial	P. Aranda	82	8,87	9,51	<LD	381	38	<LD	2,43	296	<LD	20	21	28	428	57
	Residencial	Pasadena	<LD	2,86	<LD	<LD	<LD	17	<LD	1,42	<LD	<LD	<LD	<LD	5,28	272	40
	Residencial	S. Isabel	137	16	<LD	<LD	1.197	27	<LD	5,87	350	56	8,37	<LD	28	311	45
	Residencial	Chapinero	65	3,17	<LD	<LD	325	11	<LD	1,00	156	<LD	<LD	15	2,74	239	29
	Alto tráfico vehicular	Suba	<LD	2,18	<LD	<LD	<LD	11	<LD	0,91	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	207	<LD
Bogotá 2007	Residencial	Esmeralda	70	6,00	SD	0,70	140	20	2	1,00	80	30	5,00	0,60	120	178	80
	Alto tráfico vehicular	Suba	60	<LD	10	<LD	110	10	0,40	<LD	60	50	0,70	20	20	80	<LD
Ciudad de México	Urbana	IMP	1.300	SD	SD	SD	900	70	60	SD	1.800	300	70	30	260	SD	400
Santiago de Chile	Alto tráfico vehicular	Centro de la ciudad	99	SD	SD	SD	95	19	3	SD	220	SD	11	0,95	21	238	51
Los Ángeles	Alto tráfico vehicular	Riverside	54	8,12	SD	SD	86	2,31	0,29	SD	132	SD	1,99	0,21	0,97	44	3,82

LD: Límite de detección; SD: Sin dato; IMP: Instituto Mexicano de Petróleo
Las concentraciones de arsénico, bismuto, boro, cobalto, cromo, galio, indio, litio, mercurio, selenio, sodio. Talio y zinc, son menores al límite de detección en todos los puntos de monitoreo.
1. SDA-CIIA, 2008; 2. Múgica et al., 2009; 3. Cakmak et al., 2009; 4. Singh et al., 2002

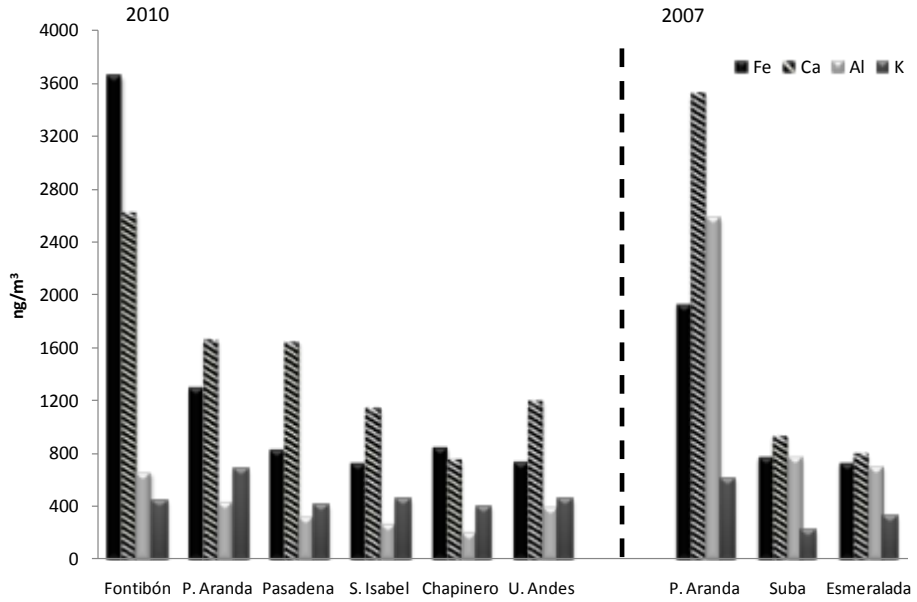


Figura 19. Contenido de metales en muestras de la fracción respirable del material particulado

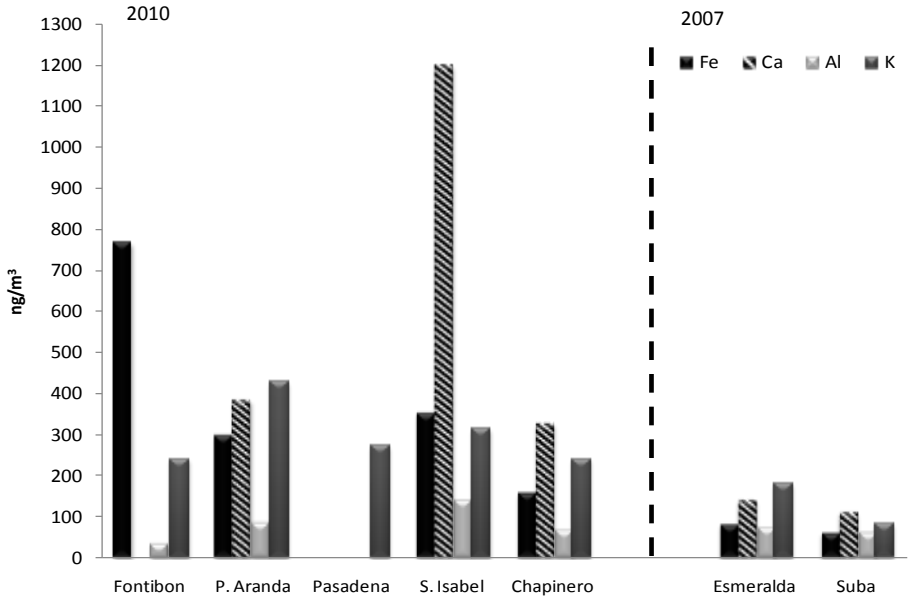


Figura 20. Contenido de metales en muestras de la fracción fina del material particulado

Al comparar estos resultados con los datos reportados en 2007, se observa que las concentraciones de las especies más abundantes presentes en las muestras de $PM_{10,}$ son mayores en el punto de monitoreo de Puente Aranda de 2007, en especial para las especies de hierro, calcio y aluminio. Este mismo comportamiento se presenta en general para las concentraciones de los demás metales analizados.

En el caso de la fracción fina, las concentraciones que se presentan en 2007 en los puntos ubicados en las zonas residencial son menores que los valores obtenidos en el presente estudio. Se destaca la alta concentración de calcio en el punto residencial de Santa Isabel.

Las figuras 21 y 22 presentan el contenido porcentual de los metales presentes en las muestras de ambas fracciones del material particulado recolectado en los puntos de medición.

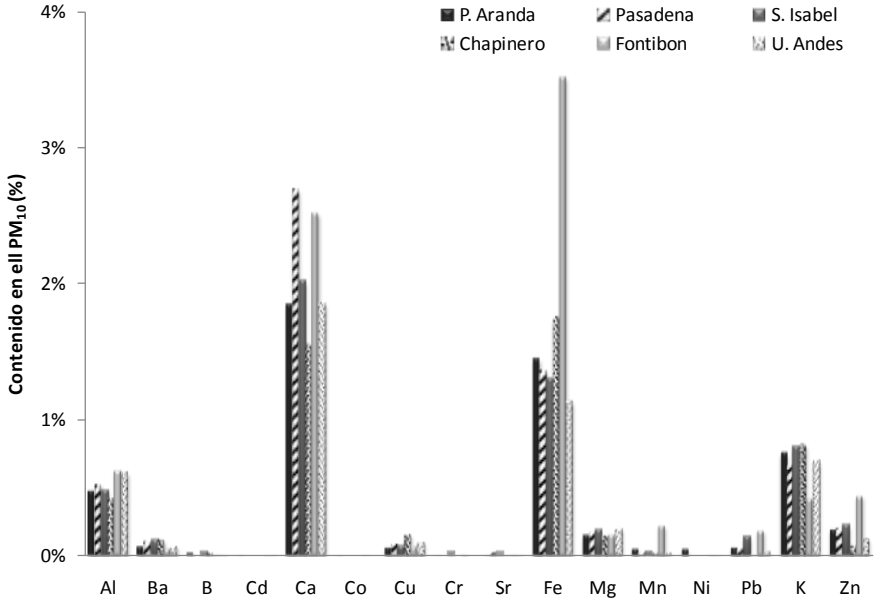


Figura 21. Contenido porcentual de especies metálicas en la fracción respirable del material particulado de Bogotá

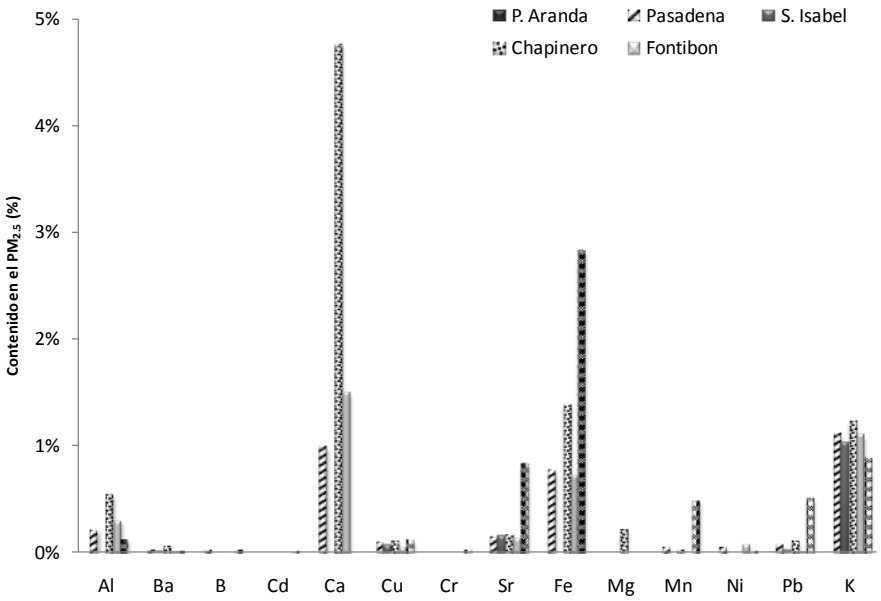


Figura 22. Contenido porcentual de especies metálicas en la fracción fina del material particulado de Bogotá

De acuerdo a estos resultados, la contribución individual de cada metal a la masa de PM_{10} se encuentra en el rango entre 0,0015 y 3,52%, estos valores corresponden al hierro y el cobalto presentes en las muestras de Fontibón, respectivamente. La mayor contribución de especies metálicas a la fracción fina se presenta en la zona industrial de Fontibón con 8,3%. Las muestras de las zonas residenciales presentan un contenido porcentual similar entre 5,9 y 5,1%, el valor máximo

registrándose en Pasadena y el mínimo en Chapinero. El menor porcentaje se presenta en el punto ubicado en el campus universitario con 4,9%.

En términos del $PM_{2.5}$, los resultados indican que los metales constituyen entre 0,0024 y 4,75% del total de la masa de esta fracción del material particulado. En general, las especies metálicas analizadas representan el 6,71 y 3,68% del $PM_{2.5}$ recolectados en las zonas industria de Fontibón y Puente Aranda, respectivamente. Para el caso de las zonas residenciales, Santa Isabel presenta una contribución de 6,81%, Pasadena y Chapinero de 1,42 y 4,01%, respectivamente.

En la Tabla 7, se presenta la distribución de los metales en las fracciones de material particulado recolectado en los diferentes puntos de medición seleccionados. Estos resultados permiten determinar que los metales de mayor interés debido a los altos valores de concentración (aluminio, calcio, hierro y potasio) tienden a acumularse en la fracción respirable del contaminante. Lo anterior, era de esperarse teniendo en cuenta que estas especies metálicas proviene principalmente del polvo resuspendido que alimenta esta fracción del material particulado (Chow, 1995; SDA-CIIA, 2008; Hellebust et al., 2009). En la zona residencial de Santa Isabel especies como calcio, cobre, estroncio, magnesio, manganeso y potasio, tienden a concentrarse en la fracción fina del material particulado.

Tabla 7. Contenido porcentual de metales en las fracciones del material particulado

Metal	P. Aranda		Pasadena		Santa Isabel		Chapinero		Fontibon		Suba	
	$PM_{2.5-10}$	$PM_{2.5}$	$PM_{2.5-10}$	$PM_{2.5}$	$PM_{2.5-10}$	$PM_{2.5}$	$PM_{2.5-10}$	$PM_{2.5}$	$PM_{2.5-10}$	$PM_{2.5}$	$PM_{2.5-10}$	$PM_{2.5}$
Aluminio	82%	18%	100%	0%	50%	50%	69%	31%	95%	5%	100%	0%
Bario	87%	13%	96%	4%	74%	26%	95%	5%	94%	6%	91%	9%
Boro	57%	43%	---	---	100%	0%	100%	0%	51%	49%	---	---
Cadmio	100%	0%	---	---	---	---	---	---	53%	47%	---	---
Calcio	78%	22%	100%	0%	2%	98%	58%	42%	100%	0%	100%	0%
Cobalto	100%	0%	---	---	---	---	---	---	100%	0%	---	---
Cobre	30%	70%	71%	29%	28%	72%	86%	14%	59%	41%	33%	67%
Cromo	100%	0%	---	---	100%	0%	---	---	64%	36%	---	---
Estroncio	79%	21%	88%	12%	37%	63%	84%	16%	91%	9%	85%	15%
Hierro	78%	22%	100%	0%	53%	47%	82%	18%	80%	20%	100%	0%
Magnesio	100%	0%	100%	0%	46%	54%	100%	0%	100%	0%	---	---
Manganeso	60%	40%	100%	0%	38%	62%	100%	0%	44%	56%	100%	0%
Niquel	55%	45%	---	---	---	---	---	---	68%	32%	---	---
Plomo	48%	52%	85%	15%	65%	35%	58%	42%	31%	69%	100%	0%
Potasio	40%	60%	36%	64%	32%	68%	41%	59%	47%	53%	28%	72%
Zinc	69%	31%	69%	31%	64%	36%	21%	79%	52%	48%	100%	0%

En la Figura 23 se muestra las concentraciones de cromo, manganeso, plomo y níquel contenidas en muestras de material particulado de Bogotá, al mismo tiempo se presenta las concentraciones reportada en otras ciudades y los estándares fijados por la EPA y la OMS para estas especies metálicas.

Para el caso del $PM_{10,}$ las concentraciones de estas especies son inferiores que los valores registrados en lugares como Santiago de Chile y Ciudad de México, este mismo comportamiento se evidencia para las concentraciones de cromo, plomo y níquel contenidas en muestras de la fracción fina del material particulado.

De acuerdo con Morata el at. (2008), las altas concentraciones de metales contenidas en el material particulado presente en la atmosfera de Santiago de Chile se atribuyen al aumento de la industria siderúrgica y metalúrgica en los últimos años.

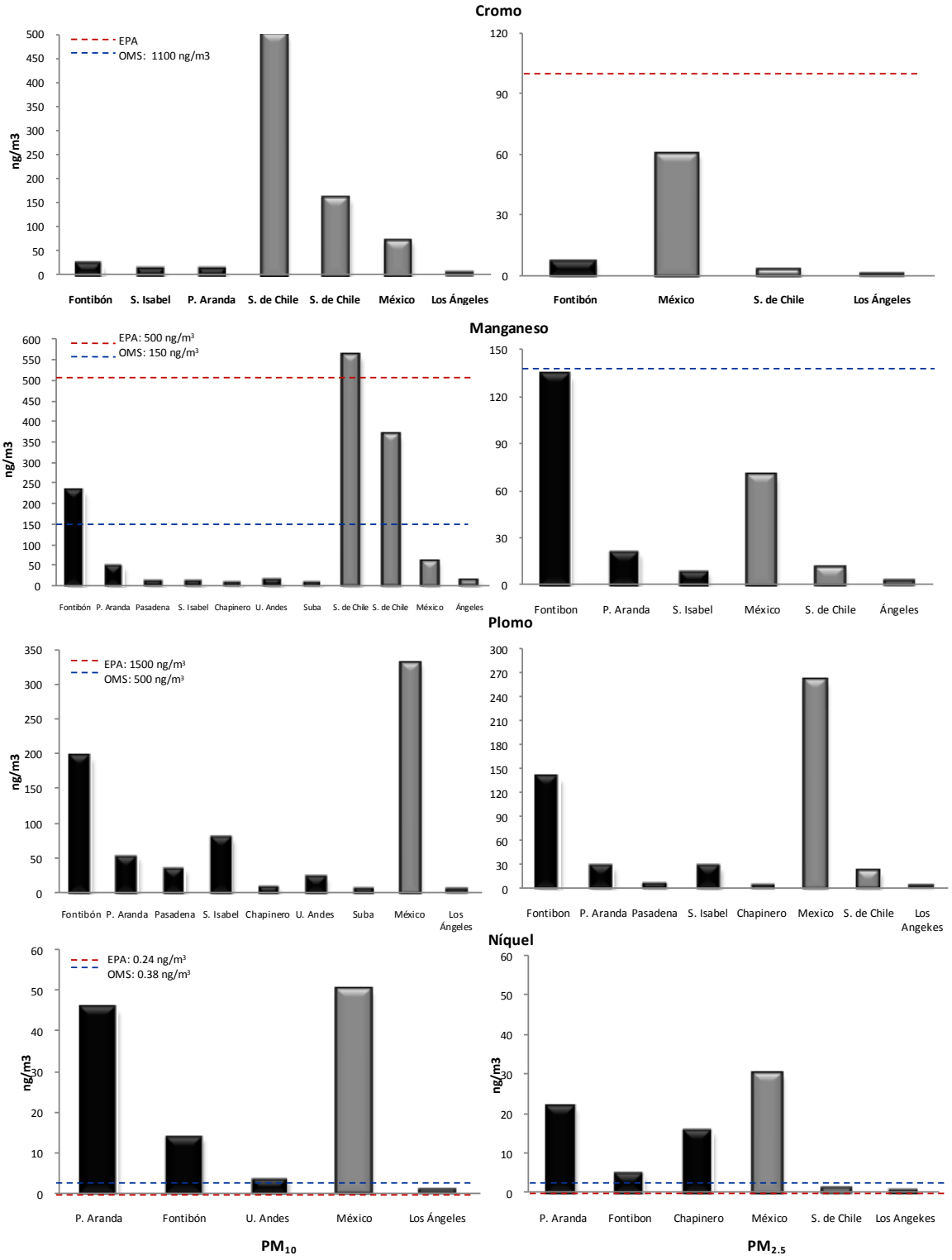


Figura 23. Comparación del contenido de metales en el material particulado de Bogotá con casos de estudio y normas internacionales.

En cuanto a los estándares establecidos por la EPA el níquel es la única especie metálica que para ambas fracciones y en todos los puntos de monitoreo, excede el valor máximo permisible de 0,24 ng/m^3. En cuanto a los límites establecidos por la OMS, la concentración de manganeso presente en el PM_{10} supera el valor máximo de150 ng/m^3.

5. ANALISIS DE INCERTIDUMBRE

Los resultados del presente trabajo relacionados con las concentraciones de la fracción respirable y fina del material particulado, el contenido de iones y metales en las muestras recolectadas, corresponden a valores confiables y que representan los niveles de contaminación por material particulado en los puntos monitoreados. Esta información a su vez es relevante para establecer el problema de contaminación al que se encuentran sujetos los bogotanos.

Las principales fuentes de error de los resultados de esta trabajo están relacionados con los siguientes aspectos: **1)** Representatividad y número de puntos de monitoreo utilizados para la recolección de las muestras; 2**)** Incertidumbre y errores asociados al procedimiento de recolección de las muestras y en la etapa de análisis químico de las mismas; **3)**El periodo de duración de cada muestreo, considerando que las jornadas se realizaron en el día, durante 12 horas, excluyendo la jornada nocturna; 4**)** Los equipos fueron instalados a nivel de exposición de la población, más no a una altura superior de 2 metros, de acuerdo a los parámetros establecidos por el protocolo correspondiente.

A su vez estos aspectos están relacionados con limitaciones y situaciones presentadas durante la campaña de campo difíciles de controlar. En algunos puntos de monitoreo se presentaron eventos de lluvia al final de la jornada de medición, asimismo, el día anterior a una de las jornadas llovió durante todo el día, factor meteorológico que influye sobre la concentración del material particulado en la atmosfera.

La información de la concentración del material particulado y la caracterización del mismo, en estudios de caso anteriores realizados en Bogotá y otras ciudades, son datos promedio ya que son calculados a partir de una serie de valores tomados durante varias jornadas en un mismo punto de monitoreo a nivel de aire ambiente, sin embargo dicha información fue tomada a manera de referencia y no para hacer una comparación estricta del nivel de contaminación presente en los diferentes lugares incluidos y para las distintas épocas consideradas.

Dado el esfuerzo realizado y la calidad de los resultados obtenidos en cuanto a la caracterización del material particulado presente en Bogotá, es posible reforzar esta información con proyectos similares que disminuyan las limitaciones mencionadas.

CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados del presente estudio, se confirma que la zona industrial de Bogotá presenta niveles de contaminación por material particulado mayores que los encontrados en otras zonas de la ciudad, (concentración de PM_{10} en Fontibón de 102 µg/m3 y Puente Aranda de 88 µg/m3) incluso en aquellas zonas donde se presenta una alta influencia del tráfico vehicular. Estos resultados hacen referencia a concentraciones a nivel de exposición personal a los que se encuentran sujetos los habitantes de la ciudad.

Respecto al estudio realizado durante el 2007 en Bogotá, las concentraciones de la fracción fina y respirable del material particulado son similares en las zonas industriales y residenciales, teniendo en cuenta que en ambos estudios los puntos de monitoreo fueron seleccionados con criterios parecidos. Sin embargo, en 2010 la zona con influencia del alto tráfico vehicular presenta una concentración inferior al valor obtenido anteriormente, comportamiento que se pudo a ver presentado por la influencia de un evento de lluvia que se presento el día anterior a la jornada de medición, disminuyendo el nivel de contaminación por material particulado.

Teniendo en cuentas los estándares máximos de concentración de material particulado, la zonas industriales superan los valores anuales establecidos para la fracción respirable, por medio de la resolución 601 de 2006 (60 µg/m3) y la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (50 µg/m3). Asimismo, las zonas residenciales de Pasadena, Chapinero y el campus universitario exceden la norma anual internacional. En ningún punto de monitoreo se registraron valores de concentración mayores que el limite diario recomendado de 150 µg/m3.

En cuanto a la fracción final del contaminante, a excepción de la zona con influencia de alto tráfico vehicular, todos los puntos de monitoreo registraron valores superiores al establecido por la norma anual según la EPA (15 µg/m3), el cual es adoptado por la legislación nacional.

Respecto a la razón $PM_{2.5}/PM_{10}$, la concentración de la fracción fina corresponde cerca al 50% de la concentración de la fracción respirable de material particulado presente en la zona residencial de Chapinero, la zona industrial de Puente Aranda y el campus universitario. Mientras que en los puntos de monitoreo ubicados en Pasadena, Santa Isabel y Suba se presenta un valor similar, alrededor del 40%. El menor valor se presenta en la zona industrial de Fontibón con 26%, indicando que en este punto de monitoreo se presenta mayor concentración de la fracción respirable del material particulado, siendo 4 veces superior que la concentración de la fracción fina.

De acuerdo con los valores registrados en las otras ciudades, la ciudad de México presenta concentraciones de PM_{10} similares a las encontradas para las zonas industriales de Bogotá. Al comparar las concentraciones de $PM_{2.5}$, los valores registrados para las diferentes zonas de Bogotá son excedidos por los reportados en ciudad de México y Santiago de Chile. Lo anterior puede ser atribuido a las características propias de las ciudades y en este caso se podría relacionar con la influencia del tráfico vehicular, en especial en la Ciudad de México, donde según estudios el 42% del $PM_{2.5}$ proviene de las emisiones vehiculares.

Los metales con mayor presencia en la ciudad son el hierro, aluminio y calcio, con valores de concentraciones de 3.656, 654, 2.654 ng/m3, respectivamente en muestras del PM_{10} del punto de monitoreo de Fontibón. El anterior comportamiento era esperado, ya que estas especies están asociadas con el polvo resuspendido que alimenta en gran parte la fracción respirable del material particulado, en este punto de monitoreo se presentan las mayor concentración de esta fracción del contaminante.

En general, las concentraciones de cromo, manganeso, plomo y níquel, presentes en muestras de PM_{10} y $PM_{2.5}$, son inferiores a las registradas en Ciudad de México y Santiago de Chile. Esto puede

ser atribuido al crecimiento de la industria metalúrgica y siderúrgica en Santiago de Chile. En Ciudad de México el aumento en las concentraciones de metales son atribuidas a crecimiento de la industria y la flota vehicular de la ciudad.

De acuerdo con los valores máximos permisibles recomendados por la EPA, ningún punto de monitoreo registra concentraciones de cromo, manganeso y plomo en muestras de PM_{10} y $PM_{2.5}$, mayores a los valores recomendados. El níquel es la única especie metálica que presenta concentraciones mayores que el estándar establecido por la EPA y la OMS en las dos fracciones del material particulado de todos los puntos monitoreados.

El manganeso presente en la zona industrial de Fontibón registra concentraciones en muestras de PM_{10} (230 ng/m3), mayores al valor establecido por la OMS de 150 ng/m3. En los otros puntos de monitoreo, se registra concentraciones de plomo, cromo y níquel en ambas fracciones del material particulado, inferiores al estándar establecido por la organización.

Los iones con mayor concentración en la ciudad de Bogotá, son el nitrato (5,152 ng/m3 en muestras de PM_{10} de Pasadena) y sulfato (4,993 ng/m3 en muestras de $PM_{2.5}$). A su vez, las concentraciones de estas últimas especies y cloruro, presentes en muestras de PM_{10} de Bogotá son similares o menores a las registradas en lugares como ciudad de México, Sao Pablo y Los Ángeles.

Los metales tienden acumularse en la fracción respirable del material particulado, mientras que los aniones tienden acumularse en la fracción fina, comportamiento que era esperado teniendo en cuenta que las especies iónicas provienen principalmente de los aerosoles secundarios, principales constituyentes del $PM_{2.5}$.

Las concentraciones de las especies iónicas, son superiores respecto a los valores reportados en la literatura indexada y a las concentraciones de metales. Esto podría estar relacionado con la dinámica de la química atmosférica de Bogotá, que pareciese que favorece la formación de aerosoles secundarios. De esta manera, se puede establecer que es necesario incluir dentro de las políticas públicas, información sobre los inventarios de emisiones secundarias que contribuyen a la problemática de la calidad del aire en la ciudad.

De acuerdo con los resultados, tanto el PM_{10} como el $PM_{2.5}$, representan un riesgo para la salud de la población expuesta, debido a que los metales tienden acumularse en la fracción respirable, mientras que los iones en la fracción fina del contaminante. Sin embardo su peligrosidad no solo depende del contenido químico, se debe considerar la profundidad que puede alcanzar en el sistema respiratorio, siendo las partículas menores a 2.5 micras las de mayor riesgo con respecto a esta característica.

Teniendo en cuenta la composición química del material particulado analizado en el presente estudio, es posible determinar que la problemática generada por la presencia de este contaminante en el aire de diferentes lugares de la ciudad, se encuentra dentro de un rango aceptable, tomando como referencia los estándares establecidos por organizaciones mundiales y la información reportada en ciudades como Santiago de Chile, Buenos Aires, Ciudad de México, Sao Pablo y Los Ángeles,

RECOMENDACIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos en el presente estudio se recomienda realizar un modelo de receptores con los datos de caracterización química, para establecer las principales fuentes de emisión y determinar a qué se debe el aumento de concentraciones, en especial para el contenido de iones en la fracción respirable del material particulado.

Asimismo, se aconseja desarrollar una campaña de campo, en la cual se amplíe el número de jornadas de mediciones en cada punto monitoreo, de igual manera, se podría aumentar los puntos seleccionados considerando otros lugares que presenta características similares a los seleccionados en la presente investigación. Esto con el fin de determinar y comparar las concentraciones que se presentan en lugares similares y establecer las razones de las posibles diferencias o similitudes.

Finalmente, se propone para próximos estudios establecer la influencia de las variables meteorológicas en la caracterización del material particulado presente en la ciudad de Bogotá.

BIBLIOGRAFIA

Alves, Reis & Freitas. 1998. Air particulate matter characterization of a rural area in Portugal. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, **136 – 138**(7): 941 - 947.

Beceiro-González, Andrade-Garda, Serrano-Velasco & Lopez-Mahía.1997. Metals in airborne particulate matter in La Coruña (NW Spain). The Science of the Total Environment **196**(9): 131-139.

Bilos, Colombo, Skorupka & Rodriguez. 2001. Sources, distribution and variability of airborne trace metals in La Plata City area, Argentina. Environmental Pollution **111**(10): 149-158.

Borbély-Kiss, Koltay, Szabó, Bozó & Tar. 1998. Composition and sources of urban and rural atmospheric aerosol in eastern Hungary. PII: S0021-8502(23): 369 – 391.

Cakmak, Dales, Gultekin, Blanco, Fernandez, Rubio & Oyola. 2009. Components of Particulate Air Pollution and Emergency Department Visits in Chile. Archives of Environmental & Occupational Health 64(9): 148 – 155.

Canepari, Cardalleri, Perrino, Catrambone, Pietrodangelo & Strincone. 2006. Two-stage chemical fractionation method for the analysis of elements and non-volatile inorganic ions in PM_{10} samples: Application to ambient samples collected in Rome (Italy). Atmospheric Environment **40**(16): 7908-7923.

Celis, Morales, Zaror & Inzunza. 2004. A study of the particulate matter PM_{10} composition in the atmosphere of Chillan, Chile. Chemosphere **54**(10): 541–550.

Chen, Hsieh, Tsai & Fang. 2003. Characterization of atmospheric PM_{10} and related chemical species in southern Taiwan during the episode days. Chemosphere **53**(13): 29–41.

Chow. 1995. Measurement methods to determine compliance whit ambient air quality standards for suspended particles. Journal of the air & waste management association **45**(64): 320-382.

De Vizcaya, Gutiérrez, Uribe, Cebrián, Múgica, Sepúlveda, Rosas, Salinas, García, Martínez, Alfaro, Torres, Osornio, Sioutas, Fine, Singh, Geller, Kuhn, Miguei, Eiguren, Schiestl, Reliene & Froines. 2006. Characterization and in vitro biological effects of concentrated particulate matter from Mexico City. Atmospheric Environment 40 (10): 583–592.

Gao, Nelson, Field, Ding, Li, Sherrell, Gigliotti, Van Ry, Glenn & Eisenreich. 2002. Characterization of atmospheric trace elements on $PM_{2.5}$ particulate matter over the New York – New Jersey harbor estuary. Atmospheric Environment **36**(10): 1077-1086.

Gilli, Traversi, Rovere, Pignata & Schiliro. 2007. Airborne particulate matter: Ionic species role in different Italian sites. Environmental Research 103 (8): 1–8.

Gutierrez-Castillo, Olivos-Ortiz, De Vizcaya-Ruiz & Cebrián. 2005. Chemical characterization of extractable water soluble matter associated with PM_{10} from Mexico City during 2000. Chemosphere **61**(10): 701–710.

Hellebust, Allanic, O'Connor, Jourdan, Healy & Sodeau. 2009. Sources of ambient concentrations and chemical composition of $PM_{2.5–0.1}$ in Cork Harbour, Ireland. Atmospheric Research **02068**(14): 1 – 14.

Herrera-Murillo & Rodríguez. 2009. Evaluación de los niveles de partículas PM_{10} y dióxido de nitrógeno en la Ciudad de San José, Costa Rica: 2005-2006. Tecnología en Marcha **22**(14): 42-55.

Hildemann, Markowski & Cass. 1991. Chemical-composition of emissions from urban sources of fine organic aerosol. Environmental Science & Technology **25**(15): 744–759.

Ho, Lee, Chan, Yu, Chow & Yao. 2003. Characterization of chemical species in $PM_{2.5}$ and PM_{10} aerosols in Hong Kong. Atmospheric Environment **37**(9): 31–39.

Huang, Olmez, Aras & Gordon. 1994. Emissions of trace elements from motor vehicles: potential marker elements and source composition profile. Atmospheric Environment **28**(7): 1385–1391.

Kim & Hopke. 2007. Source characterization of ambient fine particles in the Los Angeles basin. J. Environ. Eng. Sci. **6**(11): 343-353.

Kim, Lee & Jang. 2002. Metals in airborne particulate matter from the first and second industrial complex area of Taejon city, Korea. Environmental Pollution **118**(11): 41–51.

Lee & Kang. 2001. Chemical characteristics of principal $PM_{2.5}$ species in Chongju, South Korea. Atmospheric Environment 35(8): 739-746.

Lenschow, Abraham, Kutzner, Lutz, PreuB & Reichenbächer. 2001. Some ideas about the sources of PM_{10}. Atmospheric Environment 35(11): 23–33.

Lim, Sabin, Schiff & Stolzenbach. 2006. Concentration, size distribution, and dry deposition rate of particle-associated metals in the Los Angeles region. Atmospheric Environment 40(14): 7810–7823

Lin. 2002. Characterization of water-soluble ion species in urban ambient particles. Environment International **28**(7): 55–61.

Lonati, Giugliano, Butelli, Romele & Tardivo. 2005. Major chemical components of $PM_{2.5}$ in Milan (Italy). Atmospheric Environment **39**(10): 1925–1934.

Manalis, Grivas, Protonotarios, Moutsatsou, Samara & Chaloulakou. 2005. Toxic metal contento of particulate matter (PM_{10}), within the Greater Área of Athens. Chemosphere **60**(10):557 – 566.

Mazzei, D Alessandro, Lucarelli, Nava, Prati, Valli &Vecchi. 2088. Characterization of particulate matter sources in an urban environment. Science of the total environment **401**(9): 81 – 89.

Morata, Polvé, Valdés, Belmar, Dinator, Silva, Leiva, Aigouy & Morales. 2008. Characterisation of aerosol from, Santiago, Chile: an integrated PIXE-SEM-EDX study. Environ Geol **56**(15):81 – 95.

Mugica, Maubert, Torres, Muñoz & Rico. 2002.Temporal and spatial variations of metal content in TSP and PM_{10} in Mexico City during 1996–1998. Aerosol Science **33**(12): 91–102

Mugica, Ortiz, Molina, De Vizcaya-Ruiz, Nebot, Quintana, Aguilar & Alcántara. 2009. PM composition and source reconciliation in Mexico City. Atmospheric Environment **43**(7): 5068–5074.

Querol, Viana, Alastuey, Amato, Moreno, Castillo, Pey, de la Rosa, Sánchez de la Campa, Artíñano, Salvador, García Dos Santos, Fernández-Patier, Moreno-Grau, Negral, Minguillón, Monfort, Gil, Inza, Ortega, Santamaría & Zabalza. 2007. Source origin of trace elements in PM fromregional background, urban and industrial sites of Spain. Atmospheric Environment **41**(13): 7219–7231.

Quiterio, Sousa da Silva, Arbilla & Escaleira. 2004. Metals in airborne particulate matter in the industrial district of Santa Cruz, Rio de Janeiro, in an annual period. Atmospheric Environment **38**(11): 321–331.

Richter, Griño, Ahumada & Giordano. Total element concentration and chemical fractionation in airborne particulate matter from Santiago, Chile. Atmospheric Environment 41(10): 6729–6738.

Röösli, Theis, Künzli, Staehelin, Mathys, Oglesby, Camenzind & Braun-Fahrländer. 2001. Temporal and spatial variation of the chemical composition of PM_{10} at urban and rural sites in the Basel area, Switzerland. Atmospheric Environment **35** (13): 3701-3713.

Saitoh, Sera & Shirai. 2008. Characterization of atmospheric aerosol particles in a mountainous region in northern Japan. Atmospheric Research **89**(6): 324–329.

Samara & Voutsa. 2005. Size distribution of airborne paticulate matter and associated heavy metals in the roadside environment Chemosphere **59**(8): 1197 – 1206.

Secretaria Distrital de Ambiente de Bogotá – Centro de investigaciones en Ingeniería Ambiental (CIIA). 2008. Definición de elementos técnicos para la formulación de políticas distritales encaminadas al mejoramiento de la calidad del aire en Bogotá. Parte C-Caracterización del Material Particulado y Modelo Receptores.

Semb, Hanssen, Francois, Maenhaut & Pacyna. 1995. Long range transport and deposition of mineral matter as a source for base cations. Water, Air, and Soil Pollution **85**(8): 1933–1940.

Shah & Shaheen. 2007. Statistical analysis of atmospheric trace metals and particulate fractions in Islamabad, Pakistan. Journal of Hazardous Materials **147**(9): 759–767.

Sillanp, Saarikoski, Hillamo, Pennanen, Makkonen, Spolnik, Grieken, Koskentalo & Salonen. 2005. Chemical composition, mass size distribution and source analysis of long-range transported wildfire smokes in Helsinki. Science of the Total Environment **350**(17): 119– 135.

Sillanpa, Hillamo, Saarikoski, Frey, Pennanen, Makkonen, Spolnik, Grieken, Branis, Brunekreef, Chalbot, Kuhlbusch, Sunyer, Kerminen, Kulmala &Salonen. 2006. Chemical composition and mass closure of particulate matter at six urban sites in Europe. Atmospheric Environment **40**(12):S212–S223.

Singh, Jaques & Sioutas. 2002. Size distribution and diurnal characteristics of particle-bound metals in source and receptor sites of the Los Angeles Basin. Atmospheric Environment **36**(15): 1675–1689.

Sternbeck, Sjödin & Andréasson. 2002. Metal emissions from road traffic and the influence of resuspension-results from two tunnel studies. Atmospheric Environment **36**(10): 4735–4744.

Stern, Jones, Raizenne, Burnett, Meranger & Franklin. 1989. Respiratory health effects associated with ambient sulfates and ozone in two rural Canadian communities. Environmental Research 49(20): 20-39.

Tsitouridou, Voutsa & Kouimtzis. 2003. Ionic composition of PM_{10} in the area of Thessaloniki, Greece. Chemosphere 52(9): 883–891.

Universidad de Chile. 2006. Análisis Retrospectivo de Filtros de Material Particulado MP10 en sus fracciones fina y respirable para estaciones de la Red Macam II en el período 2003-2006.Informe Final. En línea: www.conama.cl/rm/568/articles-41184_UsachTendeciaFinal.pdf

Valavanidis, Fiotakis, Vlahogianni, Bakeas, Triantafillaki, Paraskevopoulou & Dassenakis. 2006. Characterization of atmospheric particulates, particle-bound transition metals and polycyclic aromatic hydrocarbons of urban air in the centre of Athens (Greece). Chemosphere 65 (9): 760–768

Vasconcellos, Souza, Nascimento, Aráujo, Behrentz, Sanchez-Ccoyllo, Dos Santos & Smichowski. 2010. Chemical characterization of the atmosphere of three south American urban areas. En proceso de publicación.

Vega, Mugica, Reyes, Sanchez, Chow & Watson. 2001. Chemical composition of fugitive dust emitters in Mexico City. Atmospheric Environment **35**(7):4033–4039.

Venkataraman, Reddy, Josson & Shekar Reddy. 2002. Aerosol size and chemical characteristics at Mumbai,India, during the INDOEX-IFP (1999). Atmospheric Environment **36**(13):1979–1991.

Viana, Querol & Alastuey. 2006. Chemical characterization of PM episodes in NE Spain. Chemosphere 62(10): 947–956

Wu, Hao, Hu, Fu, Wang & Tang. 2003. Chemical characteristic of airborne matter near major roads and at background in Macao, China. The science of the total environment **317**(14): 159 – 174.

Yuan, Zhuang, Li & Wang. 2008. Mixing of mineral with pollution aerosols in dust season in Beijing: revealed by source apportionment study. Atmospheric Environment **42**(17): 2141–2157.

Zabalza, Ogulei, Hopke, Lee, Hwang, Querol, Alastuey & Santamaría. 2006. Concentration and sources of PM_{10} and its constituents in Alsasua, Spain. Water, Air, & Soil Pollution **174**(10): 385–404.

ANEXOS

Anexo 1. Líneas de emisión seleccionadas para el análisis de metales

En la siguiente tabla se presentan las líneas de emisión utilizadas para el análisis de las diferentes especies de metales presente en las muestras de material particulado recolectadas.

Metal	**Línea de emisión**
Aluminio	3082
Arsénico	1937
Bario	4934
Bismuto	1954
Boro	2497
Cadmio	2265
Calcio	3706
Cobalto	2286
Cobre	3247
Cromo	3578
Estroncio	4215
Galio	2874
Hierro	259
Indio	2306
Litio	6103
Magnesio	2790
Manganeso	2939
Mercurio	2536
Níquel	2316
Plata	3280
Plomo	2203
Potasio	7698
Selenio	1960
Sodio	5895
Talio	3519
Zinc	2138

Anexo 2. Limites de detección de iones y metales

A continuación se presentan los limites de detección tanto para los metales como para los iones contenidos en las muestras de material particulado recolectadas en los diferentes puntos de monitoreo.

Ion	Limite de detección (mg/L)
Bromuros	0,0700
Cloruros	0,4000
Fluoruros	0,1300
Nitratos	0,8100
Nitritos	0,2600
Sulfatos	0,4000

Metal	Limite de detección (mg/L)
Plata	0,0066
Aluminio	0,0786
Arsénico	0,0183
Boro	0,0215
Bario	0,0037
Bismuto	0,2264
Calcio	0,7367
Cadmio	0,0012
Cobalto	0,0025
Cromo	0,0163
Cobre	0,0085
Hierro	0,2866
Galio	0,0621
Mercurio	0,0604
Indio	0,0150
Potasio	0,3149
Litio	0,1080
Manganeso	0,1356
Manganeso	0,0078
Sodio	3,1342
Plata	0,0103
Plomo	0,0073
Selenio	0,0155
Estroncio	0,0021
Talio	0,0933
Zinc	0,0544

Anexo 3. Resultados de los análisis de iones

En la siguiente tabla se presenta los resultados del análisis químico de iones en las muestras de material particulado recolectadas.

Ion	Puente Aranda		Pasadena		Santa Isabel		Chapinero		Fontibon		Suba		U. Andes	
	PM_{10}	$PM_{2.5}$	PM_{10}	$PM_{2.5}$	PM_{10}	$PM_{2.5}$	PM_{10}	$PM_{2.5}$	PM_{10}	$PM_{2.5}$	PM_{10}	$PM_{2.5}$	PM_{10}	$PM_{2.5}$
BROMUROS	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
CLORUROS	208,7128	124,9234	137,9313	< LD	445,4945	< LD	95,91025	< LD	217,0274	< LD	< LD	< LD	165,23816	< LD
FLUORURO	< LD	< LD	42,41795	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
NITRATOS	1457,913	898,1561	5151,527	2127,207	2289,571	514,8839	1022,406	733,3587	2258,036	653,5434	626,857	< LD	2565,8222	1308,188
NITRITOS	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD
SULFATOS	3725,328	3303,108	3708,165	2131,34	3554,206	1141,828	2405,064	1742,258	3522,401	1275,064	1482,344	596,3286	4993,2359	3247,192

LD: Limite de detección

A partir de estos datos se calculo la concentración en ng/m^3, utilizando las siguientes ecuaciones:

Masa del metal en la solución de extracción:

$$m_s = \left[\frac{mg\ de\ metal}{L\ de\ sln}\right] \times 10ml\ de\ solución$$

Área de la tira del filtro (Atf):

$$Atf = 2.5cm \times 20.3cm = 50.75cm^2$$

Peso total de la tira de filtro (Pf), donde At es el área total del filtro:

$$P_f = \frac{Atf \times Ptf}{At} = \frac{50.75cm^2 \times Ptf}{20.3\ cm \times 25.4\ cm} = 0{,}0985Ptf$$

Peso del filtro blanco en la tira de filtro (Pb):

$$P_b = \frac{Atf \times Ptb}{At} = \frac{50.75cm^2 \times Ptb}{20.3\ cm \times 25.4\ cm} = 0{,}0985Ptb$$

Peso del material particulado en la tira del filtro (Pm):

$$P_m = P_f - P_b$$

$P_m = 0{,}0985(Ptf - Ptb)\ donde\ Ptm = Ptf - Ptb$

$P_m = 0{,}0985 Ptm$

Masa total del metal en el filtro (mt):

$$M_t = \frac{m_s \times 100\%}{9{,}85\%}$$

Masa del metal por ug de material particulado recolectado (m), es decir la concentración en µg del metal por µg de material particulado:

$$m = \frac{m_t}{peso\ del\ filtro\ en\ gramos} \times \frac{1g}{1 \times 10^6} \times \frac{1000ug}{1mg}$$

Concentración volumétrica del metal (Cs):

$$C_s = m \times [PM] \times \frac{1000ng}{1ug}$$

Anexo 4. Resultados de los análisis de metales

En la siguiente tabla se presenta los resultados del laboratorio en mg/L, de los metales presentes en el material particulado recolectado en los diferentes puntos de monitoreo.

PARAMETROS	Puente Aranda PM_{10}			Puente Aranda $PM_{2.5}$		Pasadena PM_{10}		Pasadena $PM_{2.5}$		Santa Isabel PM_{10}		Santa Isabel $PM_{2.5}$	
	Primera lectura	Segunda lectura	Tercera lectura	Primera lectura	Segunda lectura	Primera lectura	Segunda lectura	Primera lectura	Segunda lectura	Primera lectura	Segunda lectura	Primera lectura	Segunda lectura
Ag3280	<0,0066	<0,0066	<0,0066	<0,0066	<0,0066	<0,0066	<0,0066	<0,0066	<0,0066	<0,0066	<0,0066	<0,0066	<0,0066
Al3082	1,1513	1,2022	1,2734	0,2208	0,2190	0,6075	0,6697	<0,0786	<0,0786	0,7481	0,8392	0,3899	0,3965
As1937	<0,0183	<0,0183	<0,0183	<0,0183	<0,0183	<0,0183	<0,0183	<0,0183	<0,0183	<0,0183	<0,0183	<0,0183	<0,0183
B_2497	0,0566	0,0595	0,0627	0,0244	0,0264	<0,0215	<0,0215	<0,0215	<0,0215	0,0348	0,0367	<0,0215	<0,0215
Ba4934	0,1870	0,1812	0,1896	0,0286	0,0188	0,1300	0,1223	0,0056	0,0053	0,1802	0,1745	0,0442	0,0494
Bi1954	<0,2264	<0,2264	<0,2264	<0,2264	<0,2264	<0,2264	<0,2264	<0,2264	<0,2264	<0,2264	<0,2264	<0,2264	<0,2264
Ca3706	4,4870	4,7360	4,7700	1,0570	0,9800	3,4310	3,1080	<0,7367	<0,7367	3,3950	3,3590	3,4400	3,4500
Cd2265	0,0018	0,0026	0,0017	<0,0012	<0,0012	<0,0012	<0,0012	<0,0012	<0,0012	<0,0012	<0,0012	<0,0012	<0,0012
Co2286	0,0050	0,0048	0,0050	<0,0025	<0,0025	<0,0025	<0,0025	<0,0025	<0,0025	<0,0025	<0,0025	<0,0025	<0,0025
Cr3578	0,0270	0,0235	0,0216	<0,0163	<0,0163	<0,0163	<0,0163	<0,0163	<0,0163	0,0314	0,0283	<0,0163	<0,0163
Cu3247	0,1546	0,1445	0,1394	0,0876	0,1158	0,1065	0,1086	0,0299	0,0330	0,1031	0,1155	0,0791	0,0789
Fe2599	3,4826	3,5866	3,8872	0,8136	0,7685	1,6706	1,6426	<0,2866	<0,2866	2,1426	2,1756	1,0246	0,9897
Ga2874	<0,0621	<0,0621	<0,0621	<0,0621	<0,0621	<0,0621	<0,0621	<0,0621	<0,0621	<0,0621	<0,0621	<0,0621	<0,0621
Hg2536	<0,0604	<0,0604	<0,0604	<0,0604	<0,0604	<0,0604	<0,0604	<0,0604	<0,0604	<0,0604	<0,0604	<0,0604	<0,0604
In2306	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015
K_7698	1,9510	2,0030	1,7590	1,0880	1,1960	0,8390	0,7760	0,5280	0,5080	1,3140	1,3250	1,0150	0,7780
Li6103	<0,108	<0,108	<0,108	<0,108	<0,108	<0,108	<0,108	<0,108	<0,108	<0,108	<0,108	<0,108	<0,108
Mg2790	0,3858	0,3556	0,4021	<0,1356	<0,1356	0,2616	0,1631	<0,1356	<0,1356	0,3133	0,2858	0,1615	<0,1356
Mn2939	0,1298	0,1298	0,1475	0,0549	0,0539	0,0223	0,0213	<0,0078	<0,0078	0,0376	0,0400	0,0270	0,0212
Na5895	<3,1342	<3,1342	<3,1342	<3,1342	<3,1342	<3,1342	<3,1342	<3,1342	<3,1342	<3,1342	<3,1342	<3,1342	<3,1342
Ni2316	0,1309	0,1212	0,1308	0,0579	0,0560	<0,0103	<0,0103	<0,0103	<0,0103	<0,0103	<0,0103	<0,0103	<0,0103
Pb2203	0,1443	0,1395	0,1417	0,0810	0,0678	0,0670	0,0628	0,0086	0,0115	0,2325	0,2221	0,0931	0,0661
Se1960	<0,0155	<0,0155	<0,0155	<0,0155	<0,0155	<0,0155	<0,0155	<0,0155	<0,0155	<0,0155	<0,0155	<0,0155	<0,0155
Sr4215	0,0319	0,0279	0,0320	0,0079	0,0051	0,0264	0,0179	0,0027	<0,0021	0,0283	0,0253	0,0169	<0,0021
Tl3519	<0,0933	<0,0933	<0,0933	<0,0933	<0,0933	<0,0933	<0,0933	<0,0933	<0,0933	<0,0933	<0,0933	<0,0933	<0,0933
Zn2138	0,4979	0,4667	0,5000	0,1402	0,1643	0,2403	0,2532	<0,0544	0,0767	0,3461	0,3768	0,1507	0,1068

PARAMETROS	Fontibón PM_{10}		Fontibón $PM_{2.5}$		Suba PM_{10}		Suba $PM_{2.5}$		U. Andes PM_{10}			U. Andes $PM_{2.5}$		
	Primera lectura	Segunda lectura	Primera lectura	Segunda lectura	Primera lectura	Segunda lectura	Primera lectura	Segunda lectura	Primera lectura	Segunda lectura	Tercera lectura	Primera lectura	Segunda lectura	Tercera lectura
Ag3280	<0,0066	<0,0066	<0,0066	<0,0066	<0,0066	<0,0066	<0,0066	<0,0066	<0,0066	<0,0066	<0,0066	0,4106	<0,0066	0,0252
Al3082	1,7653	1,7262	0,0855	0,0843	0,4626	0,4491	<0,0786	<0,0786	1,1893	1,2682	1,2464	0,5869	0,1096	0,1539
As1937	<0,0183	<0,0183	<0,0183	<0,0183	<0,0183	<0,0183	<0,0183	<0,0183	<0,0183	<0,0183	<0,0183	0,4927	<0,0183	<0,0183
B_2497	0,0410	0,0478	<0,0215	0,0217	<0,0215	<0,0215	<0,0215	<0,0215	0,0309	0,0315	0,0322	0,5409	<0,0215	<0,0215
Ba4934	0,1500	0,1463	0,0098	0,0093	0,0652	0,0659	0,0058	0,0062	0,1418	0,1451	0,1413	0,5593	0,0129	0,0084
Bi1954	<0,2264	<0,2264	<0,2264	<0,2264	<0,2264	<0,2264	<0,2264	<0,2264	<0,2264	<0,2264	<0,2264	0,5244	<0,2264	<0,2264
Ca3706	7,0380	6,9330	<0,7367	<0,7367	1,7250	1,8780	<0,7367	<0,7367	3,8840	3,9650	3,3030	0,7470	0,9010	<0,7367
Cd2265	0,0037	0,0036	0,0016	0,0018	<0,0012	<0,0012	<0,0012	<0,0012	0,0013	0,0013	0,0013	0,5059	<0,0012	<0,0012
Co2286	0,0042	0,0043	<0,0025	<0,0025	<0,0025	<0,0025	<0,0025	<0,0025	<0,0025	<0,0025	<0,0025	0,5274	<0,0025	<0,0025
Cr3578	0,0492	0,0492	0,0178	<0,0163	<0,0163	<0,0163	<0,0163	<0,0163	<0,0163	<0,0163	<0,0163	0,5804	<0,0163	<0,0163
Cu3247	0,2066	0,1990	0,0855	0,0827	0,0480	0,0405	0,0272	0,0325	0,2018	0,2013	0,2135	0,5802	0,0414	0,0422
Fe2599	9,6646	9,8656	1,9356	2,0166	1,2156	1,1736	<0,2866	<0,2866	2,2576	2,3776	2,2102	0,8932	0,2930	<0,2866
Ga2874	<0,0621	<0,0621	<0,0621	<0,0621	<0,0621	<0,0621	<0,0621	<0,0621	<0,0621	<0,0621	<0,0621	0,5048	<0,0621	<0,0621
Hg2536	<0,0604	<0,0604	<0,0604	<0,0604	<0,0604	<0,0604	<0,0604	<0,0604	<0,0604	<0,0604	<0,0604	0,5227	<0,0604	<0,0604
In2306	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015	0,5556	<0,015	<0,015
K_7698	1,2240	1,1200	0,5840	0,6540	0,8570	0,7220	0,5710	0,5710	1,4090	1,3930	1,4120	1,2280	0,8630	0,8640
Li6103	<0,108	<0,108	<0,108	<0,108	<0,108	<0,108	<0,108	<0,108	<0,108	<0,108	<0,108	0,5046	<0,108	<0,108
Mg2790	0,4562	0,3896	<0,1356	<0,1356	<0,1356	<0,1356	<0,1356	<0,1356	0,4418	0,3951	0,3737	0,5824	<0,1356	<0,1356
Mn2939	0,5968	0,6323	0,3300	0,3581	0,0320	0,0203	<0,0078	<0,0078	0,0517	0,0497	0,0498	0,5417	0,0140	0,0151
Na5895	<3,1342	<3,1342	<3,1342	<3,1342	<3,1342	<3,1342	<3,1342	<3,1342	<3,1342	<3,1342	<3,1342	<3,1342	<3,1342	<3,1342
Ni2316	0,0357	0,0373	0,0119	0,0117	<0,0103	<0,0103	<0,0103	<0,0103	0,0106	0,0105	0,0105	0,5421	<0,0103	<0,0103
Pb2203	0,5199	0,5149	0,3553	0,3553	0,0080	0,0098	<0,0073	<0,0073	0,0619	0,0669	0,0617	0,5424	0,0321	0,0298
Se1960	<0,0155	<0,0155	<0,0155	<0,0155	<0,0155	<0,0155	<0,0155	<0,0155	<0,0155	<0,0155	<0,0155	0,5181	<0,0155	<0,0155
Sr4215	0,0479	0,0414	0,0042	<0,0021	0,0221	0,0103	0,0025	<0,0021	0,0288	0,0269	0,0242	0,5484	0,0047	<0,0021
Tl3519	<0,0933	<0,0933	<0,0933	<0,0933	<0,0933	<0,0933	<0,0933	<0,0933	<0,0933	<0,0933	<0,0933	0,4473	<0,0933	<0,0933
Zn2138	1,2356	1,2104	0,5826	0,5950	<0,0544	0,0582	<0,0544	<0,0544	0,2352	0,2828	0,2538	0,5534	0,1344	0,0787

Los datos de la muestra que contiene la fracción fina del material particulado recolectado en la Universidad de los Andes, no se tuvieron en cuenta ya que estos diferían en varios órdenes de magnitud de una lectura a otra.

Para cada muestra obtenida en los diferentes puntos de monitoreo se tomaron dos o tres lecturas de análisis químico, a partir de estos datos se calculo un promedio, con este valor y otros parámetros se obtuvo la concentración en ng/m^3, utilizando las siguientes ecuaciones:

Masa del metal en la solución de extracción:

$$m_s = \left[\frac{mg\ de\ metal}{L\ de\ sln}\right] \times 20ml\ de\ solución$$

Área de la tira del filtro (Atf):

$$Atf = 2.5cm \times 20.3cm = 50.75cm^2$$

Peso total de la tira de filtro (Pf), donde At es el área total del filtro:

$$P_f = \frac{Atf \times Ptf}{At} = \frac{50.75cm^2 \times Ptf}{20.3\ cm \times 25.4\ cm} = 0{,}0985Ptf$$

Peso del filtro blanco en la tira de filtro (Pb):

$$P_b = \frac{Atf \times Ptb}{At} = \frac{50.75cm^2 \times Ptb}{20.3\ cm \times 25.4\ cm} = 0{,}0985Ptb$$

Peso del material particulado en la tira del filtro (Pm):

$$P_m = P_f - P_b$$

$$P_m = 0{,}0985(Ptf - Ptb)\ donde\ Ptm = Ptf - Ptb$$

$$P_m = 0{,}0985Ptm$$

Masa total del metal en el filtro (mt):

$$M_t = \frac{m_s \times 100\%}{9{,}85\%}$$

Masa del metal por ug de material particulado recolectado (m), es decir la concentración en µg del metal por µg de material particulado:

$$m = \frac{m_t}{peso\ del\ filtro\ en\ gramos} \times \frac{1g}{1 \times 10^6} \times \frac{1000ug}{1mg}$$

Concentración volumétrica del metal (Cs):

$$C_s = m \times [PM] \times \frac{1000ng}{1ug}$$