



Revista Politécnica

ISSN: 1900-2351

ISSN: 2256-5353

rpolitecnica@elpoli.edu.co

Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid
Colombia

Gómez-Marín, Miriam; Yepes-Palacio, Dora Luz; Posada-
Restrepo, Enrique; Hurtado-Castaño, Carlos Alberto
Estimación de la influencia de las emisiones vehiculares en
la concentración del PM2.5. Medellín, Colombia 2009-2011
Revista Politécnica, vol. 20, núm. 40, 2024, Julio-Diciembre, pp. 222-241
Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid
Medellín, Colombia

DOI: <https://doi.org/10.33571/rpolitec.v20n40a14>

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=607878976014>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en [redalyc.org](https://www.redalyc.org)

[redalyc.org](https://www.redalyc.org)

Sistema de Información Científica Redalyc
Red de revistas científicas de Acceso Abierto diamante
Infraestructura abierta no comercial propiedad de la academia

Estimación de la influencia de las emisiones vehiculares en la concentración del PM_{2.5}. Medellín, Colombia 2009-2011

Miriam Gómez-Marín¹, Dora Luz Yepes-Palacio², Enrique Posada-Restrepo³, Carlos Alberto Hurtado-Castaño⁴

¹Postgrado en Ingeniería Ambiental, Profesora Titular en el Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, Medellín-Colombia, mgomez@elpoli.edu.co

²PhD en Desarrollo Sostenible en la Universidad de Manizales, Profesora Titular en el Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, Medellín-Colombia, dlyepes@elpoli.edu.co

³Master en Ingeniería Mecánica, Universidad de Maine en Orono. Gerente Hatch Indisa SA, Medellín, Colombia; enrique.posada@hatchindisa.com

⁴Magíster en Ciencias - Estadística de la Universidad Nacional, Docente ocasional de tiempo completo en el Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, carlosahurtado@elpoli.edu.co

RESUMEN

Este trabajo permite divulgar metodologías aplicadas para la estimación de la contribución de diferentes fuentes de emisión sobre la calidad del aire, a partir de datos históricos de caracterización del PM_{2.5} en la ciudad de Medellín, entre 2009 y 2011, como línea base para estudios actuales en la temática. El análisis completo de las variaciones horarias en los datos de concentración de PM_{2.5}, muestran que existe un claro comportamiento estacional de los datos, con pico claramente diferenciado en horas de la mañana. Este fenómeno está relacionado con la influencia del tráfico vehicular y condiciones de dispersión de contaminantes en el Valle de Aburrá, Colombia. Un análisis químico de las muestras recogidas confirmó la influencia del tráfico en las concentraciones de PM_{2.5}. Finalmente, a partir de la caracterización PM_{2.5} se aplicó el modelo PMF para identificar las fuentes de aporte de PM_{2.5} en tres zonas del área urbana con alta movilidad.

Palabras clave: Aire; contaminación atmosférica; emisiones vehiculares; material particulado fino; caracterización química; aporte fuentes; Modelo PMF

Recibido: 12 de marzo de 2024. Aceptado: 12 de Junio de 2024
Received: March 12, 2024. Accepted: June 12, 2024

ESTIMATION OF THE INFLUENCE OF VEHICULAR EMISSIONS ON THE CONCENTRATION OF PM_{2.5}. MEDELLÍN, COLOMBIA

ABSTRACT

This work allows us to demonstrate the influence of several sources on the emission of fine particulate matter (PM_{2.5}) based on historical data from the city of Medellín, between 2009 and 2011. The complete analysis of hourly variations in the concentration of PM_{2.5} show that there is a clear seasonal behavior of the data, with the appearance of a clearly differentiated peak in the morning hours. This phenomenon is related to the influence of vehicle traffic and to the dispersion conditions of pollutants at the Valle de Aburrá, Colombia. A chemical analysis of the collected samples confirmed the influence of traffic on concentrations PM_{2.5}. Finally, based on the PM_{2.5} characterization, the PMF model was applied to identify the sources of PM_{2.5} in three zones of the urban area with high mobility.

Keywords: Air; atmospheric pollution; vehicular emissions; fine particulate matter; chemical characterization; contribution of sources PMF model.

Cómo citar este artículo: M. Gómez. "Estimación de la influencia de las emisiones vehiculares en la concentración del pm_{2.5}. Medellín, Colombia 2009-2011", Revista Politécnica, vol.20, no.40 pp.222-241, 2024. DOI:10.33571/rpolitec.v20n40a14

1 INTRODUCCIÓN

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), la mayoría de los efectos a corto y largo plazo de la contaminación del aire están asociados con la salud de las personas, especialmente en las grandes ciudades, donde la calidad del aire se ve significativamente afectada por las emisiones contaminantes. Las cifras muestran que anualmente en el mundo siete millones de personas mueren a causa de la exposición a partículas finas atmosféricas, de las cuales cerca del 90% ocurren en países de ingresos bajos y medianos (1).

El Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA) es una región conurbana de diez municipios, ubicada en la parte noroccidental de Suramérica en la Cordillera Andina Central en el centro del departamento de Antioquia (Colombia) con Medellín como su ciudad capital (ver Figura 1), localizada aproximadamente a 1,500 metros sobre el nivel del mar. El Valle de Aburrá (VA) tiene una extensión de 1,157 km² con una base relativamente estrecha y una topografía irregular y empinada, con pendientes que se elevan hasta 2,800 m.s.n.m en un relieve sobresaliente. Estos rasgos geográficos y topográficos del VA se ven afectados principalmente por los vientos alisios del noreste y sureste de la zona de convergencia intertropical (2). La región, con un desarrollo urbano acelerado en las laderas y con un total de 3,726,219 habitantes al año 2018 (3), ha padecido en los últimos años el impacto de episodios críticos de contaminación del aire que han sido declarados por la autoridad ambiental, principalmente durante las épocas de transición climática de períodos secos a lluviosos.



Figura 1. Ubicación geográfica del Valle de Aburrá. Preparado por los autores, tomando como referente la cartografía base del Instituto Geográfico Agustín Codazzi -IGAC escala 1:100.000 (4).

En este contexto, desde 2009 se realizaron en la región varios estudios relacionados con caracterización química de PM_{2.5} e inferencia de fuentes, con baja publicación científica, situación que ha sido superada durante los últimos años a partir de la divulgación de resultados de diferentes estudios en la temática. Es por ello, la motivación de documentar experiencias preliminares con énfasis en el sector transporte, lideradas por diferentes instituciones y con el apoyo de la autoridad ambiental, que permitan evaluar el avance en metodologías de balances de masa y modelación inversa.

Se han analizado factores que exacerban los efectos de las emisiones de partículas, entre ellos, las condiciones topográficas que determinan la estructura vertical de los vientos horizontales en los sistemas valle-montaña.

Según el análisis meteorológico, la contaminación del aire en el VA, se incrementa durante la transición de los períodos secos a lluviosos, condición que favorece la acumulación de contaminantes en la atmósfera y, en consecuencia, aumentan las concentraciones de material particulado con un diámetro menor de 10 y 2.5 micras (PM₁₀ y PM_{2.5} respectivamente). Los estudios sobre emisiones atmosféricas han demostrado que el 79% de estos contaminantes son emitidos por el transporte en la región, el cual ha aumentado en los últimos años (5).

Dada la situación anterior y con el objetivo de tener una estimación aproximada de los aportes de estas fuentes, se realizó un estudio sobre la caracterización química de PM_{2.5} en tres zonas urbanas del VA. En este proceso, los perfiles de las fuentes se identificaron utilizando información de modelos receptores, modelo CMB (6) y el Modelo de correlación de fuentes de partículas SCM 1.0 (7) para evaluar contribuciones previas de las fuentes. Igualmente se analizaron datos de la caracterización química de muestras de PM_{2.5} de tres lugares por fuera del área urbana de la región como contaminación de fondo y se intentó correlacionar las variaciones de las concentraciones horarias de PM_{2.5} registradas en 5 estaciones automáticas de medición de la calidad del aire en el AMVA con el comportamiento del tráfico vehicular, con el fin de comprender mejor la situación ambiental de esta región y el impacto de las emisiones. El estudio evidenció una fuerte influencia asociada al aumento de PM_{2.5} durante las horas de la mañana entre las 7 A.M y las 10 A.M, franja horaria de característica del mayor tráfico vehicular.

Finalmente, con los datos de caracterización de PM_{2.5} tomados en tres zonas del VA donde se encuentran ubicadas estaciones de calidad del aire: Sector Poblado (Estación Politécnico), Robledo (estación UNAL Facultad Minas) y en Laureles (estación UPB), se corrió el modelo Positive Matrix Factorization (PMF) 5.0 EPA (8). Los resultados de la modelación permitieron identificar los perfiles de las fuentes primarias y proporcionaron una comprensión detallada de la influencia de las emisiones vehiculares en la calidad del aire en las zonas de estudio.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

Los datos horarios de concentración PM_{2.5} se obtuvieron de tres estaciones automáticas de la red de monitoreo de calidad del aire de la región a saber: Aguinaga (localizadas en el centro de Medellín), Itagüí (un municipio al sur del VA) y J. Botánico (el Jardín Botánico, en la zona norte cercana al centro de Medellín) (ver Figura 2).



Figura 2. Estaciones de monitoreo. Área Metropolitana del Valle de Aburrá. 2011

Adicionalmente, se analizaron los datos de concentración y de caracterización química de muestras PM_{2.5} tomadas en tres sitios urbanos (estaciones Politécnico, UNAL y UPB).

Además, se utilizaron varios estudios para obtener información sobre la caracterización química de las fuentes de PM_{2.5}. Uno de ellos se basó en el análisis de muestras tomadas en la parte central de un túnel de 6 km de largo para uso de vehículos cerca de la ciudad de Medellín (Túnel de Occidente) (9), como una representación del PM_{2.5}

asociado con el flujo general de vehículos en la ciudad, dado el tránsito de vehículos de características similares a los que circulan por la zona urbana. De otro lado, para la captación de muestras de partículas resuspendidas del piso del túnel relacionadas con el desgaste de neumáticos, llantas, pastas de frenos y material desprendido por fricción y abrasión de las vías, se aplicó una metodología por aspiración y separación mecánica. Se contó con el apoyo del Convenio 410 de 2011 suscrito entre Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA), Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid (PCJIC), Universidad de Antioquia (10) y ECOPETROL (Empresa Colombiana de Petróleos SA).

Otro importante informe técnico consultado fue el Convenio 543 de 2008 suscrito entre el AMVA y el PCJIC (11) sobre la composición química de las emisiones de $PM_{2.5}$ en calderas operadas a carbón (82%), diésel (9%), fuel oil pesado (7%) y gas natural (2%). En este estudio se tomaron muestras isocinéticas de las emisiones de 46 fuentes estacionarias (calderas) del Valle de Aburrá. Se aplicaron los métodos de muestreo 5 y 201A de la EPA (12), utilizando un separador ciclónico en cascada y se midieron las concentraciones de CO , CO_2 , NO_x y SO_2 y los flujos de masa, así como el material particulado para diferentes rangos de tamaño (grueso > $10\ \mu m$; fino, menor de $2.5\ \mu m$; intermedio entre $10\ \mu m$ y $2.5\ \mu m$) capturados en filtros de teflón y cuarzo. Este estudio, financiado por la autoridad ambiental urbana de la región fue realizado por los grupos de investigación GHYGAM, GIGA del PCJIC y UdeA, respectivamente.

Adicionalmente, se obtuvo información sobre la composición química de las emisiones de $PM_{2.5}$ provenientes de motores diésel y gasolina con base en un estudio realizado con dos motores en el Laboratorio de Motores GIMEL de la U de A, como parte de un estudio realizado por PCJIC con el apoyo de ECOPETROL. Para contribuir a visualizar con mayor criterio la influencia de las emisiones producidas por el tráfico vehicular, se llevó a cabo la revisión de diversos estudios e informes técnicos generados por las agencias de control ambiental de la región.

Para el análisis de los materiales capturados paralelamente en los filtros de cuarzo y de teflón, fue necesario colectarlos y almacenarlos siguiendo procedimientos estándar de calidad que se desarrollaron bajo la norma NTC ISO/IEC 17025: 2005 y 17025: 2017 del Instituto Colombiano de Normas Técnicas (ICONTEC) (13), para garantizar la calidad de los datos, identificando y controlando, de manera preventiva y correctiva, los posibles errores en la recolección, transporte, almacenamiento, empaque, conservación y análisis de muestras.

Los análisis de resultados de las caracterizaciones químicas de $PM_{2.5}$ fueron realizados por el Grupo de Higiene y Gestión Ambiental del (PCJIC), con base en los resultados reportados por el Desert Research Institute (DRI) de Nevada - USA, complementados con los análisis realizados por el Laboratorio Alfa 1 en Colombia. Se utilizaron varias técnicas analíticas: espectrofluorometría, fluorescencia de rayos X dispersiva de energía polarizada 3D (Epsilon Modelo 5), para determinación de óxidos minerales; cromatografía iónica (Dionex Modelo 3000) para la cuantificación de aniones y cationes; y el Protocolo de Método Térmico IMPROVE-A para la determinación de carbono orgánico y carbono elemental. Se desarrolló un balance de masa química de los componentes del $PM_{2.5}$ para que la mayor parte de la masa se pudiera reproducir a partir de su especiación química (14).

Además, se correlacionó con información de la literatura científica y trazadores de fuentes, base de datos Speciate (13) (12), asociada con las emisiones provenientes de fuentes vehiculares, calderas a carbón, calderas a fuel-oil, llantas, neumáticos, polvo resuspendido en vías y fuentes naturales.

A partir de los datos obtenidos en los estudios de caracterización química de las muestras ambientales de $PM_{2.5}$ provenientes de las estaciones Politécnico, UNAL y UPB, realizada en entre 2009- 2011, se corrió el modelo PMF 5.0 desarrollado por la EPA (2014) con el fin de estimar los aportes de las fuentes de emisión en el VA.

El modelo PMF5.0, usa la composición química de muestras de aire para identificar el perfil o la huella (f) de N-factores seleccionados, interpretados como fuentes. La forma más utilizada para analizar los datos de la red de PM es el modelo bilineal, que expresa las observaciones de especies de PM como la suma de las contribuciones de varios perfiles de fuentes invariantes en el tiempo. Para este estudio, el modelo apunta a resolver el problema matricial X con columnas de concentración de compuestos simples (j) y filas de días de muestra (i) usando la Ecuación 2. (15). La recuperación de la masa observada (RM), es el parámetro que permite verificar el balance másico.

$$X = G.F + E \quad (1)$$

O en notación indicial:

$$X_{ij} = \sum_{k=1}^n g_{ik} \cdot f_{kj} + e_{ij} \quad (2)$$

Donde:

X_{ij} , es la concentración en el receptor para las j especies del día i

g_{ik} , es la contribución de los k factores el día i

f_{kj} Corresponde a la fracción de los k factores que corresponde a la especie j y,

e_{ij} , es el residuo de la especie j el día i .

La resolución de esta ecuación puede presentar más de una solución, aportando diferentes factores que se ajusten a los datos experimentales (8)

Las contribuciones y los perfiles de los factores se derivan del modelo PMF minimizando la función objetivo Q (ver Ecuación 3):

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left[\frac{g_{ik} \cdot f_{kj} + e_{ij}^2}{s_{ij}} \right] \quad (3)$$

Siendo:

s_{ij} , la incertidumbre de las j especies para el día i . Esta incertidumbre es una combinación del error de medición y la variabilidad en el valor del perfil de la fuente.

Como el modelo trabaja de forma robusta, esto implica que a los "Outliers" no se les permite influir, en gran medida, en el ajuste de las contribuciones y perfiles.

Q (verdadero) es el parámetro de bondad de ajuste calculado que incluye todos los puntos.

Q (robusto) es el parámetro de bondad de ajuste calculado excluyendo los puntos no ajustados por el modelo.

Para mejorar la correspondencia entre los perfiles químicos encontrados por PMF y los perfiles esperados según las fuentes de emisión identificadas, se aplicaron varios tipos de restricciones para refinar los resultados y mejorar su precisión. Estas restricciones imponen suavidad para limitar la variabilidad del perfil (8).

3 RESULTADOS

Dadas las condiciones meteorológicas del estrecho valle rodeado de montañas, durante las épocas de contingencia atmosférica, la acumulación de contaminantes ocurre principalmente cuando las condiciones son estables, es decir, cuando se reduce la radiación solar incidente en la superficie. Por lo tanto, el aire cercano al suelo se enfría y no asciende, provocando que los contaminantes permanezcan en el valle y aumenten las concentraciones, dada la ausencia de corrientes que facilitan la dispersión (16) (ver Figura 3). Durante los períodos de transición entre las estaciones seca y lluviosa, la capa límite presenta alturas promedio más bajas que favorecen dicha condición de estabilidad. En estos períodos ocurre la acumulación de contaminantes y, en consecuencia, se registran las concentraciones más altas del año (PM₁₀ y PM_{2.5}) (17).

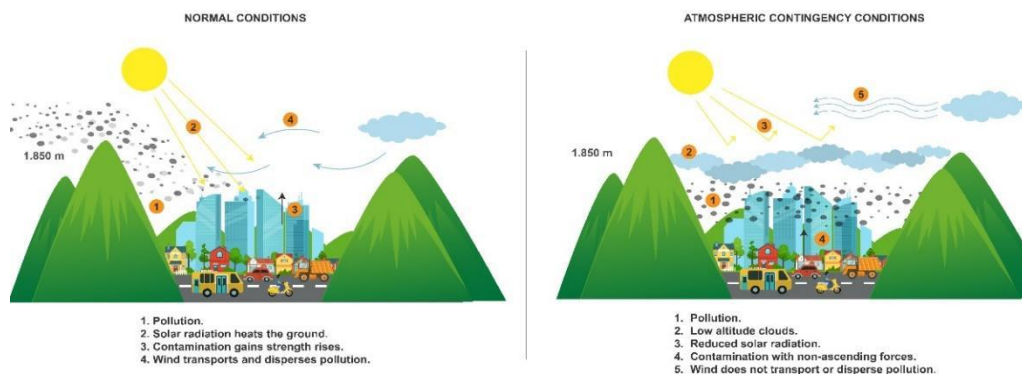


Figura 3. Condiciones normales y de contingencia atmosférica resultante de las condiciones meteorológicas en el Valle de Aburrá. Valle de Aburrá, Colombia.

Fuente: Preparado por los autores.

La influencia vehicular en la calidad del aire ha sido evidenciada en diversos estudios a partir de los registros de la Red de monitoreo de calidad del aire del Valle de Aburrá. Así lo demuestran estudios de calidad del aire en el Valle de Aburrá (17), según los cuales los datos entre 2001-2007 de concentraciones de contaminantes atmosféricos, muestran que algunas estaciones detectan muy bien el comportamiento creciente del $PM_{2.5}$ en concordancia con el aumento del parque automotor dentro de la zona urbana de la región, presentándose incrementos anuales ($\mu g/m^3$) bajos en unas estaciones (4.02) y altos (140) en otras, caso Estación UNAL.

Igualmente, en el informe técnico del periodo de Gestión de episodios evento declarado entre marzo y abril de 2019 (18), al suspenderse la restricción del día sin carro, se observó una variación del Índice de Calidad del Aire - ICA en las estaciones UNAL, El Volador y la Estrella, pasando de ser dañino para grupos sensibles (alerta naranja) a dañino para toda la población (alerta roja) con aumentos en el $PM_{2.5}$ en todas las estaciones de monitoreo, asociado al impacto del transporte en la calidad del aire (19). Esta misma fuente provee importante información sobre el comportamiento horario del $PM_{2.5}$ con los mayores picos de concentración en horas de la mañana.

3.1. Análisis de las concentraciones $PM_{2.5}$ horarias

La situación ambiental de $PM_{2.5}$ en AMVA se puede describir mediante el comportamiento de las concentraciones horarias. La región cuenta con 39 estaciones automáticas fijas, que han permitido medir la concentración de $PM_{2.5}$ en diferentes áreas de la ciudad.

Para cada una de las estaciones se realizó un análisis exploratorio de los datos horarios y diarios. Para el primer caso, la Tabla 1 presenta los resultados generales de los datos horarios que finalmente se analizaron en las estaciones. Como se observa, la estación Itagüí contiene la mayor parte de la información, toda vez que estuvo más tiempo en operación.

Para el conjunto de los 45.850 datos obtenidos, los coeficientes de variación (que indican una mayor variabilidad del $PM_{2.5}$ con respecto a la media) fueron respectivamente para las estaciones Aguinaga, Itagüí y J. Botánico de 0.56, 0.45 y 0.42, en los cuales no se observa una apreciable diferencia. Este coeficiente cambia tanto por horas, como por día y época del año. Sin embargo, puede observarse como Aguinaga es la Estación que presenta mayor variación en la medida, superando a Itagüí en un 25%. Se resalta que el promedio horario de las estaciones ($25.3 \mu g/m^3$), no puede asociarse con una norma, dado que no existe un referente a nivel mundial.

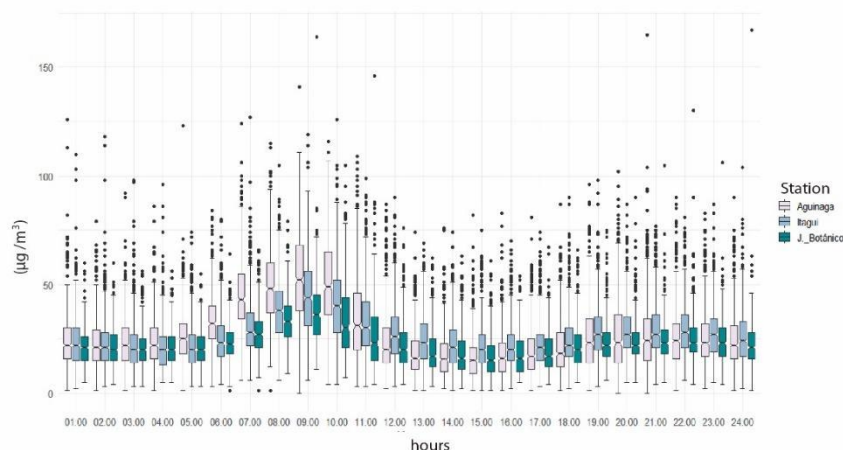
Tabla 1. Datos PM_{2.5} horarios Estaciones de calidad del aire, Valle de Aburrá. 2009 y 2011.

Estación de muestreo	Cantidad de datos	Promedio $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Desviación estándar SD, $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Coefficiente de variación $\text{SD}/\bar{X}$
Aguinaga	15,020	26.1	14.7	0.56
Itagüí	20,156	26.6	11.9	0.45
J. Botánico	10,674	23.1	9.7	0.42
Total datos	45,850	25.3	7.1	

Fuente: Preparado por los autores.

La Figura 4, muestra las concentraciones horarias promedio de las estaciones analizadas, donde puede observarse claramente un aumento considerable de la concentración del PM_{2.5} entre las 7 am y las 10 am. Se evidencia como en la Estación Aguinaga, no sólo la medida de tendencia central de PM_{2.5} es superior (en términos de la mediana), sino también, la variabilidad de esta medición horaria en relación con las otras dos estaciones. Esto es válido en particular para mediciones previas a las 10:00 am, sin embargo, a partir de esta hora se observa un cambio en la escala de las mediciones, dado que la Estación Itagüí, presenta mayores concentraciones. Adicionalmente, a partir de las 17:00 horas, se presenta un ligero incremento de los parámetros de localización de las distribuciones de concentración, pero ahora con medidas de variabilidad inferiores al rango entre las 7:00 am y las 9:00 am. El comportamiento de los datos horarios promedio de 24 horas, muestra valores significativamente altos respecto al conjunto de datos: Aguinaga (8 am, 9 am y 10 am), Itagüí (9 am), y J. Botánico (8 am y 9 am).

En síntesis, todas las estaciones tienen en común las 9 am (y siguientes) con concentraciones significativamente altas influenciadas por las emisiones vehiculares en la franja horaria de mayor tráfico, sumado a los factores meteorológicos desfavorables para la dispersión, geográficos y topográficos propios de valle.

Figura 4. Promedio horario PM_{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). Estaciones de calidad del aire. Valle de Aburrá, Colombia. 2009 – 2011

Fuente: Preparado por los autores.

En la Figura 5, se ilustra el promedio horario de las concentraciones de todas las estaciones de monitoreo estudiadas y las desviaciones estándar. Esta ilustración, permite establecer si hay o no diferencias significativas en la concentración de PM_{2.5} en intervalos horarios, y que cada punto está enmarcado en unos límites que corresponden a un intervalo de confianza del 95%, por tanto, se puede decir que, mientras los intervalos que rodean cada punto no se traslapan, existe una diferencia significativa en el promedio de las mediciones por hora. Ejemplo de esto, son los intervalos de confianza entre 8:00 y 9:00 am, no tanto así, los presentados entre las 20:00 y 21:00 horas.

Debe destacarse que el promedio de $PM_{2.5}$ más bajo en las mediciones de todas las estaciones, se presenta entre las 14:00 y las 16:00 horas, explicable por la mayor radiación que facilita un componente vertical de desplazamiento a mayores alturas de la superficie.

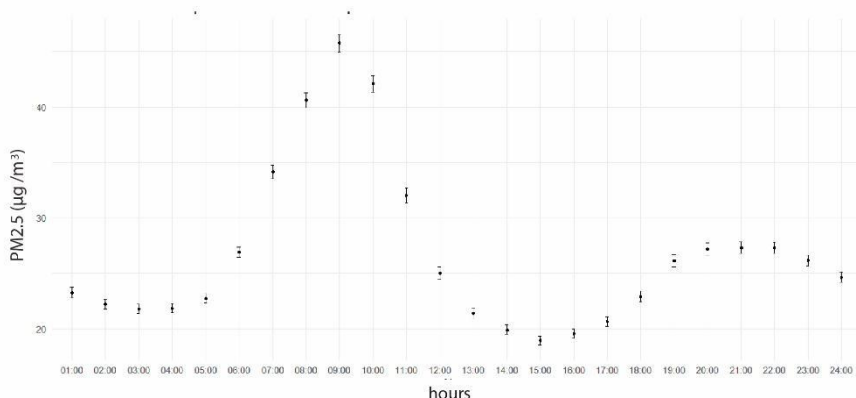


Figura 5. Comportamiento horario de $PM_{2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). Valle de Aburrá, Colombia. 2009 – 2011.
Fuente: Preparado por los autores.

Coherente con una mayor cantidad de flujo vehicular desde las 6:00 am hasta las 11:00 pm, puede observarse el impacto del comportamiento horario del $PM_{2.5}$ en relación con los días de actividad laboral y no laboral (Ver Figura 6). El intervalo de confianza de ambos parámetros, es considerablemente superior en el caso de los días laborales. Los autores postulan que estas variaciones son el efecto del tráfico de vehículos en las horas pico y el impacto de las reacciones atmosféricas asociadas a las emisiones y a la formación de aerosoles, dada la abundancia de sulfatos, amoniaco y nitratos en las muestras analizadas de $PM_{2.5}$, como se verá posteriormente. En las primeras horas de la mañana, al igual que en las mediciones de la hora 24:00, no se observa diferencia significativa en las mediciones de $PM_{2.5}$ atribuible al menor flujo vehicular asociado.

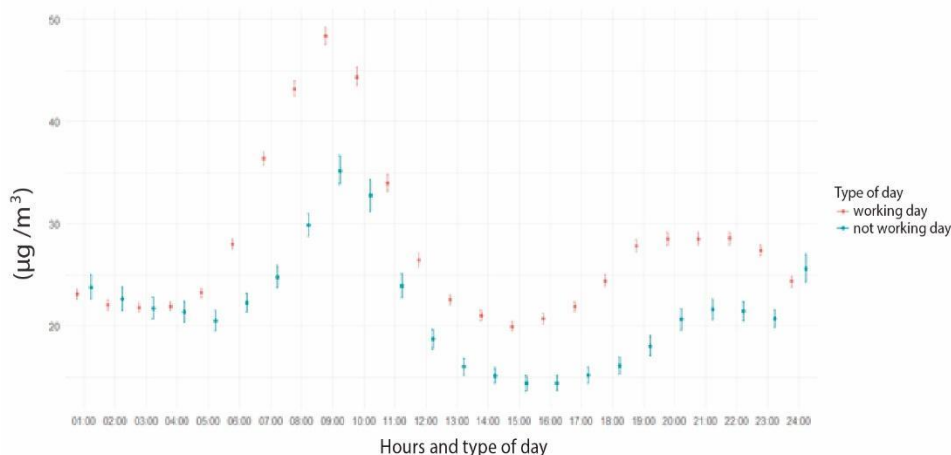


Figura 6. Intervalos de confianza $PM_{2.5}$ por hora y tipo de día (Laboral y No Laboral)
Valle de Aburrá, Colombia. 2009 - 2011.
Fuente: Preparado por los autores.

Con respecto al promedio $PM_{2.5}$ anual, se evidencia cómo para el periodo 2009-2011, en las estaciones analizadas, se supera la norma estándar anual de calidad del aire ($25 \mu\text{g}/\text{m}^3$) establecida por el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, reglamentada por la Resolución 610 de 2010 (20) y también el lineamiento de la OMS ($10 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Es importante tener en cuenta que estos resultados no muestran la inhibición de la

dispersión de contaminantes que ocurre durante los períodos de transición de épocas secas a lluviosas, dado que no fue el foco del estudio. Sin embargo, este análisis ha sido descrito por expertos del AMVA (19) en un informe técnico publicado durante una de las contingencias atmosféricas.

La Figura 7, presenta los intervalos de confianza simultáneos para PM_{2.5} (25 µg/m³ promedio por día de la semana), confirmando con una confianza del 95%, que puede rechazarse la hipótesis de igualdad promedio los días lunes y domingo respecto de cualquier otro día de la semana y entre ellos. No puede rechazarse la hipótesis con el mismo nivel de confianza de los martes, miércoles, jueves, viernes y sábado, que sean iguales estadísticamente al promedio PM_{2.5} (25 µg/m³).

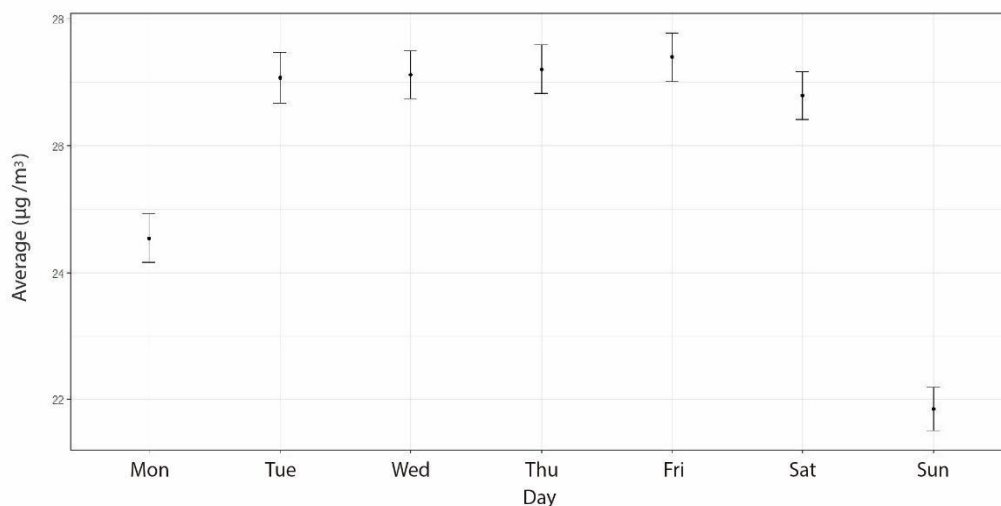


Figura 7. Intervalos de confianza PM_{2.5} promedio (µg /m³) por día de la semana Valle de Aburrá, Colombia. 2009 - 2011.

Fuente: Preparado por los autores.

La incidencia del tráfico en relación con las concentraciones de PM_{2.5}, es coherente con el comportamiento horario del tráfico vehicular [17] dado el mayor tránsito que ocurre entre las 6 y 9 y las 18 y 20 horas, según valores picos y valles horarios del PM_{2.5} (Ver Figura 8). En este contexto, se evidencia un desplazamiento entre las horas pico de tránsito y la concentración de PM_{2.5}, afectado parcialmente por reacciones secundarias entre los aerosoles, mostrando la incidencia del tráfico de vehículos sobre las emisiones de PM_{2.5}.

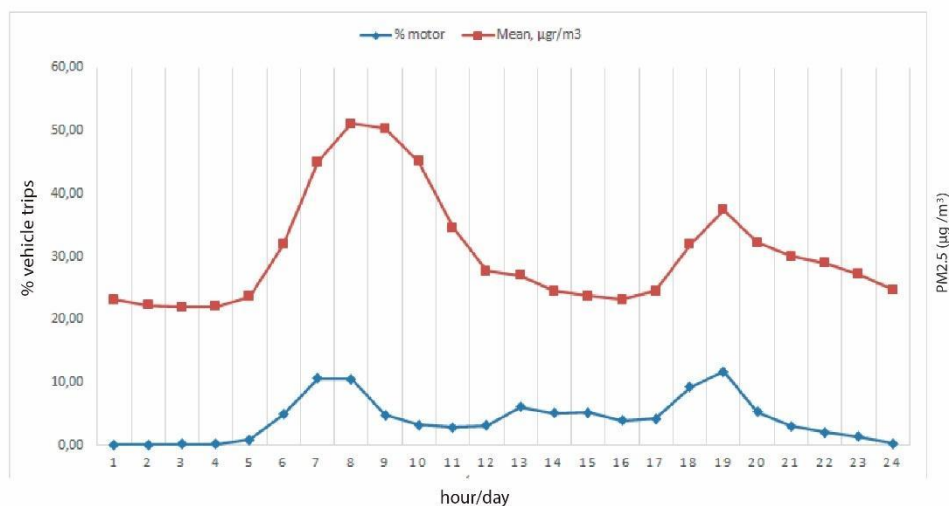


Figura 8. Distribución PM_{2.5} (µg/m³) promedio y viajes-hora/día. Valle de Aburrá, Colombia. 2009 – 2011.

Fuente: Preparado por los autores.

3.2. Caracterización química del PM_{2.5} e Inferencia de fuentes vehiculares basado en la caracterización del PM_{2.5}

Con base en el análisis químico de las muestras realizado por el DRI (Desert Research Institute), se obtuvo la caracterización química del PM_{2.5} en las estaciones estudiadas presentada en la Tabla 2. El balance de masa fue aceptable entre 80% y 120% (21).

Se observa para todas las zonas un mayor contenido de materia orgánica entre 53.0 % y 67.7%. En la fracción de iones es dominante el sulfato y es notoria la determinación de amonio, infiriendo la formación de sulfato de amonio (NH₄)₂SO₄.

Tabla 2. PM_{2.5} (µg/m³) y Composición química (% en masa) promedio.

Sitio Parámetro	POLI promedio	POLI SD	UNAL promedio	UNAL SD	UPB promedio	UPB SD
Concentración PM _{2.5} (µg/m ³)	27.94	7.58	32.8	8.53	20.74	5.81
OC (%)	27.31	7.43	23.13	6.29	30.57	7.97
EC (%)	25.69	7.13	44.53	11.98	30.22	11.08
OC/EC	1.06	1.04	0.52	0.53	1.01	0.72
Nitratos (%)	0.53	0.17	0.64	0.76	0.39	0.30
Sulfatos (%)	10.85	2.15	7.03	1.86	10.76	3.54
Na ⁺ (%)	1.72	0.55	0.81	0.45	1.62	1.06
Amonio (%)	2.77	0.85	2.14	1.14	2.49	0.66
K ⁺ (%)	0.93	0.34	0.50	0.24	0.93	0.41
Ca iónico (%)	0.60	0.19	0.38	0.21	0.33	0.15
SO ₃ (%)	4.07	3.43	2.06	0.96	1.30	0.69
Al ₂ O ₃ (%)	0.56	1.29	0.14	0.36	0	0

Sitio Parámetro	POLI promedio	POLI SD	UNAL promedio	UNAL SD	UPB promedio	UPB SD
SiO ₂ (%)	2.17	1.63	1.22	0.71	1.00	0.71
Fe ₂ O ₃ (%)	1.66	0.69	1.03	0.41	0.79	0.46
CuO (%)	0.08	0.06	0.02	0.02	0.06	0.03
ZnO (%)	1.34	0.78	0.41	0.26	0.48	0.37
PbO (%)	0.78	0.72	0.3	0.33	0.37	0.39

Fuente: Preparado por los autores.

En la literatura se referencian trazadores que permiten inferir sobre aportes en la contaminación del aire y de manera particular basados en la caracterización química del PM_{2.5}. Se puede inferir sobre la presencia de emisiones de las siguientes fuentes:

- Biomasa, de acuerdo con los parámetros EC, OC y K (22).
- Fuentes Vehiculares (VM), EC, $1.0 < OC/EC < 4.2$ (22).
- Emisiones vehiculares diésel (VD), OC, EC, Ni y Zn (23,24); $OC/EC < 1.0$ (23)
- Emisiones vehiculares gasolina (VG), OC, sulfatos y trazas de plomo (Pb) (24)
- Polvo resuspendido (Vi), óxidos de Aluminio, Hierro (Fe) y Silicio (Si) (25)
- Calderas a carbón (CC), sulfatos (24)
- Fuentes naturales N, contenido de OC, (24)
- Construcciones Co, Óxido de Silicio, Hierro y Aluminio (25).

La Figura 9, ilustra las composiciones promedio del PM_{2.5} evaluada en las estaciones PCJIC (POLI), UNALy UPB. En la estación UNAL, el mayor valor de EC (44.5%), infiere mayor influencia de tráfico (VM) (22), coherente con las características de flujo vehicular de alta pendiente y en conectividad con el occidente del departamento de Antioquia. Esta estación también arroja el mayor promedio en concentración de PM_{2.5}, dada la influencia de las fuentes vehiculares y la ubicación de la estación. La estación UPB con mayor impacto de tráfico liviano a gasolina (VG), es coherente con el mayor contenido (%) de sus trazadores OC (30.6) y Sulfatos (10.8) (24). En la estación Politécnico, igualmente se observan trazadores diésel (23) (26), dada la alta circulación de vehículos pesados en vías arteriales, EC (25.7%) y Zn (1.3%). En cuanto a los valores estimados de las relaciones OC y EC (OC/EC) para las estaciones POLI, UNAL y UPB, fueron respectivamente 1.06, 0.52 y 1.01. Por lo tanto, de acuerdo con la revisión científica, es posible inferir sobre una mayor fuente de aporte de las emisiones diésel en la estación UNAL como se evaluó en el ítem anterior.

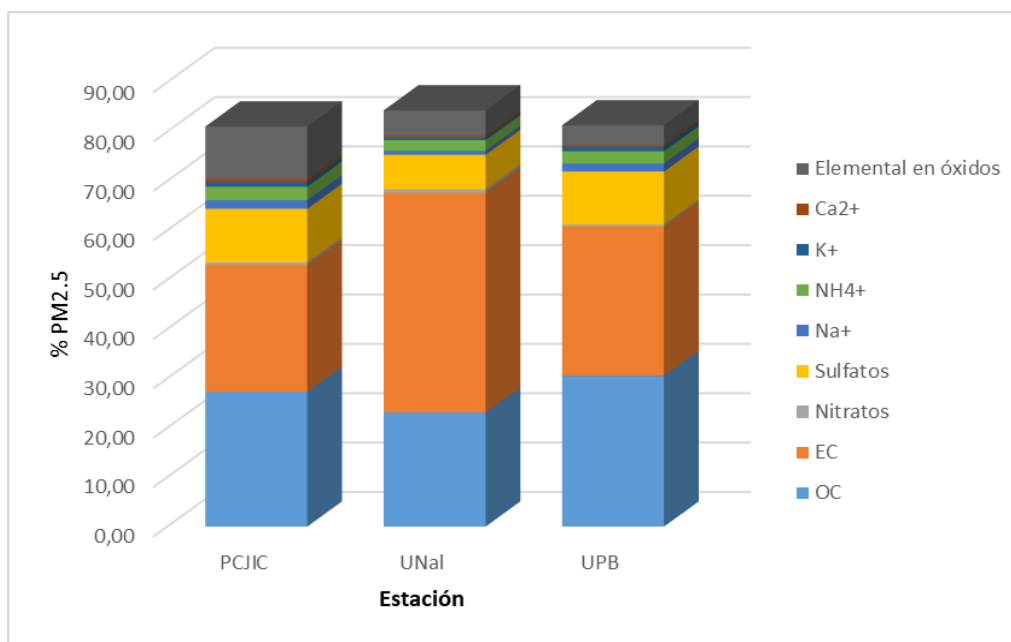


Figura 9. Composición Química PM_{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) promedio en las estaciones Politécnico, U. Nal y UPB. Valle de Aburrá, Colombia. 2009 – 2011
Preparado por los autores.

3.3 Estimación de aportes de fuentes modelo PMF- Periodo 2009-2011

Los datos de concentración de PM_{2.5} utilizados para alimentar el modelo PMF fueron tomadas de las estaciones de monitoreo Politécnico, UNAL y UPB ubicadas en la ciudad de Medellín. Las matrices de datos (correspondientes a filtros de cuarzo y PTFE) se compusieron en un rango de muestras de acuerdo con las estaciones seleccionadas y 30 especies caracterizadas. Todas las muestras disponibles para cada conjunto de datos fueron consideradas en cada escenario modelado: Politécnico (50), UNAL (50), UPB (30). La concentración en masa de PM_{2.5} fue escogida como una variable total.

Para cada matriz de datos de concentración, se estimó un valor de incertidumbre basado en la guía de usuarios del modelo PMF (8), además de los errores de medición gravimétricos, de área de filtrado y de monitoreo (incertidumbre combinada). Valores por debajo del LD fueron remplazados por LD/10 (27) y las incertidumbres estimadas de concentración de masa fueron ajustadas hasta 3 veces su valor para reducir el peso de las grandes incertidumbres en el ajuste del modelo (28).

Se agregó una incertidumbre adicional para tener en cuenta la incertidumbre del muestreo, utilizando la metodología descrita en estudio *Quantifying road dust resuspension in urban environment by Multilinear Engine: A comparison with PMF_{2.5}* (29). El modelo se ejecutó repetidamente (20 veces para cada simulación), con el mismo número de factores n (6), y la variación de los valores Q , los residuos escalados, las estadísticas de regresión (R^2 y pendiente) se evaluaron de acuerdo con el conocimiento físico de las fuentes locales.

En el caso de los residuos escalados, para $n = 6$, se encontró que el 83% estaba en promedio entre el rango $[-3,3]$ para todos los elementos. En las simulaciones convergentes finales se encontró una diferencia porcentual promedio entre Q_{true} y Q_{robust} (4,3%), en el rango de valores de otros casos (33) (34). Una media del 84% de las especies incluidas fueron calificadas como “fuertes”. Las relaciones S/N son menos valiosas en este análisis debido a la incertidumbre fija asignada a todas las especies (8). En consecuencia, las categorizaciones de especies se evaluaron utilizando análisis residuales y estadísticas observadas/predichas después de las ejecuciones base iniciales. Utilizando los resultados encontrados para Q (Q_{robust}) y para un número de 6 factores, se encontró un valor medio de la relación $Q_{\text{robust}}/Q_{\text{exp}}$ aproximadamente igual a la unidad para todos los escenarios modelados. En este estudio, las corridas de la Base se reprodujeron en promedio al menos en el 96%

de los factores, mostrando factores numéricos apropiados para cada estación de monitoreo y soluciones satisfactoriamente robustas (8). La masa de recuperación, como relación entre las concentraciones modeladas y gravimétricas de PM_{2.5}, muestra una fuerte correlación (R^2 media = 0,82) y una pendiente (media) de 0,83. Este resultado evaluó que el grupo fuente representó el 96% de la masa de PM_{2.5} como media. Un resumen de los resultados encontrados en este estudio se presenta en la Tabla 3

Tabla 3. Resumen de los resultados encontrados para cada escenario modelado en PMF

Settings	POLI	UNAL	UPB
# Factors	6	6	6
Seed	100	100	100
non-weak data	25	25	26
Weak Species	Al, Si, Fe, Zn, Cd	Mg, Cr, Fe, Cu, Cd	Cr, Fe, Ni, Sb
Bad Species	--	--	--
Samples	50	50	30
Qexpected	800	800	444
Q(Robust)	843.70	799.00	449.30
Q(True)	865.20	820.40	501.40
Q/Qexpected	1.05	0.99	1.01
R^2	0.83	0.73	0.90
Slope	0.85	0.74	0.90
Extra-Uncertainty	8%	9%	5%
Observed Con. ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	28.07	31.48	20.74
Estimated Con ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	26.91	30.39	20.39
% Reconstructed mass	95.88%	96.52%	98.30%
Swaps by factors	0	0	0
BS Mapping	96	95	96
%dQ		-0.005131132	-0.004228377

Fuente: Preparado por los autores

Con respecto a la estimación de errores, en los resultados encontrados para los tres escenarios simulados con PMF no se observaron ambigüedades rotacionales significativas ni errores aleatorios sustanciales en el conjunto de datos después de ejecutar los métodos DISP y BS. Los resultados del método DISP no mostraron intercambios de factores para todos los valores de dQmax. En el análisis BS, los resultados se consideraron estables y no todos los factores base se asignaron a los factores de arranque. En promedio, el número de factores que se mapearon correctamente fue del 96%, lo cual concuerda con la guía de usuarios del PMF (8). Si se mapean más del 80% de los factores, las incertidumbres de la ejecución de BS se pueden interpretar y el número de factores puede ser apropiado.

Finalmente, para mejorar la correspondencia entre los perfiles químicos encontrados por el modelo PMF y los perfiles esperados en base a las fuentes de emisión identificadas, se restringieron algunos perfiles y el %dQ se estableció por defecto en 0.5% para todas las restricciones suaves, asegurando así que no se produjeran cambios significativos con respecto a los resultados sin restricciones (27).

A continuación, se presentan los resultados arrojados en la modelación:

3.3.1. Estimación de aportes de fuentes modelo PMF- Periodo 2009-2011. Estación Politécnico

La corrida del modelo PMF en la estación de monitoreo Politécnico, se realizó asignando las variables Al, Si, Fe, Zn y Cd como “débiles”, ya que el modelo no las explicaba adecuadamente. Las demás variables se mantuvieron como “Fueres”. Se probaron simulaciones con 5, 6 y 7 factores con 100 puntos como número inicial para todas las corridas y diferentes números de factores, con un 8% de incertidumbre adicional para obtener el mejor ajuste Q como medida para alcanzar un valor aceptable en la relación Q/Qexp (1.05), lo que confirma una buena convergencia del modelo.

Los resultados mostrados son de la simulación que mejor se ajustó a los datos medidos con 50 muestras validadas, una simulación de 6 factores que presentó un coeficiente de correlación lineal $R^2 = 0.83$ y 95.8% de masa reconstruida. No se configuraron restricciones en el modelo base final.

El análisis PMF permitió identificar seis perfiles de fuentes primarias, proporcionando una comprensión detallada de las fuentes de contaminación y sus impactos: quema de biomasa (15.2%), emisiones de vehículos (26.4%), combustión industrial (22.9%), fuentes secundarias (9.1%), emisiones en suspensión (17.7%) y fuente mixta de Pb y Non Exhaust (11.4%). La Figura 9, ilustra los perfiles de las fuentes identificados, observados en el área.

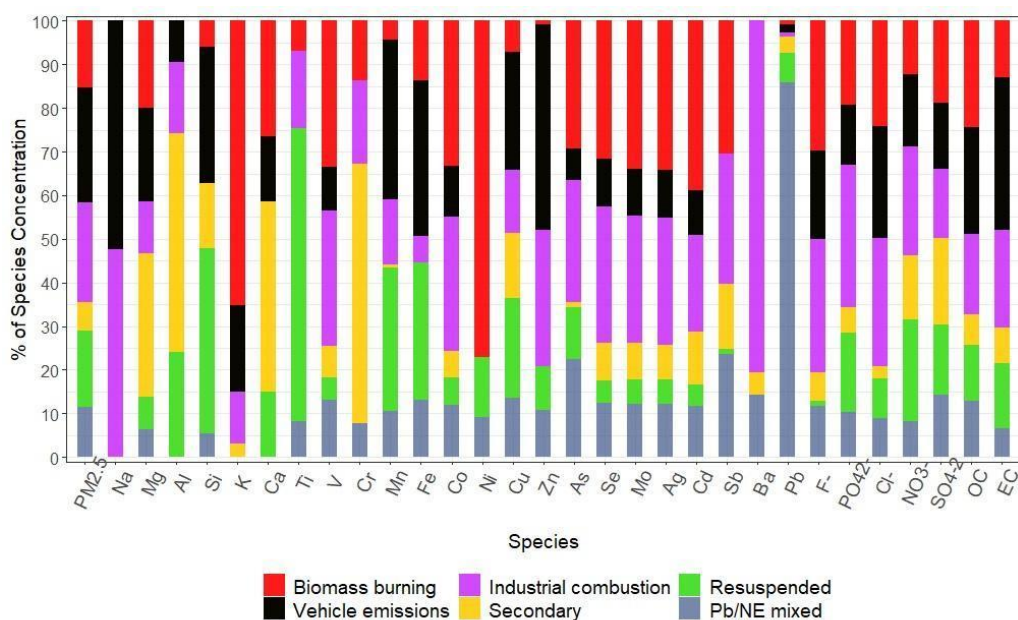


Figura 9. Perfil de fuentes en la estación de monitoreo el POLI
Fuente: Preparado por los autores

3.3.2. Estimación de aportes de fuentes modelo PMF- Periodo 2009-2011. Estación UNAL

Para identificar la distribución de fuentes de $PM_{2.5}$ en la estación de monitoreo UNAL, se realizaron corridas del modelo PMF asignando las variables Mg, Cr, Fe, Cu y Cd como "débiles", ya que el modelo no las explicaba correctamente. Se probaron simulaciones con 6 y 7 factores, utilizando una incertidumbre adicional del 9% para obtener la mejor solución en términos de interpretaciones físicas y estadísticas con una relación Q/Qexp aceptable (0.99), que indicaba una adecuada convergencia del modelo.

Los resultados del modelo PMF fueron analizados y ajustados para la cantidad de factores a modelar de forma independiente, según los componentes y trazadores que permitieran asociarlos a un perfil de fuente específico. La mejor solución obtenida fue para 6 factores, identificándose 6 perfiles de origen para modelar con 50 muestras validadas, donde el RM promedio estimado de $PM_{2.5}$, fue de $30.39 \mu g/m^3$, contra una masa observada de $31.48 \mu g/m^3$, lo que representó 96.52% y un coeficiente de correlación lineal $R^2 = 0.73$. En la Tabla 3, se presenta un resumen de los valores informados en las ejecuciones del modelo PMF para 6 factores. No se configuraron restricciones en el modelo base final.

La contribución relativa de las fuentes de emisión al PM_{2.5} se evaluó mediante el análisis de seis factores modelados en el PMF. Se determinó que los aportes fueron: fuente no identificada (8.9%), emisiones secundarias (14.1%), emisiones vehiculares (20.8%), resuspendidos y NE (14.6%), industriales (12.5%) y combustión industrial (29.1%). La Figura 10, muestra las distintas composiciones químicas de los perfiles de fuentes identificados mediante el modelo PMF en la estación de monitoreo de UNAL, destacando sus contribuciones a los niveles de PM_{2.5} en el área.

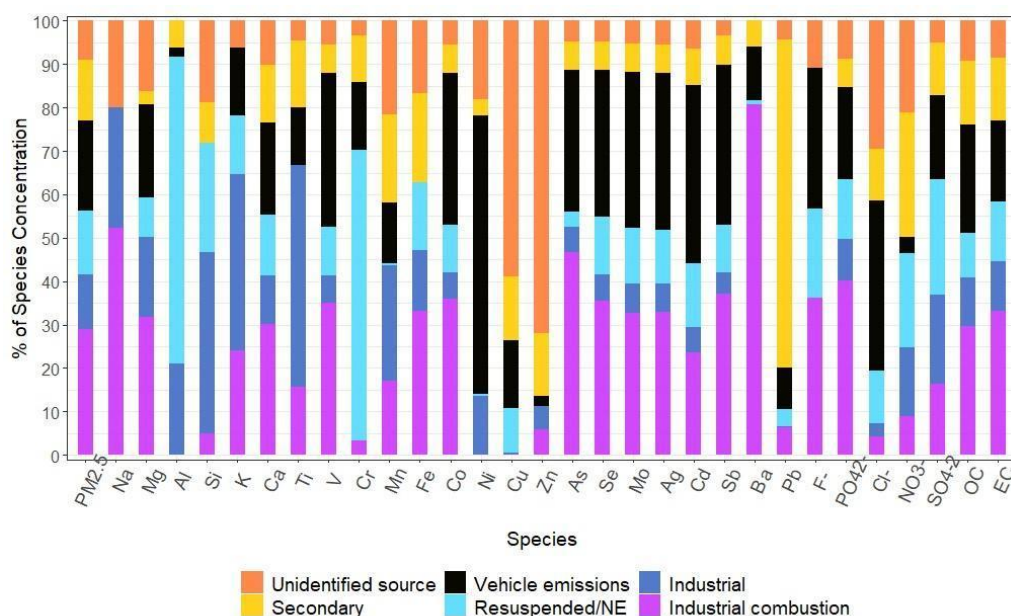


Figura 10. Huellas de perfil de fuentes en la estación de monitoreo de la UNAL
Fuente: Preparado por los autores

3.3.3. Estimación de aportes de fuentes modelo PMF- Periodo 2009-2011. Estación UPB

Para estimar el aporte de las fuentes al PM_{2.5} medido en la estación de monitoreo de la UPB, se realizaron corridas de modelo PMF clasificando las variables Cr, Fe, Ni y Sb como "débiles" dado que el modelo no las explicaba bien. Se probaron simulaciones con 6 y 7 factores, añadiendo un 5% de incertidumbre adicional para encontrar la mejor solución física y estadística, logrando una relación Q/Qexp aceptable (1.01), lo que indicó una adecuada convergencia del modelo.

Los resultados del modelo PMF se analizaron y ajustaron para la cantidad de factores que se modelaron de forma independiente, en función de los componentes y trazadores que podrían vincularse a perfiles de fuentes específicos. La mejor solución identificó 6 perfiles de fuentes utilizando 30 muestras validadas, con un RM promedio de PM_{2.5} de 20.39 µg/m³, en comparación con una masa observada de 20.74 µg/m³, que representa el 98.30%, y un coeficiente de correlación lineal R² = 0.90.

Para determinar los perfiles del modelo base final, OC y NO₃⁻ se elevaron al máximo y se redujeron al máximo, respectivamente, en la fuente Vehicular, y el SO₄²⁻ se estableció en cero. En el caso de las concentraciones de Cu y Mn, se redujeron en la fuente secundaria, además el Ti se estableció en cero y el EC se redujo al máximo; para el Factor 6, correspondiente al polvo resuspendido, CE y NO₃⁻ se redujeron al máximo para mejorar el ajuste, el SO₄²⁻ también se limitó reduciendo a cero su concentración.

Las contribuciones relativas de las fuentes de emisión de PM_{2.5} se evaluaron mediante el análisis de seis factores modelados en el PMF. Se determinó que los aportes fueron: industriales (8.5%), emisiones vehiculares (27.3%), combustión industrial (38.7%), fuentes metalúrgicas (5.4%), secundarias (17.4%) y resuspendidas (2.7%). En la

Figura 11, se presentan las composiciones químicas únicas de cada fuente identificada en la estación de monitoreo de la UPB.

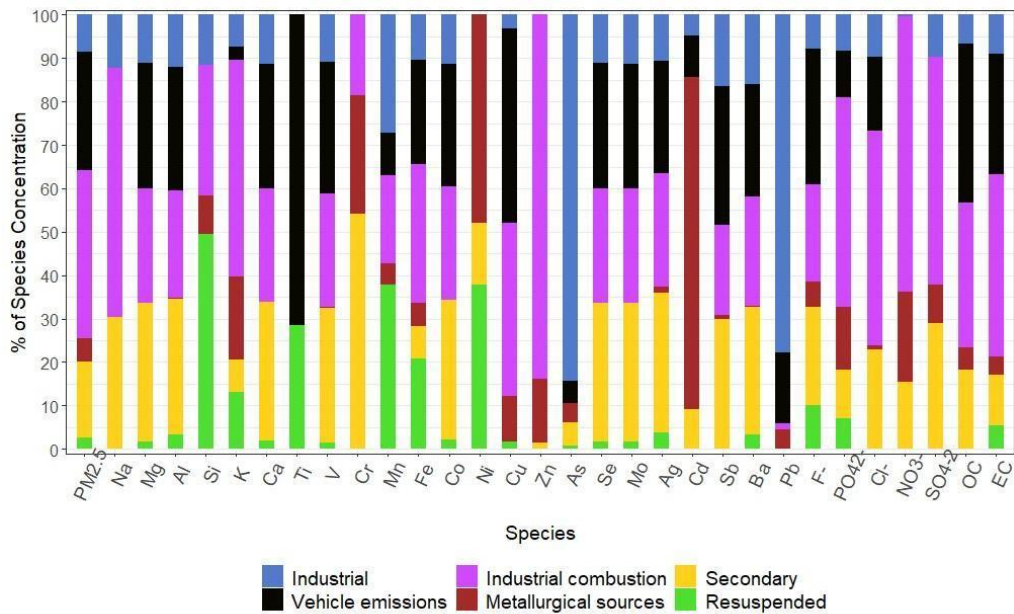


Figura 11. Huella de perfil de fuentes en la estación de monitoreo UPB.
Fuente: Preparado por los autores

En la Figura 12, se presentan los porcentajes de aporte de las diferentes fuentes de emisión a las concentraciones de $PM_{2.5}$ en las estaciones de monitoreo Politécnico, UNAL y UPB. Los aportes al $PM_{2.5}$ de las fuentes vehiculares variaron entre 20.8% y 27.3%, siendo con la combustión industrial (variación entre 22.9% a 38.7%) las fuentes que mayor contribuyen a la concentración de este contaminante en las zonas de estudio.

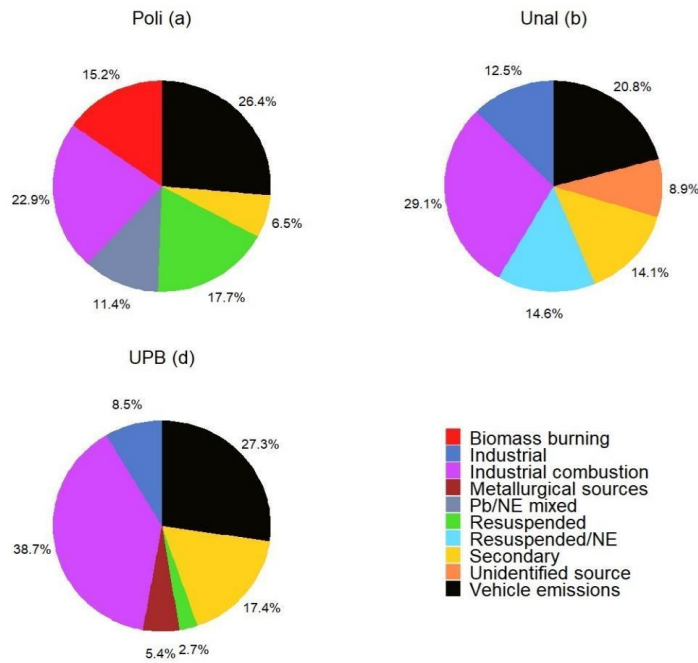


Figura 12. Distribución de fuentes de $PM_{2.5}$ en estaciones de monitoreo el POLI (a), UNAL (b), UPB (c)

Fuente: Preparado por los autores

4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Durante el período de estudio y para la mayoría de las estaciones estudiadas el PM_{2.5} anual superó el estándar de calidad del aire establecido en la Resolución anterior 610 de 2010 del Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia.

A partir del análisis de datos de concentraciones horarias recolectadas durante los años 2009 a 2011 en tres estaciones de monitoreo del VA (Politécnico, UNAL y UPB), se observó un aumento considerable de la concentración de PM_{2.5} entre las 7 AM y las 10 AM, influenciadas por las emisiones vehiculares en la franja de mayor tráfico.

El PM_{2.5} en las zonas estudio (Poblado, Robledo y Laureles) presenta el mayor contenido de materia carbonácea y mayor proporción de iones dominantes en sulfatos, coherente con la caracterización típica de áreas urbanas a nivel mundial.

Los sulfatos (SO₄⁻²), Amonio y en menor proporción (NO₃⁻), son constituyentes importantes en el PM_{2.5}, originados por emisiones secundarias derivadas del tráfico automotor y procesos de combustión industrial.

La aplicación del modelo PMF a partir de datos obtenidos durante el periodo 2009 a 2011 en las zonas de estudio Poblado, Robledo y Laureles, facilitó una comprensión detallada de la influencia de las fuentes vehiculares coherente con trazadores reportados en la literatura y un balance de masa aceptable.

Otras fuentes de emisión fueron identificadas en las zonas de estudio: quema de biomasa, combustión industrial, fuentes secundarias, emisiones en suspensión y fuente mixta de Pb y Non Exhaust, en concordancia con estudios actuales.

5 CONCLUSIONES

Durante el período de estudio y para la mayoría de las estaciones estudiadas el PM_{2.5} anual superó el estándar de calidad del aire establecido en la Resolución anterior 610 de 2010 del Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia.

El PM_{2.5} en las zonas estudio (Poblado, Robledo y Laureles) presenta el mayor contenido de materia carbonácea y mayor proporción de iones dominantes en sulfatos, coherente con la caracterización típica de áreas urbanas a nivel mundial.

Una información histórica importante para las autoridades ambientales está disponible para comprender el comportamiento de las fuentes vehiculares influencia y su variabilidad en los altos niveles del PM_{2.5} en la ciudad. Este análisis puede considerarse como una forma novedosa de utilizar los datos horarios del PM_{2.5} y como información útil sobre el impacto de los vehículos en la contaminación por partículas finas.

Los sulfatos (SO₄⁻²), Amonio y en menor proporción (NO₃⁻), son constituyentes importantes en el PM_{2.5}, originados por emisiones secundarias derivadas del tráfico automotor y procesos de combustión industrial.

La aplicación del modelo PMF a partir de datos obtenidos durante el periodo 2009 a 2011 en las zonas de estudio Poblado, Robledo y Laureles, facilitó una comprensión detallada de la influencia de las fuentes vehiculares coherente con trazadores reportados en la literatura y un balance de masa aceptable.

Otras fuentes de emisión fueron identificadas en las zonas de estudio: quema de biomasa, combustión industrial, fuentes secundarias, emisiones en suspensión y fuente mixta de Pb y Non Exhaust, en concordancia con estudios actuales.

Se ha llegado a una mayor comprensión del problema de contaminación de PM_{2.5} en la región, diferenciando los aportes de las emisiones vehiculares tanto para diésel como para gasolina a partir de un análisis de inferencia de fuentes de acuerdo con la revisión científica realizada en el estudio

Los hallazgos contribuyen a la validación futura de estudios experimentales locales facilitando la comprensión de la influencia de las Fuentes de mayor aporte al PM_{2.5}, como información base para la toma de decisiones, de parte de los organismos de control.

6 AGRADECIMIENTOS

Los autores reconocen el apoyo al financiamiento del proyecto al Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, ECOPETROL y a la Autoridad Ambiental Urbana Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA).

7 BIBLIOGRAFÍA

[1] WHO World Health Organization. 9 out of 10 people worldwide breathe polluted air, but more countries are taking action. [Online].; 2018. Acceso 2 de Mayo de 2018. Disponible en: <https://www.who.int/news/item/02-05-2018-9-out-of-10-people-worldwide-breathe-polluted-air-but-more-countries-are-taking-action> .

[2] Correa M, Zuluaga C, Palacio C, Pérez J, Jiménez J. Acoplamiento de la libertad libre con el campo de vientos locales en una región tropical de topografía compleja. Caso de estudio: Valle de Aburrá, Antioquia, Colombia. Dyna. 2009; 76(150). Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/24562>

[3] DANE. [Online]; 2019. Acceso 22 de Agosto de 2019. Disponible en: <https://www.dane.gov.co/files/censo2018/informacion-tecnica/presentaciones-territorio/190822-CNPV-presentacion-Antioquia-Valle-de-Aburra.pdf> .

[4] Instituto Colombiano Agustín Codazzi. Mapas habilitados. [Online]. Acceso 12 de Febrero de 2023. Disponible en: <https://igac.gov.co/catastro-multiproposito/mapa-de-habilitados> .

[5] AMVA. Acuerdo Metropolitano N° 04- Protocolo del Plan Operacional para Enfrentar Episodios de Contingencias Atmosféricas en la Jurisdicción del Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Medellín. Disponible en: <https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/Documents/POECA/Acuerdo-Metropolitano-04-de-2018-POECA.pdf>. 2018.

[6] Watson J. Protocol for applying and validating the CMB model for PM_{2.5} and VOC. Reno Nevada, United States. U.S. Environmental Protection Agency. 2004. Disponible en: https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-10/documents/cmb_protocol.pdf

[7] Gómez M, Saldarriaga J, Correa M, Posada E, Castrillon F. Modelación estadística de los aportes de las vías como fuentes de emisión a las partículas totales en suspensión según modelo MCF, zona centro de Medellín Antioquia - Colombia, 2004. Dyna. 2007; 74 (153). Disponible en: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/939>.

[8] US-EPA. Positive Matrix Factorization (PMF) 5.0 Fundamentals and User Guide. [Online]; 2014. Disponible en: https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-02/documents/pmf_5.0_user_guide.pdf .

[9] Gómez M, Posada E, Saldarriaga J, Correa M. Evaluación del impacto en la concentración del PM_{2.5} a partir del mejoramiento del combustible en la calidad del aire del Valle de Aburrá.; 2011. AMVA; POLITÉCNICO COLOMBIANO JAIME ISAZA CADAVID (Grupo de Higiene y Gestión Ambiental, GHYGA); UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA (Grupo Ingeniería y Gestión Ambiental, GIGA). ISBN: 978-958-9090-16-9.

[10] AMVA , Politécnico Colombiano JIC , Universidad de Antioquia. Evaluación del impacto de la reducción del contenido de azufre en la gasolina en el Valle de Aburrá, Convenio AMVA 410 de 2011.

<https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/Biblioteca-aire/Combustibles/06-Evaluacion-reduccion-contenido-azufre-combustible-2011.pdf>. 2011.

[11] AMVA , Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid. Convenio 543 de 2008. Caracterización PM_{2,5} en tres zonas del Valle de Aburrá. 2010.

[12] Environmental Protection Agency - EPA. Air Emissions Modeling. [Online].; 2009.. Disponible en: <https://www.epa.gov/air-emissions-modeling/speciate-2> .

[13] ICONTEC. Norma técnica colombiana NTC ISO/IEC 17025. Disponible en: <http://www.saludcapital.gov.co/ctdlab/publicaciones/2015/norma%20tecnica%20colombiana%2017025.pdf>. 2005.

[14] Hand J, Malm W. Review of the Improve equation for estimating ambient light extinction coefficients. Fort Collins, Colorado: Co-lorado State Univesity CIRA. Disponible en: http://vista.cira.colostate.edu/IMPROVE/Publications/GrayLit/016_IMPROVEeqReview/IMPROVEEquationReview.pdf.

[15] Paatero P, Tapper U. Positive matrix factorization: a non-negative factor model with optimal utilization of error estimates of data values. Environmetric. 1994; 5(111-126). Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1002/env.3170050203>

[16] AMVA. Calidad del Aire. Obtenido de Condiciones especiales del Valle de Aburrá. [Online].; 2019.. Disponible en: HYPERLINK "https://www.metropol.gov.co/ambientales/calidad-del-aire/generalidades/condiciones-especiales" <https://www.metropol.gov.co/ambientales/calidad-del-aire/generalidades/condiciones-especiales> .

[17] Bedoya J, Martínez E. Air quality in the Aburrá Valley Antioquia-Colombia. Dyna. 2009; 76(7-15). Disponible en: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/10241>

[18] UPB , AMVA , SIATA , UNAL , PCJIC. Plan Operacional para Enfrentar Episodios Críticos de Contaminación Atmosférica en el Valle de Aburrá. [Online].; 2016.. Disponible en: [https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/Biblioteca-aire/Informes-Periodo-Gestion-de-Episodios/Informe Contingencia Marzo 2016.pdf](https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/Biblioteca-aire/Informes-Periodo-Gestion-de-Episodios/Informe%20Contingencia%20Marzo%202016.pdf) .

[19] UPB , AMVA , SIATA , UNAL , PCJIC. Plan Operacional para Enfrentar Episodios Críticos de Contaminación Atmosférica en el Valle de Aburrá. Mede-llín. Disponible en: [https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/Biblioteca-aire/Informes-Periodo-Gestion-de-Episodios/Informe Contingencia Marzo 2016.pdf](https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/Biblioteca-aire/Informes-Periodo-Gestion-de-Episodios/Informe%20Contingencia%20Marzo%202016.pdf) .

[20] MADS. Resolución 610 de 2010 de 24 de marzo de 2010. [Online].; 2010. Disponible en: <http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/bf-Resoluci%C3%B3n%20610%20de%202010%20-%20Calidad%20del%20Aire.pdf> .

[21] Chow JC, Lowenthal DH, Chen LW, Wang X, Watson JG. Mass reconstruction methods for PM_{2.5}: a review . Air Quality Atmosphere and Health. 2015; 8(3): p. 243-263.Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1007/s11869-015-0338-3>

[22] Song X, Polissar AV, Hopke PK. Sources of fine particle composition in the northeastern US. Atmospheric Environment. 2001; 35(31). Disponible en: [https://doi.org/10.1016/s1352-2310\(01\)00338-7](https://doi.org/10.1016/s1352-2310(01)00338-7)

[23] Gómez D, Giné A, Sánchez PS. Antimony: A traffic-related element in the atmosphere of Buenos Aires. Journal of Environmental Monitoring [Internet]. 2005;7(12):1162. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1039/b508609d>

-
- [24] Almeida S M, Canha N, Freitas MC, Dung HM, Dionisio I. Air pollution at an urban traffic tunnel in Lisbon, Portugal-an INAA study. Air pollution at an urban traffic tunnel in Lisbon, Portugal -an INAA study. 2011; 69(11). Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2011.01.014>
- [25] Diapouli E, Manousakas MI, Vratolis S, Pateraki S, Bairachtari KA, Querol X, et al. Estimation of natural source contributions to urban ambient air PM10 and PM2. 5 concentrations in southern Europe - Implications to compliance with limit values. Atmospheric Chemistry and Physics. 2017; 17(5). Disponible en: <https://doi.org/10.5194/acp-2016-781-rc1>
- [26] Allen JO, Mayo PR, Hughes LS, Salmon LG, Cass GR. Emissions of size-segregated aerosols from on-road vehicles in the Caldecott Tunnel. Environmental Science and Technology. 2001; 35(27). Disponible en: <https://doi.org/10.1021/es0015545>
- [27] Manousakas M, Papaefthymiou H, Diapouli E, Migliori A, Karydas AG, Bogdanovic-Radovic I, et al. Assessment of PM2.5 sources and their corresponding level of uncertainty in a coastal urban area using EPA PMF 5.0 enhanced diagnostics. Science of the total environment. 2017; 574(155-164). Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.047>
- [28] Kim E, Hopke PK, Edgerton ES. Source identification of atlanta aerosol by positive matrix factorization. Journal of the Air and Waste. 2003; 53(731-739). Disponible en: <https://doi.org/10.1080/10473289.2003.10466209>
- [29] Amato F, Pandolfi M, Escrig A, Querol X, Alastuey A, Pey J. Quantifying road dust resuspension in urban environment by Multilinear Engine: A comparison with PMF2. Atmos Environ. 2009; 43(17). Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.02.039>
- [30] Almeida SM, Manousakas M, Diapouli E, Kertesz Z, Samek L, Hristova E, et al. Ambient particulate matter source apportionment using receptor modelling in European and Central Asia urban areas. Environmental Pollution. Environmental Pollution.November. 2020; 266. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115199>