

**DETERMINACIÓN DE LA CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DEL
MATERIAL PARTICULADO Y APLICACIÓN DE MODELOS RECEPTOR EN
UNA POBLACIÓN CERCANA A UN PROYECTO MINERO EN EL
DEPARTAMENTO DEL CESAR**

HENRY CASTRO ORTIZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL
BUCARAMANGA**

2015

**DETERMINACIÓN DE LA CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DEL
MATERIAL PARTICULADO Y APLICACIÓN DE MODELOS RECEPTOR EN
UNA POBLACIÓN CERCANA A UN PROYECTO MINERO EN EL
DEPARTAMENTO DEL CESAR**

HENRY CASTRO ORTIZ

**Trabajo de grado para optar al título de:
Magíster en Ingeniería Ambiental**

**Director:
PhD. NÉSTOR YESID ROJAS
Departamento de Ingeniería Química y Ambiental
Universidad Nacional de Colombia**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL
BUCARAMANGA**

2015

AGRADECIMIENTOS

A CORPOCESAR y el equipo de operación del Sistema Especial de Vigilancia de Calidad del Aire de la zona carbonífera del Cesar, por el despliegue técnico realizado para la toma de las muestras e información necesarios para el desarrollo del presente trabajo de aplicación.

Un agradecimiento especial al profesor Néstor Y Rojas por su orientación permanente e interés para obtener los mejores resultados de este importante proyecto para los diferentes actores de la zona minera del Cesar.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	13
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN	17
2. ESTADO DEL ARTE.....	25
3. OBJETIVOS.....	29
3.1. OBJETIVO GENERAL	29
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	29
4. MARCO TEÓRICO	30
4.1. FUNDAMENTOS PARA LA MODELACIÓN DE RECEPTORES.....	32
4.1.1. Factorización de matriz positiva (PMF).....	32
4.1.2. Modelo Unmix	33
4.2 PREPARACIÓN DE DATOS.....	34
5. METODOLOGÍA	37
5.1. CAMPAÑA DE MUESTREO DE PM10.....	37
5.2 ANÁLISIS DE CARACTERIZACIÓN QUÍMICA	39
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	40
6.1. ESTUDIO METEOROLÓGICO Y DE CALIDAD DEL AIRE	40
6.2. ANÁLISIS PRELIMINAR	45
6.2.1. Conteos Vehiculares.....	46

6.2.2. Monitoreo automático de material particulado en El Hatillo	51
6.3. ANÁLISIS QUÍMICO DE MATERIAL PARTICULADO	53
6.3.1. Componentes mayoritarios	53
6.3.1.1. Metales solubles en agua.	53
6.3.1.2. Aniones y cationes.	55
6.3.1.3. Carbono orgánico y elemental (OC y EC).	57
6.3.2. Acumulados máxicos	59
6.4. MODELOS RECEPTORES	61
6.4.1. Modelo PMF, Factorización de matriz positiva.....	63
6.4.1.1. Principales resultados respecto a PM ₁₀	63
6.4.2. Modelo UNMIX.....	71
6.4.2.1. Principales resultados respecto a PM ₁₀	72
6.4.2.2. Aportes de las fuentes a la generación de PM ₁₀ según modelo UNMIX. ...	76
6.4.3. Comparativo de los resultados obtenido utilizando los modelos PMF y UNMIX.....	78
7. PROPUESTA PARA REDUCIR LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN EL ÁREA DE INFLUENCIA DE LA ESTACIÓN EL HATILLO	80
8. CONCLUSIONES.....	85
9. RECOMENDACIONES	88
BIBLIOGRAFIA.....	89

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.	Información proyectos mineros cercanos al corregimiento de El Hatillo	14
Tabla 2.	Monitores de Calidad del Aire utilizados.	37
Tabla 3.	Numero de muestras obtenidas	37
Tabla 4.	Filtros blancos utilizados durante la campaña de monitoreo.....	38
Tabla 5	Especies analizadas	39
Tabla 6.	Resultados conteo vehicular, septiembre 20 y 29 de 2013.....	46
Tabla 7.	Resultados conteo vehicular marzo 13 y 23 de 2014.....	49
Tabla 8.	Principales resultados de la caracterización por ICP-MS a los filtros TFE. [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]......	54
Tabla 9.	Principales resultados de la caracterización por IC a los filtros QFFL. [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]......	56
Tabla 10.	Principales resultados de la caracterización por extracción de solvente – TD- GCMS a los filtros QFFH. [ng/m^3].	59
Tabla 11.	Datos estadísticos básicos de las especies utilizadas en el modelo receptor	62
Tabla 12.	Incendios forestales registrados durante la campaña de monitoreo.	69
Tabla 13.	Propuesta de control para incendios forestales	81
Tabla 14.	Propuesta de control para quemas de residuos sólidos.....	82
Tabla 15.	Propuesta de control para mitigar el impacto por levantamiento de MP causado por actividades industriales.	83
Tabla 16.	Propuesta de control para la fuente de combustión externa de Palmagro S.A.	84

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Ubicación Zona Minera (ZM) en el centro del departamento del Cesar.	17
Ilustración 2. Ubicación estación calidad de aire ZM13 El Hatillo.	18
Ilustración 3. Estación Calidad de aire ZM13 El Hatillo.....	18
Ilustración 4. Registros fotográficos de actividades en los alrededores de la estación El Hatillo – ZM13	20
Ilustración 5. Incendios forestales.....	21
Ilustración 6. Equipos utilizados en la campaña de monitoreo (Ene 18-Marzo 18 de 2014).....	38
Ilustración 7. Mapa con ubicación de Estación meteorológica La Francia (N: 9°38'39.7" – W: 73°31'53.6").....	40
Ilustración 8. Tipo de camiones que utilizan la vía en donde se realizó el aforo vehicular.	47
Ilustración 9. Acción de control sobre la vía El Hatillo-La Loma realizada a partir del mes de septiembre de 2014.....	52
Ilustración 10. Quemadas de residuos sólidos en diferentes puntos de la zona de estudio.	81
Ilustración 11. Emisiones de MP en vías externas e internas.....	83
Ilustración 12. Emisión proveniente de una fuente fija cercana al corregimiento El Hatillo.....	84

LISTA DE GRAFICAS

Gráfica 1.	Concentraciones promedio anuales de PST y PM10 El Hatillo. Las líneas horizontales corresponden a las normas de PST y PM ₁₀	19
Gráfica 2.	Promedios Mensuales PM10-ZM13 el Hatillo	19
Gráfica 3.	Datos de temperatura (°C) y humedad relativa (%) media y precipitación (mm) mensual registrada durante el periodo Enero a Diciembre 2014 en la estación meteorológica la Francia IDEAM	41
Gráfica 4.	Diagrama de rosa de los vientos en 2014 en la estación de La Francia - IDEAM	42
Gráfica 5.	Diagramas mensuales de dirección del viento (%) registrados en la Estación Meteorológica La Francia - IDEAM entre enero y noviembre de 2014.....	43
Gráfica 6.	Comportamiento de la concentración de PM10 respecto a la temperatura [°C].....	44
Gráfica 7.	Comportamiento de la concentración de PM ₁₀ respecto a la precipitación [mm].....	45
Gráfica 8.	Número de vehículos por hora registrados el 20 de septiembre de 2013 (día laboral) y 29 de septiembre (domingo)	46
Gráfica 9.	Concentración de Material particulado para los días del conteo vehicular.	48
Gráfica 10.	Concentración material particulado día laboral y domingos 2012 – 2014.....	49
Gráfica 11.	Número de vehículos Vs MP registrados el 13 de marzo de 2014 (laboral).....	50
Gráfica 12.	Número de vehículos Vs MP registrados el 23 de marzo de 2014 (dominical)	50
Gráfica 13.	Perfil horario de MP entre los meses de octubre de 2013 y abril de 2014 en ZM13.....	51

Gráfica 14. Distribución media de metales solubles en agua en las muestras tomadas en la estación de monitoreo ZM13. Otros: Metales con participación inferior a 1%.....	54
Gráfica 15. Resultados de metales solubles en agua con porcentajes mayoritarios en la muestras analizadas. Al, Fe, S, Na, Ti, Mg, K, Ca, P [$\mu\text{g}/\text{m}^3$].....	55
Gráfica 16. Concentración de iones en los filtros analizados respecto al tiempo de monitoreo. [$\mu\text{g}/\text{m}^3$].....	56
Gráfica 17. Distribución media de los iones en las muestras tomadas en la estación de monitoreo ZM13.....	57
Gráfica 18. Concentración de carbono orgánico y elemental en los filtros analizados respecto al tiempo de monitoreo. [$\mu\text{g}/\text{m}^3$].	58
Gráfica 19. Distribución media de los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH) en las muestras tomadas en la estación de monitoreo ZM13.....	59
Gráfica 20. Distribución media de la composición másica determinada mediante diferentes técnicas de caracterización en las muestras tomadas en la estación de monitoreo ZM13.....	61
Gráfica 21. Valores observados versus predichos de PM_{10} con la aplicación del modelo PMF, usando 5 factores. Modelo PMF, estación ZM13.....	64
Gráfica 22. Relación de valores observados versus predichos respecto a la serie de tiempo de PM_{10} . Modelo PMF, estación ZM13.	65
Gráfica 23. Perfiles de las fuentes de PM_{10} de acuerdo a la distribución y aporte de cada especie analizada. Modelo PMF, estación ZM13.....	67
Gráfica 24. Distribución de los aportes de cada fuente a la emisión de PM_{10} en la zona de estudio. Modelo PMF, estación ZM13.....	69
Gráfica 25. Análisis residual para el modelo receptor ajustando la especie PM_{10} . Modelo PMF, estación ZM13.	71
Gráfica 26. Valores observados versus predichos de PM_{10} , usando 5 factores. Modelo UNMIX, estación ZM13.	72
Gráfica 27. Relación de valores observados versus predichos respecto a la serie de tiempo de PM_{10} . Modelo UNMIX, estación ZM13.....	73

Gráfica 28. Perfiles de las fuentes de PM_{10} de acuerdo a la distribución y aporte de cada especie analizada. Escala logarítmica, Modelo UNMIX, estación ZM13.	75
Gráfica 29. Distribución de los aportes de cada fuente a la emisión de PM_{10} en la zona de estudio. Modelo UNMIX, estación ZM13	76
Gráfica 30. Análisis residual para el modelo receptor ajustando la especie PM_{10} . Modelo UNMIX, estación ZM13.	77
Gráfica 31. Comparativo de la contribución de las fuentes a la emisión de PM_{10} determinado por el modelo PMF y UNMIX	79

RESUMEN

TÍTULO: Determinación de la caracterización físico-química del material particulado y aplicación de modelos receptor en una población cercana a un proyecto minero en el departamento del Cesar *

AUTOR: Henry Castro Ortiz

PALABRAS CLAVE: Zona carbonífera del Cesar, contaminación atmosférica, aporte de fuentes, modelos receptor.

DESCRIPCIÓN:

Se determinó la concentración y composición química del material particulado menor a 10 micras (PM_{10}) en la estación El Hatillo-ZM13, ubicada en la zona carbonífera del Cesar, para cuantificar la contribución a la contaminación del aire por material particulado de los diferentes tipos de fuentes presentes en el receptor seleccionado y de esta forma sugerir estrategias de control y prevención específicas a las fuentes analizadas.

En total se obtuvieron 140 muestras con filtros de cuarzo y teflón, suministrados por la Autoridad Ambiental local – CORPOCESAR durante dos meses con bajas precipitaciones, a los cuales se le determinó la concentración de iones, metales, hidrocarburos aromáticos policíclicos, carbono orgánico y elemental. Por medio de la técnica de modelos receptor se logró analizar estadísticamente los diferentes datos de la concentración de las especies recolectadas, encontrando como principal fuente de contaminación atmosférica la quema de biomasa y el uso de esta como combustible (45-46%), quema de basuras (26-34%), la contribución del polvo de carretera (14-16%) y emisiones provenientes de vehículos pesados (7-12%), aunque se recomienda para estudios futuros el análisis de las fuentes de emisión in situ, de tal forma que se pueda conocer el perfil químico de cada una de las fuentes mediante análisis químico e implementar modelos receptores con balance químico de masa (CMB). También se recomienda profundizar el análisis de la contribución de fuentes usando los compuestos orgánicos como trazadores de fuentes específicas.

Con la cuantificación del aporte individual de las fuentes identificadas, se propusieron medidas de control específicas encaminadas a una mayor efectividad en el control de la contaminación atmosférica por parte de las empresas mineras, una empresa extractora de palma presente en la zona, la Gobernación del Cesar y las alcaldías del Paso y la Jagua.

* Trabajo de aplicación para maestría

** Facultad de ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Química.
Director PhD Néstor Yesid Rojas.

ABSTRACT

TITLE: Physico-chemical characterization of particulate matter and application of receptor models in a town near to a mining project in the department of the Cesar *.

AUTHOR: Henry Castro Ortiz

KEYWORDS: Coal industry region of Cesar, air pollution, source apportionment, receptor models.

DESCRIPTION:

The concentration and chemical composition of particulate matter PM_{10} was determined in “El Hatillo”-ZM13 station, located in the coal region of Cesar, to quantify the contribution to air pollution by particulate matter of different types of sources present in the selected station and suggest specific strategies for control and prevention for the sources analyzed.

In total, we analyze 140 samples of quartz and Teflon filters, delivered by the local Environmental Authority CORPOCESAR, to which it was determined the concentration of ions, metals, polycyclic aromatic hydrocarbons, organic and elemental carbon. Using the technique of receptor models was achieved to find as main source of air pollution the biomass burning and the use of biomass as fuel (45-46%), burning of wastes (26-34%), the contribution of road dust (14-16%) and emissions from heavy duty vehicles (7-12%), although it is recommended for further studies analyzing emission sources in situ with the intention to know the chemical profile of each of the sources by chemical analysis and implement receptor models “chemical mass balance (CMB)”. It is also recommended further analysis of source apportionment using organic compounds as tracers of specific sources.

With the quantification of the individual contribution of identified sources, specific control measures were proposed to improve the efficiency in the control of air pollution by mining companies, an extractor company of palm, the Cesar Government and the municipalities of “El Paso” and “La Jagua”.

* Magister Application Thesis

** Faculty of engineering Physico-Chemical. School of Chemical Engineering.
Principal PhD Néstor Yesid Rojas.

INTRODUCCIÓN

La Zona Carbonífera del Cesar se caracteriza desde hace varios años por la presencia de importantes compañías extranjeras que han venido realizando la exploración y explotación de carbón, principalmente a cielo abierto. Se estima que hacia 1989 predominaba principalmente en áreas cercanas a la Jagua de Ibirico la minería artesanal sin regulación y control por parte de las autoridades locales, posteriormente fue progresivamente regulándose con el soporte de Minercol, Ecocarbón y otras empresas más, logrando pasar de 27 minas artesanales a lo que existe en la actualidad con un proyecto integrado de tres (3) minas y otra de menor producción.

En el año 2007, durante el gobierno del presidente Alvaro Uribe Vélez, la Dirección de Licencias Ambientales del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT) expidió la resolución 0295 de 2007 mediante la cual la competencia de seguimiento ambiental de la gran minería de carbón en el centro del departamento del Cesar pasa de la Autoridad Ambiental de la región (Corporación Autónoma Regional del Cesar - Corpocesar) al entonces MAVDT; posteriormente, el 27 de septiembre de 2011 se expide el decreto 3573 con el cual se reforma el Ministerio de Ambiente y se crea la Agencia Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), la cual tiene la principal responsabilidad de vigilar los posibles impactos negativos que trae consigo la explotación del mineral. Uno de los recursos naturales que ha centrado su atención es el aire, cuya calidad se ha visto afectada principalmente por el material particulado (PM¹).

La afectación ha sido reportada en varios centros poblados de la zona. Específicamente, la vereda El Hatillo, del municipio de El Paso (Cesar), con una

¹ Las siglas en inglés de material particulado, PM, se utilizan comúnmente en países hispanohablantes

población de aproximadamente 2.300 habitantes está rodeada de grandes minas de carbón, lo que la hace sujeta a los efectos directos de la actividad minera. En la siguiente tabla se muestra la producción en Megagramos (Mg) de carbón real del año 2009 y proyectada para el año 2010 de los proyectos mineros cercanos al Hatillo (ITESM², 2010).

Tabla 1. Información proyectos mineros cercanos al corregimiento de El Hatillo

Proyecto Minero	Producción carbón (Mg) 2009	Producción carbón (Mg) 2010	% carbón por tren 2009	% carbón por tren 2010
MINA DESCANSO	1,814,844	7,455,400	100.0	100.0
MINA LA FRANCIA	1,043,780	1,500,000	2.3	66.7
MINA EL HATILLO	1,600,000	2,500,000	24.0	80.0
MINA PRIBBENOW	18,939,785	19,528,400	100.0	100.0
MINA CALENTURITAS	5,998,415	7,102,431	100.0	100.0

Además de la presencia de las empresas mineras cerca al Hatillo, existe una fábrica de extracción de aceite de palma cuya producción está en pleno crecimiento. La quema de basuras en la vía de acceso al corregimiento es una práctica común y la presencia de incendios forestales se presenta principalmente entre los meses de enero y marzo de cada año. Adicionalmente, se ha registrado el aumento en el número de vehículos (fuentes móviles) en el centro del departamento, principalmente por la llegada de las grandes empresas internacionales, lo cual se puede constituir en otra fuente de interés por generación de material particulado producto de la combustión y de la resuspensión de polvo sobre las vías. Las emisiones de estas fuentes agudizan la problemática de contaminación del aire. Solamente en el último año, entre abril de 2012 y marzo de 2013, de las 103 muestras válidas obtenidas de PST³, 55 excedieron la norma de 100 µg/m³ (equivalente al 53.4%), suficiente para que la zona pasara de clasificación de área fuente moderada a media, según el Decreto 979 de 2006, expedido por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS).

² ITESM: Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey

³ PST: Material Particulado Suspendido Total

Corpocesar realiza una función de seguimiento y monitoreo de la calidad del aire la zona minera del Cesar, la cual se fundamenta en la medición confiable y oportuna de contaminantes de interés en zonas estratégicas. Gracias a esta función, se ha identificado que las actividades propias de la región causan un impacto significativo sobre las condiciones de calidad del aire, con su consecuente impacto sobre la salud de la población. A partir de este conocimiento, se han establecido medidas orientadas a recuperar condiciones sostenibles de ocupación y crecimiento económico y urbano de la región.

Sin embargo, se requieren mayores estudios que permitan conocer de mejor forma el comportamiento de la calidad del aire y específicamente del material particulado en todos sus tamaños y en su composición, que permita a las autoridades y a las mismas fuentes emisoras a enfocar y rediseñar sus estrategias de reducción y control para disminuir la problemática y mejorar la calidad del aire de la zona.

En este sentido, en el presente trabajo de aplicación se muestran los resultados y análisis del proceso de caracterización química de material particulado recolectado en los filtros de una estación de calidad del aire de propiedad de Corpocesar, con el objetivo de determinar la contribución aproximada de diferentes tipos de fuente a la contaminación por este contaminante mediante la aplicación de dos modelos de receptor aprobados por la EPA⁴.

Para el análisis químico, fue realizado un muestreo durante sesenta días consecutivos, del cual se obtuvieron 60 muestras con filtros de cuarzo de 47mm, 60 con filtros de TFE de 47mm y 20 con filtros de cuarzo de 22x28 cm. Las muestras recolectadas fueron enviadas al Laboratorio de Higiene de la División de Salud Ambiental del Estado de Wisconsin (WSLH), donde se realizaron

⁴ Siglas en inglés de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos

análisis de metales solubles en agua, iones, carbono orgánico y elemental, e hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP).

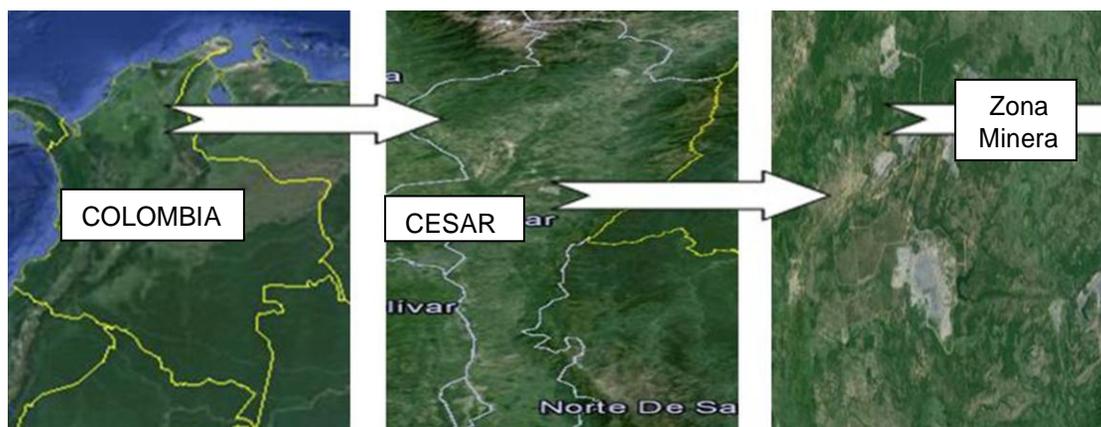
Posteriormente, se realizó un análisis estadístico de los datos mediante el uso de aplicaciones de software ya desarrolladas para aplicar la modelación de receptores: EPA PMF 5.0 y EPA UNMIX 6.0, con el fin de establecer el aporte y la relación de las diferentes fuentes de contaminantes en la calidad del aire.

Este trabajo se presenta adicionalmente como una alternativa para que la autoridad ambiental y los demás actores que hacen parte de la mesa de calidad del aire del Cesar estudien la posibilidad de aplicar estas técnicas a muestras de otras estaciones ubicadas en poblaciones de importancia como La Loma de Calenturas, la Jagua de Ibirico o Boquerón, con el fin de identificar y cuantificar de forma más precisa los aportes de las diferentes fuentes de contaminación del aire presentes en su área de influencia y de esta forma diseñar e implementar políticas de control más efectivas, mediante la priorización de acciones de control sobre dichas fuentes.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

El corregimiento El Hatillo se encuentra ubicado en el municipio El Paso, dentro del área de influencia de las actividades mineras desarrolladas en la zona centro del Cesar.

Ilustración 1. Ubicación Zona Minera (ZM) en el centro del departamento del Cesar.



La llegada de estas empresas multinacionales modificó profundamente la cultura y las prácticas de esta población orgullosamente campesina⁵. Hoy día, no pueden sustentar a sus familias con la agricultura, la caza, la pesca o el ganado porque las tierras que les rodean son ahora privadas y su acceso prohibido. Por la proximidad de las minas, la comunidad manifiesta adicionalmente que vive una grave crisis ambiental que afecta la salud de la población. Además por diferentes causas externas, el proceso de reasentamiento al que tienen derecho está demorando más de lo que la comunidad puede soportar (Fundación Chasquis, 2011). Específicamente en el Hatillo, desde el año 2007, Corpocesar vigila el cumplimiento normativo de las partículas suspendidas totales (PST) y del material

⁵ El Equipo de Investigación de Eco-Regional denunció que los habitantes de este caserío se están muriendo de hambre y de enfermedades originadas por la explotación minera (Periódico El Pílon, julio 16 de 2012)

particulado respirable (PM₁₀) desde el 2009, ambos parámetros con equipos de referencia EPA de alto volumen (Hi-Vol), a través del Sistema Especial de Vigilancia de Calidad de Aire de la Zona Carbonífera del Cesar, SEVCA_ZCC.

En la Ilustración 2 se muestra la ubicación espacial de la Estación ZM13 del Hatillo y en la ilustración 3 una fotografía de los equipos instalados en dicha estación.

Ilustración 2. Ubicación estación calidad de aire ZM13 El Hatillo.

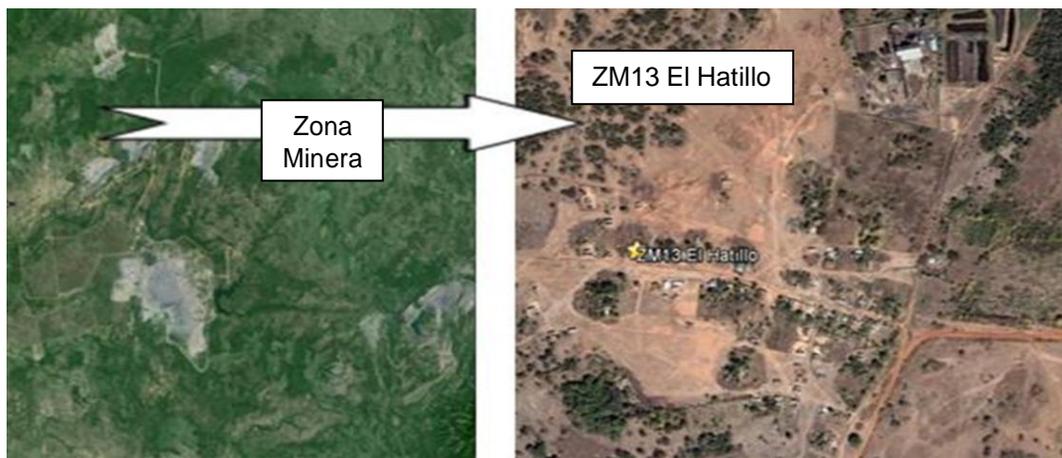


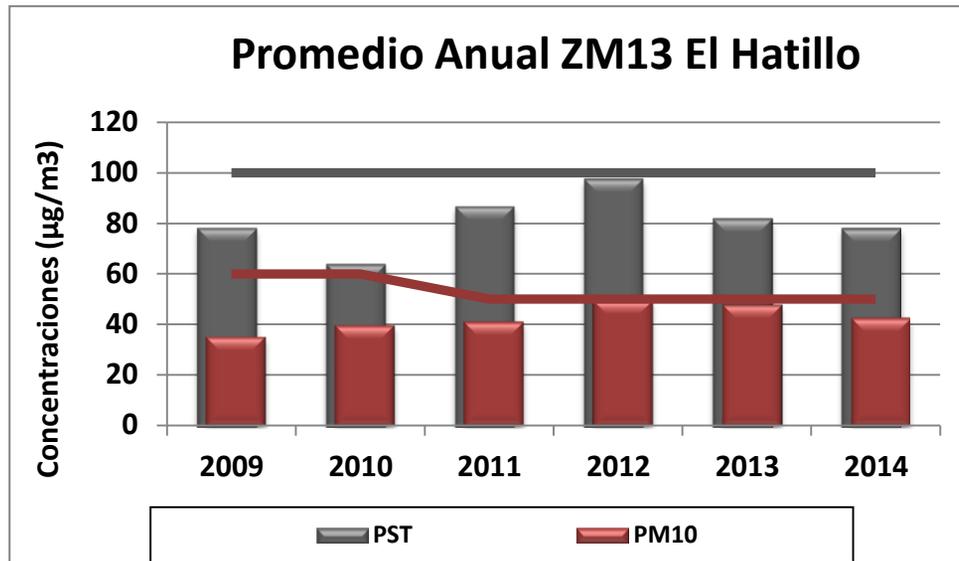
Ilustración 3. Estación Calidad de aire ZM13 El Hatillo.



Fuente: Corpocesar.

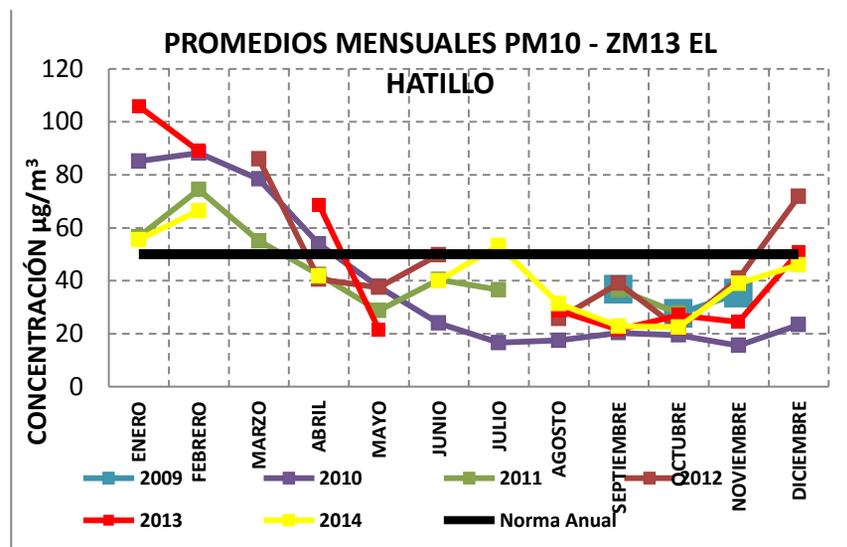
En la gráfica 1, se muestran los promedios anuales entre los años 2009 y 2014 de PST y PM₁₀ registrados en ZM13 y su comparación con el límite máximo permisible en las normas de calidad del aire⁶.

Gráfica 1. Concentraciones promedio anuales de PST y PM10 El Hatillo. Las líneas horizontales corresponden a las normas de PST y PM₁₀.



Fuente: Corpocesar. Presentación Comité en Valledupar.

Gráfica 2. Promedios Mensuales PM10-ZM13 el Hatillo



⁶ Resolución 610 de 2010, expedida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

El contaminante PM_{10} ha aumentado progresivamente a través de los últimos años y con valores muy cercanos a la norma en los años 2012 y 2014 y según los reportes entregados por Corpocesar⁷ se considera que las fuentes que generan este contaminante han ido en aumento en los últimos 3 años.

Las mediciones que se han realizado en la estación El Hatillo, reflejan la afectación de la calidad del aire de esta zona, causada por la influencia de diferentes actividades que se realizan en los alrededores del corregimiento, que incluyen además de las actividades propias de la minería, la quema constante de residuos sólidos en basureros no autorizados ubicados en la vía que de La Loma conduce al corregimiento de El Hatillo, la presencia de una industria extractora de aceite de palma y el tránsito de vehículos por la misma vía sin pavimentar, tal como se puede observar en la Ilustración 4.

Ilustración 4. Registros fotográficos de actividades en los alrededores de la estación El Hatillo – ZM13



Chimeneas planta
extractora de palma



Quema de residuos en la
vía que de la Loma
conduce a El Hatillo



Vía La Loma – El
Hatillo

⁷ Informe especial ZM13 El Hatillo Corpocesar



Actividades mineras

Adicional a las anteriores fuentes permanentes que se registran a lo largo del año en el área de influencia de la estación ZM13, entre los meses de diciembre y febrero se presentan incendios forestales, algunos de mayor magnitud, que pueden incidir negativamente en la afectación de la calidad del aire principalmente representado en material particulado fino.

Ilustración 5. Incendios forestales.



Incendios en fincas
(CNR)



Predios de la finca
Canori



Incendios en la vía al
carbón



Incendio en Drummond

A raíz de la problemática detectada, y con base en las primeras mediciones obtenidas con el SEVCA_ZCC, se inició el estudio de las posibles soluciones, que finalmente terminaron con la elaboración del Programa de Reducción de la Contaminación que se estableció mediante la Resolución 2176 de diciembre de 2007⁸. Este programa ha contado con el acompañamiento de entidades públicas y privadas y de la comunidad e incluye medidas como: talleres de capacitación dirigidos a las poblaciones de la zona, riego de vías públicas no pavimentadas, pavimentación de la vía del carbón⁹, control de velocidad en la misma vía, control de emisiones en las empresas mineras, mayor restricción a nuevas fuentes de emisión, optimización del Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire y la aplicación de un modelo regional de dispersión de material particulado¹⁰.

Las medidas que parecen haber tenido un mayor impacto positivo en estos últimos años han sido la pavimentación parcial de la vía al carbón entre la Jagua de Ibirico y la mina La Francia (propiedad de Colombia Natural Resources, CNR) y el fortalecimiento del SEVCA_ZCC el cual busca vigilar permanente la calidad del aire, evaluar las tendencias de la contaminación, detectar eventos de contaminación atmosférica e informar a la comunidad el estado de la calidad del aire de la zona que se respira e informar a las autoridades ambientales sobre la efectividad de las medidas de reducción de la contaminación.

8 Expedida por el entonces Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, "Por la cual se establece el programa de reducción de la contaminación para las áreas fuente de contaminación clasificadas en la zona carbonífera del Cesar".

⁹ Vía que comunica las poblaciones de La Jagua de Ibirico y La Loma de Calenturas – Cesar.

¹⁰ "Actualización de la Modelación de la calidad del aire para la zona carbonífera del Departamento del Cesar" (Revisión Mayo 2010) realizado por el ITESM-MADS.

Sin embargo y de acuerdo con la última clasificación de área-fuente realizada por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, MADS, mediante Resolución 335 de 2011¹¹, el área de influencia de la estación El Hatillo fue clasificada como área-fuente de contaminación moderada en cuanto a PST y área de contaminación marginal PM₁₀.

El problema se agudiza aún más cuando parece no existir una conciencia sobre los efectos negativos de la contaminación atmosférica ni un compromiso de las empresas por minimizar eficientemente la problemática. Con base en la reunión de trabajo con la comunidad del corregimiento de El Hatillo, llevada a cabo el 12 de abril de 2010, en el marco del Convenio interadministrativo 1234 entre la Gobernación del Cesar y el Instituto para el Desarrollo de Cesar - Idecesar -, se detectaron daños en varias viviendas por grietas, los cuales son atribuidos por la comunidad a temblores ocasionados por las voladuras en las minas cercanas; se evidenció la quema de basuras generadas en los patios de las viviendas o en la vía cercana; se identificó la necesidad de la adecuación de la vía terciaria El Hatillo – Platanal; y quedó clara la exigencia, por parte de la comunidad, para que se lleve a cabo el proceso de reasentamiento, respetando sus derechos¹².

Adicionalmente, en las mesas de calidad del aire y comités que realiza Corpocesar con los diferentes actores que hacen parte de esta problemática, se ha manifestado continuamente la necesidad de conocer el aporte específico de cada fuente para comprender de forma más precisa los fenómenos de contaminación que están afectando la calidad del aire del corregimiento El Hatillo.

¹¹ Esta próxima a salir la nueva Resolución de clasificación del Área Fuente y según los cálculos preliminares obtenidos en la estación ZM13 – El Hatillo para el último año, pasa de Área Fuente Moderada a Media para PST.

¹² Con base en la Resolución emitida por el Ministerio de Ambiente a mediados de mayo de 2010, se ordenaba que se iniciara el proceso físico de reasentamiento de Plan Bonito en un plazo no mayor a 1 año y de El Hatillo y Boquerón en un plazo no mayor a 2 años (Gobernación del Cesar, 2009)

En este contexto, este trabajo de aplicación de maestría busca aportar al conocimiento de la calidad del aire de la zona y dar solución a la siguiente pregunta: ¿cuál es el aporte de los diversos tipos de fuentes presentes alrededor del corregimiento El Hatillo a la contaminación por material particulado respirable registrada en la zona? En consecuencia, los resultados expuestos en el presente trabajo constituirán un punto de partida para conocer con mayor profundidad la incidencia de las fuentes sobre la contaminación atmosférica en este corregimiento y permitirá sugerir acciones o soluciones concretas y priorizadas para controlar las emisiones de material particulado.

2. ESTADO DEL ARTE

El material particulado ha sido vinculado con problemas de salud tales como asma y enfermedades cardiovasculares, además de los problemas ambientales que pueden aportar a la afectación de la calidad del aire. Los principales efectos del PM han sido atribuido a su composición química (Shafer et al., 2010). Es importante tener en cuenta que el material carbonoso representa el mayor componente del PM, contribuyendo con un 20 a 80% de la masa total en zonas urbanas e industriales, de acuerdo con Hamad et al (2015), este componente está dividido en carbono orgánico (OC) y carbono elemental (EC). El OC contiene compuestos mutagénicos y cancerígenos como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) y bifenilos policlorados (PCBs) y elementos tóxicos, por otra parte, el EC interviene en reacciones heterogéneas gas-partícula involucrando SO_2 , NO_x y O_3 . Lo anterior refleja la necesidad de incluir este tipo de componentes en el análisis de la composición y distribución de aportes de las fuentes de emisiones atmosféricas al analizar en cada uno de los puntos de muestreo.

El material particulado (PM) presente en el ambiente está compuesto por diversas especies químicas que incluyen, entre otras, metales, aniones, cationes, carbono orgánico y elemental (Chow J, 1995). La técnica conocida como “caracterización del material particulado” comprende la identificación y cuantificación de dichas especies a través de la aplicación de diversas técnicas de análisis químico. Con base en los resultados obtenidos mediante estas técnicas de análisis es posible aplicar modelos estadísticos conocidos como “modelos de receptores”, los cuales permiten la identificación y cuantificación de las fuentes que contribuyen a la concentración de material particulado encontrada en un determinado punto de monitoreo (receptor de interés).

De esta forma, los estudios de caracterización química han sido realizados en diversos lugares del mundo como un medio para poder identificar las fuentes de contaminación y cuantificar sus contribuciones a las concentraciones del material particulado. Estos análisis se han realizado utilizando diferentes técnicas de caracterización, contemplando la inclusión de diferentes compuestos presentes en las corrientes de emisión, así como la implementación de diferentes modelos receptor. Los estudios más frecuentes realizados al análisis de material particulado se concentran en grandes ciudades, donde se resalta casos como las ciudades de Toronto (Lee et al., 2003; Buset et al., 2006); Londres (Charron & Harrison, 2005); El Cairo (Abu-Allaban et al., 2002); Barcelona (Querol et al., 2001) y Milán (Lonati et al., 2005) entre otros. En Colombia, aunque han sido pocos los estudios realizados implementando modelos receptores, en los últimos años se han realizado trabajos con el fin de identificar las fuentes causantes del problema de contaminación del aire en Bogotá, a partir de un ejercicio de caracterización de muestras de material particulado (PM) y de la aplicación de la técnica de modelación por receptores (Behrentz et al., 2009). Vargas et al., 2012, presentó por primera vez un estudio en Colombia, en donde utilizó un modelo receptor de forma simultánea en dos áreas residenciales (Suba y Kennedy) en Bogotá, incluyendo material carbonoso, iones y metales. En ambas áreas, se encontraron altas fracciones de Si, Ca y Fe indicando una contribución significativa de polvo en resuspensión y en el total la suma de estos compuestos con el material carbonoso representaban el 85% del PM₁₀. El análisis de contribución de fuentes identificó dos factores en común, fuentes móviles y polvo arrastrado por el viento. Por lo anterior, el estudio recomienda políticas de control enfocadas a vías despavimentadas, control de erosión y control de fuentes de combustión, principalmente vehículos diésel e industrias que utilizan carbón como combustible.

La revisión bibliográfica realizada por Hernández (2012) señala que, si bien existen estudios sobre caracterización de partículas en áreas de minería a cielo abierto, algunos estudios se centran únicamente en los aspectos de distribución

de tamaño y morfología (Jones et al., 2001, Pless et al., 2000), otros tienen un enfoque relacionado con la salud ocupacional en los ambientes mineros (Rawat, 1982 y Ghose 2007) realiza un acercamiento a la composición química del material suspendido en el aire ambiente de comunidades cercanas al área de explotación minera, pero incluyendo sólo análisis de aniones y material soluble en benceno.

En la Zona Minera del Cesar, se han adelantado algunos estudios de caracterización de material particulado. Huertas et al. (2012) realizaron la caracterización de partículas sobre 16 filtros de PM_{10} y 30 filtros de PST de 15 estaciones de monitoreo del Sistema Especial de Vigilancia de Calidad de Aire de la Zona Carbonífera del Cesar, incluyendo morfología, distribución de tamaño de partículas y composición elemental determinada mediante SEM- EDS (Microscopía electrónica de barrido acoplada con espectrometría dispersiva de rayos X) y XPS (Espectroscopía fotoelectrónica de rayos X). Encontraron que los principales elementos presentes en las partículas eran **C** (presente como grafito), **O** asociado con calcita $-CaCO_3$, **K** y **Si** (en forma de SiO_2). La similitud en la composición entre el suelo regional y las partículas no permitió determinar si las partículas se originan dentro de las minas o cerca de las estaciones de monitoreo.

Por otra parte, Hernández (2012) realizó el análisis de la variación espacial de los componentes del material particulado respirable PM_{10} en la zona minera del Cesar, mediante la caracterización química del PM_{10} recolectado en filtros de cuarzo en las principales estaciones de monitoreo del Sistema de Vigilancia de Calidad de Aire de la zona carbonífera del Cesar. Hernández encontró diferencias de composición química entre las estaciones analizadas, señalando diferencias en el aporte de las diferentes fuentes que contribuyen al material particulado presente en el aire ambiente de la zona. Sin embargo, Hernández (2012) señala que especies muy importantes en el material particulado de origen geológico, como el

silicio y el aluminio, no fueron cuantificadas¹³, por lo cual sería recomendable emplear combinaciones de material de los filtros y técnicas analíticas compatibles, que permitan cuantificar dichas especies en futuras caracterizaciones.

¹³ Como consecuencia de interferencias de la matriz de cuarzo en la técnica analítica utilizada

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Determinar la contribución a la contaminación del aire por material particulado de los principales tipos de fuente existentes en el corregimiento El Hatillo, Cesar.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la concentración y composición química del material particulado en la estación El Hatillo-ZM13.
- Determinar el número y el perfil químico de los principales factores contribuyentes a la contaminación del aire por material particulado en dicha estación mediante la aplicación de un modelo de receptor.
- Identificar los tipos de fuentes que pueden asociarse a los perfiles químicos determinados por la modelación de receptor y determinar su contribución a la contaminación del aire por material particulado en la estación de muestreo.
- Proponer estrategias de control y prevención priorizadas y eficientes, dirigidas a los diferentes actores involucrados en la problemática de contaminación atmosférica detectada en el corregimiento El Hatillo.

4. MARCO TEÓRICO

Los aerosoles troposféricos son una mezcla compleja de partículas con múltiples componentes que son emitidas directamente (por fuentes naturales o antropogénicas) o pueden ser formadas en la atmósfera por mecanismos de nucleación/condensación (Murillo et al, 2013). Los principales componentes en la mayoría de áreas urbanas incluyen material geológico (óxidos de aluminio, silicio, calcio, titanio y hierro), materia orgánica (carbono orgánico que consiste de cientos de diferentes componentes), carbono elemental, sulfatos, nitratos y amonio (Chow, 1995). La técnica conocida como “caracterización del material particulado” comprende la identificación y cuantificación de dichas especies a través de la aplicación de diversas técnicas de análisis químico.

Las características químicas del material particulado varían de acuerdo con las fuentes de las partículas y a las condiciones de su dispersión (Celis, 2004). El estudio de concentración, tamaño y composición química de partículas en los receptores es esencial para conocer las fuentes de los aerosoles y los procesos asociados con su formación (Murillo, et al 2013). Aunque existen redes de monitoreo de calidad del aire que suministran valiosa información en los receptores, en muchos casos los datos no son completamente analizados y principalmente solo se usan para mostrar tendencias y promedios anuales de material particulado (McGinnis, et al 2014). De esta forma los modelos receptor se han convertido en métodos de análisis utilizados en muchos estudios para determinar la contribución de las fuentes con base en las características químicas del material particulado (Heo et al 2013; Ito et al 2004; Kim et al 2005; Pekney et al 2006b; Zhao and Hopke, 2006; Zhou et al 2009) recolectado en los filtros instalados en los equipos que hacen parte de las redes de monitoreo de calidad del aire.

Según Pant y Harrison (2012), mediante los modelos de aporte de fuentes es posible cuantificar la contribución de diferentes fuentes a concentraciones atmosféricas de material particulado. Dentro de estos modelos se encuentran los métodos basados en la evaluación estadística de datos de características químicas del material particulado en los receptores (modelos de receptor). Su principio es que puede suponerse la conservación de masa y especies químicas y que, a través de un balance másico, se pueden identificar y cuantificar el aporte de fuentes al material particulado en la atmósfera (Viana et al. 2008).

Los modelos receptor (Brook et al, 2003) incluyen una amplia variedad de métodos de análisis de variables múltiples que usan las mediciones del aire ambiente para inferir en los tipos de fuentes su ubicación y contribución que afectan la calidad del aire. En su lugar los modelos de fuentes empiezan con la emisión de las fuentes y calculan las concentraciones de calidad del aire usando representaciones matemáticas de dispersión meteorológica, transformación química y deposición. Aplicar modelos de fuentes y modelos receptor en la misma situación revela diferencias en cada uno, que cuando son solucionadas conducen a una mejor evaluación de las fuentes de contaminación (Watson and Chow, 2005). Los modelos de receptor complementan los modelos de fuentes proporcionando un método independiente para evaluar la influencia de fuentes cercanas y distantes. Todos los modelos de calidad del aire son representaciones imperfectas de la realidad (Watson and Chow, 2005) y los datos de entrada son raramente completos. Watson et al (2002) presenta una estructura en la cual se pueden complementar adecuadamente modelos de fuentes y modelos receptor para un mejor entendimiento de la problemática de contaminación del aire.

4.1. FUNDAMENTOS PARA LA MODELACIÓN DE RECEPTORES.

Los modelos de receptores utilizan métodos microscópicos, físicos y químicos para determinar la identidad de las fuentes de emisión que contribuyen a las concentraciones de determinados contaminantes en lugares específicos (Seigneur, 1997).

Los modelos de tipo químico se basan en la identificación de los denominados perfiles de fuente de emisión y su relación con las concentraciones halladas en un punto determinado. En este caso, se supone que las concentraciones de las sustancias químicas que componen al material particulado se encuentran asociadas con sus fuentes generadoras (Hopke, 2003). Este tipo de modelos suelen resolverse mediante la aplicación de diferentes técnicas matemáticas. Cada una de éstas requiere de información específica de entrada y de características determinadas en los datos experimentales a analizar. De esta forma, la selección de una u otra para su aplicación se basa en el tipo y cantidad de información disponible, así como en las medidas analíticas incluidas en el diseño experimental del estudio que se pretende desarrollar.

Teniendo en cuenta lo anterior, el presente estudio se enfocará en la modelación de dos técnicas descritas a continuación: factorización de matriz positiva y UNMIX.

4.1.1. Factorización de matriz positiva (PMF)

Es el método más aplicado y no requiere un conocimiento a priori de la composición de las fuentes, aunque es útil tener información de las características de las fuentes para discriminar fuentes similares. La metodología PMF se basa en el principio de análisis de factores por medio de un robusto algoritmo de mínimos cuadrados que se encuentra asociado con cortos tiempos de respuesta (Ramadan, 2003). La principal ventaja atribuida a este método tiene que ver con la inclusión de una restricción de no negatividad para los resultados referentes a las

cargas de los elementos para cada uno de los componentes identificados así como para los puntajes factoriales.

Al mismo tiempo, sin embargo, algunos autores han planteado ciertas implicaciones indeseables para la restricción antes mencionada, tales como que las cargas negativas en los factores identificados podrían ser indicadores de interacciones reales e interesantes de evaluar entre las variables bajo estudio. Al imponer dicha restricción, se pierde la posibilidad de identificar tales interacciones (Chan y Mozurkewich, 2006). El PMF, al igual que la mayoría de los métodos estadísticos que se utilizan para el proceso de identificación de fuentes, requiere de un elevado número de muestras (típicamente superior a 50 en cada punto de medición) y una relación de variable_muestra de 1:3 para obtener resultados exactos (Pant y Harrison, 2012 citando a Thuston y Spengler, 1985).

4.1.2. Modelo Unmix

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

El planteamiento del Unmix supone que la composición de las emisiones de las fuentes es constante a través del período de monitoreo, que los perfiles de las fuentes son linealmente independientes unos de los otros y que las especies químicas no reaccionan entre sí (principio de linealidad). Para poder hacer uso de esta metodología, el número de fuentes o sus categorías deben ser menores o iguales al número de especies analizadas (Bruinen de Bruin, 2006).

4.2 PREPARACIÓN DE DATOS

Inicialmente, todas las especies disponibles y muestras en un conjunto de datos son típicamente consideradas para la distribución de las fuentes de material particulado (PM_{10}) usando los dos modelos receptores mencionados anteriormente; luego, los análisis son utilizados para excluir a determinadas especies, muestras o mediciones individuales. Iones, carbono y metales se incluyen con frecuencia en la matriz de datos para ser analizados, así como otras mediciones, tales como especies gaseosas, parámetros meteorológicos, e hidrocarburos aromáticos policíclicos (Liu et al, 2003).

La elección de las especies a incluir en la matriz de datos y las incertidumbres asociadas a los mismos dependerá de los objetivos del estudio y en la calidad de las mediciones de las especies disponibles. Los procesos de selección de la especie y la construcción de la matriz de incertidumbre proporcionan un mínimo de control sobre la derivación de las soluciones.

Seis consideraciones comunes al preparar datos de PM para el análisis son 1) relevancia de especies; 2) duplicación de la información; 3) datos faltantes; 4) datos por debajo de los límites de detección; 5) mala o desconocida calidad de datos y 6) distribución de la masa de PM entre fuentes. Cada uno se discute en detalle a continuación.

Especies relevantes

Los modelos receptores, como PMF y UNMIX, suponen implícitamente que las mediciones temporalmente covariantes se originan de la misma fuente. Las mediciones que no son indicativos de influencia de cualquier fuente pueden ser excluidas de algunos análisis con modelos receptores. Se presume, que tales mediciones actuarán sólo como una fuente de ruido e interferencia con el proceso de construcción del modelo (Buzcu et al. 2003).

Duplicación de mediciones

Otra consideración durante la selección de especies es si se incluye o no especies químicamente redundantes en la matriz de datos. Por ejemplo, podrían el azufre, el sulfato (que contiene azufre), o ambos ser incluidos? Algunos estudios han incluido ya sea de azufre o sulfato como una especie de ajuste pero no ambos (Kim and Hopke, 2004).

Datos faltantes

PMF y UNMIX requieren que los valores estén presentes en todas las entradas de una matriz de datos para el análisis. Las mediciones de especies faltantes en muestras individuales deben, por lo tanto, ser tratados de alguna manera. Se han utilizado tres tratamientos en trabajos previos (Zhao and Hopke, 2004). Primero, es posible eliminar muestras (filas de la matriz de datos) para los cuales no se encuentra ninguna medición. Segundo, eliminar las especies (columnas de la matriz de datos) del análisis completamente, lo cual se usa típicamente cuando no se cuenta con un gran porcentaje de observaciones de las especies. La tercera y última opción es asignarle un valor a la medición con una gran incertidumbre, de tal forma que tenga poca influencia en el modelo.

Datos por debajo del límite de detección (DL)

Para este caso, un método muy popular para manejar estos datos, es reemplazarlos con el valor de la mitad del límite de detección ($DL/2$), mientras el valor de $5/6$ de dicho límite ($5*DL/6$) se utiliza como el valor de incertidumbre correspondiente (Polissar et al., 1998).

Poca o desconocida calidad de los datos

La calidad de los datos puede ser cuestionable por motivos distintos a los valores faltantes o mediciones por debajo del límite de detección. Tales datos pueden ser manipulados durante el proceso de preparación de los datos, realizando bajas

ponderaciones (aumentando las incertidumbres) o desechando las mediciones en cuestión (Kim et al., 2005).

Distribución de la masa de PM

Si el propósito de la aplicación de los modelos es la distribución de la masa de PM, es posible utilizar dos conceptos. Incluir al PM como especie en la matriz que será analizada con el modelo. Si la masa de PM se incluye en la matriz de datos de entrada, entonces el modelo asignará el PM a cada factor de la misma manera que reparte todas las especies. Recientemente se ha sugerido que las incertidumbres de las concentraciones de PM deben incrementarse sustancialmente cuando se utilizan dentro de la matriz de datos, para asegurarse que no afecta la solución resultante del modelo (Kim et al. 2005). La segunda manera de distribuir la masa de PM es excluir la medida de masa de PM de la matriz de datos y realizar una regresión de la contribución de los factores del modelo sobre las medidas de masa de PM. Sin embargo, la primera opción sigue siendo la más usada considerando la obtención de datos más reales.

5. METODOLOGÍA

5.1. CAMPAÑA DE MUESTREO DE PM10

Se realizó la toma de muestras de PM₁₀ en la estación ZM13 El Hatillo, perteneciente al SEVCA_ZCC, mediante dos (2) equipos secuenciales de bajo volumen (Partisol 2025¹⁴) y, de manera simultánea, un equipo de alto volumen de referencia (HiVol) sobre filtros de cuarzo y de teflón.

Tabla 2. Monitores de Calidad del Aire utilizados.

Cantidad	Equipo
1	Hivol PM ₁₀ con filtros de Cuarzo
1	Partisol PM ₁₀ con filtros de Cuarzo
1	Partisol PM ₁₀ con filtros de TFE

El monitoreo se realizó durante sesenta días consecutivos, entre el 18 de enero y el 18 de marzo de 2014, con los dos equipos secuenciales y mediciones cada tercer día (en concordancia con el cronograma de monitoreo del SEVCA_ZCC) con el equipo de referencia. Se obtuvieron en total 60 muestras con filtros de cuarzo de 47mm (QFFL), 60 con filtros de TFE de 47mm (TFEL) y 20 con filtros de cuarzo de 22x28 cm (QFFH).

Tabla 3. Numero de muestras obtenidas

Equipo	Numero de Muestras		Total muestras
	Mes 1	Mes 2	
Hivol PM10 Cuarzo	10	10	20 Cuarzo 22x28 cm (QFFH)
Partisol PM10 Cuarzo	30	30	60 Cuarzo 47 mm (QFFL)
Partisol PM10 TFE	30	30	60 TFE 47 mm (TFE)

¹⁴ Thermo Scientific Partisol 2025, Método de Referencia, aprobación EPA RFPS-1298-127, 06/2011.

Tabla 4. Filtros blancos utilizados durante la campaña de monitoreo

Filtros Blancos	Total muestras
Filtros blancos laboratorio Hivol PM10 cuarzo	2 Cuarzo 22x28 cm (QFFHLab)
Filtros blancos laboratorio Partisol PM10 cuarzo	6 Cuarzo 47 mm (QFFLab)
Filtros blancos laboratorio Partisol PM10 Teflón	6 TFE 47 mm (TFELab)
Filtros blancos Campo Hivol PM10 cuarzo	2 Cuarzo 22x28 cm (QFFHC)
Filtros blancos Campo Partisol PM10 cuarzo	6 Cuarzo 47 mm (QFFLC)
Filtros blancos Campo Partisol PM10 Teflón	6 TFE 47 mm (TFEC)

Ilustración 6. Equipos utilizados en la campaña de monitoreo (Ene 18-Marzo 18 de 2014)



Las muestras recolectadas fueron procesadas por el laboratorio de calidad del aire del SEVCA_ZCC y adecuadamente refrigeradas y posteriormente enviadas a Estados Unidos al laboratorio de Higiene de la División de Salud Ambiental del Estado de Wisconsin (WSLH)¹⁵ en donde se realizaron los análisis de caracterización.

¹⁵ www.slh.wisc.edu

5.2 ANÁLISIS DE CARACTERIZACIÓN QUÍMICA

Se desarrollaron análisis de elementos a través de las técnicas espectrometría de masas con fuente de plasma de acoplamiento inductivo (ICP-MS), cromatografía de iones (IC), análisis de carbono orgánico y elemental (ECOC) por reflectancia óptica térmica (TOR) y cromatografía de gases con desorción térmica y detector selectivo de espectrometría de masas (TD-GCMS).

La Tabla 5 resume los análisis realizados en el material particulado.

Tabla 5 Especies analizadas

	Técnica	Especies analizadas
Metales solubles en agua (Filtro de teflón)	Espectrometría de Masas con fuente de Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-MS)	Li, B, Na, Mg, Al, P, S, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Rb, Sr, Y, Nb, Mo, Rh, Pd, Ag, Cd, Sn, Sb, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Dy, Ho, Yb, Lu, W, Pt, Tl, Pb, Th, U.
Iones (Filtro de cuarzo)	Cromatografía de iones (IC)	Cloruros, Nitratos, Fosfatos, Sulfatos Sodio, Amonio, Potasio.
Carbono (Filtro de cuarzo)	ECOC	Carbono orgánico, Carbono elemental
PAH (Filtro de cuarzo)	<i>Extracción de Solvente - TD-GCMS</i>	Hidrocarburos aromáticos Policíclicos

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se presentan el análisis de los datos obtenidos durante la fase de monitoreo del presente estudio y los resultados de los dos modelos empleados para la identificación y cuantificación de las fuentes presentes en el área de influencia de la Estación El Hatillo.

6.1. ESTUDIO METEOROLÓGICO Y DE CALIDAD DEL AIRE

En este capítulo se presenta un análisis de los principales parámetros meteorológicos obtenidos durante el año 2014 en la Estación La Francia, de propiedad del IDEAM¹⁶, ubicada en el área de influencia de la estación de calidad del aire ZM13 El Hatillo.

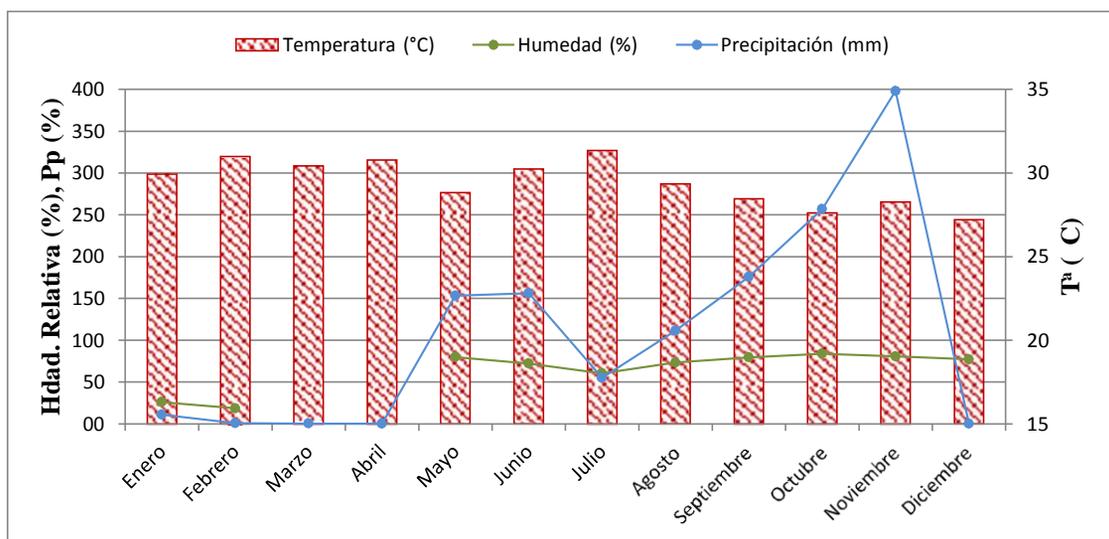
Ilustración 7. Mapa con ubicación de Estación meteorológica La Francia (N: 9°38'39.7" – W: 73°31'53.6").



¹⁶ IDEAM: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia

Las concentraciones de PM están influenciadas por la dinámica atmosférica regional y local. A continuación se describe el comportamiento de variables meteorológicas como la temperatura, humedad relativa, precipitación y dirección del viento, entre el periodo comprendido del 01-01-2014 al 31-12-2014.

Gráfica 3. Datos de temperatura (°C) y humedad relativa (%) media y precipitación (mm) mensual registrada durante el periodo enero a diciembre 2014 en la estación meteorológica la Francia IDEAM



En la gráfica 3, se muestra el comportamiento de la temperatura, humedad relativa y precipitación, registrados durante 2014. La temperatura registrada de la zona es relativamente estable fluctuando entre un mínimo de 24,7 °C y un máximo de 31,4 °C, con una temperatura media anual de 29,5 °C. El mes más caluroso en la zona fue febrero, con una temperatura promedio de 30,3 °C. El último trimestre del año fue el más frío, con una temperatura promedio entre estaciones de 27,4 °C.

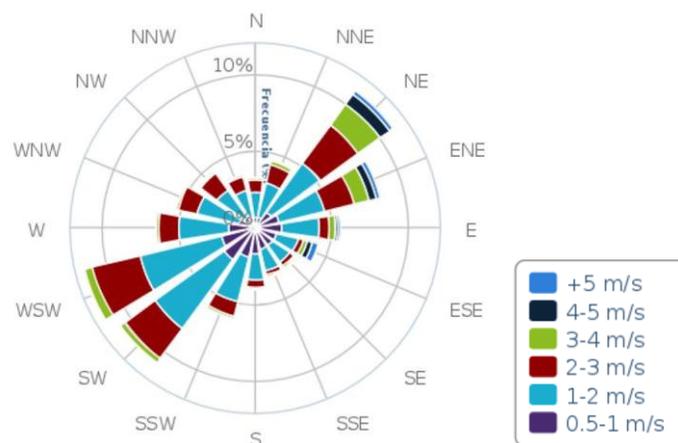
La humedad relativa media mensual varía entre 19% en los meses secos, con mínimos en febrero, y un máximo de 84% en octubre, cuando se observa el incremento de la precipitación en la zona.

En cuanto a precipitación, el segundo y cuarto trimestre del año presentan la mayor precipitación (398 mm), lo que ocasiona un aumento en la humedad relativa.

En la gráfica 4, se muestra un diagrama de rosa de los vientos a partir de la información recolectada durante 2014 en la zona de estudio. Se puede observar que la frecuencia de los vientos en el segundo y cuarto cuadrante (90-180° y 270-360°, sentido manecillas del reloj), siempre es inferior al 5%, de esta forma se pueden identificar dos componentes principales:

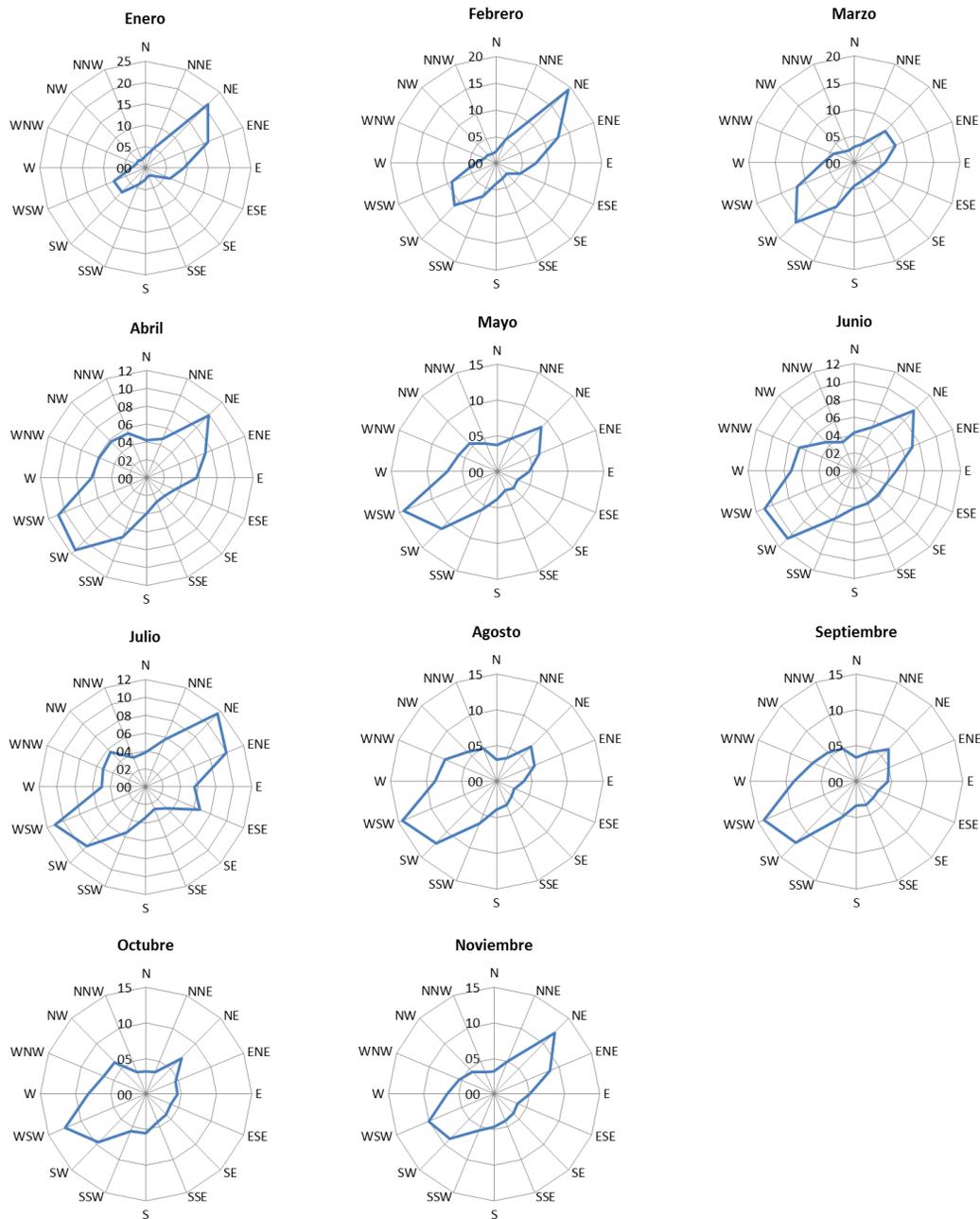
- 1) Los vientos del primer cuadrante (0-90°) presentan una frecuencia del 29,6. Se destacan los vientos de origen NE con una frecuencia de 11,1%.
- 2) Los vientos del tercer cuadrante (270-360°) muestran una frecuencia de 32,2%. Se observa una frecuencia mayoritaria en los vientos con dirección WSW y SW, con frecuencias de 11,5% y 10,9%, respectivamente.

Gráfica 4. Diagrama de rosa de los vientos en 2014 en la estación de La Francia - IDEAM



La gráfica 5 detalla la frecuencia de dirección de viento registrada en cada mes entre enero y noviembre de 2014.

Gráfica 5. Diagramas mensuales de dirección del viento (%) registrados en la Estación Meteorológica La Francia - IDEAM entre enero y noviembre de 2014.

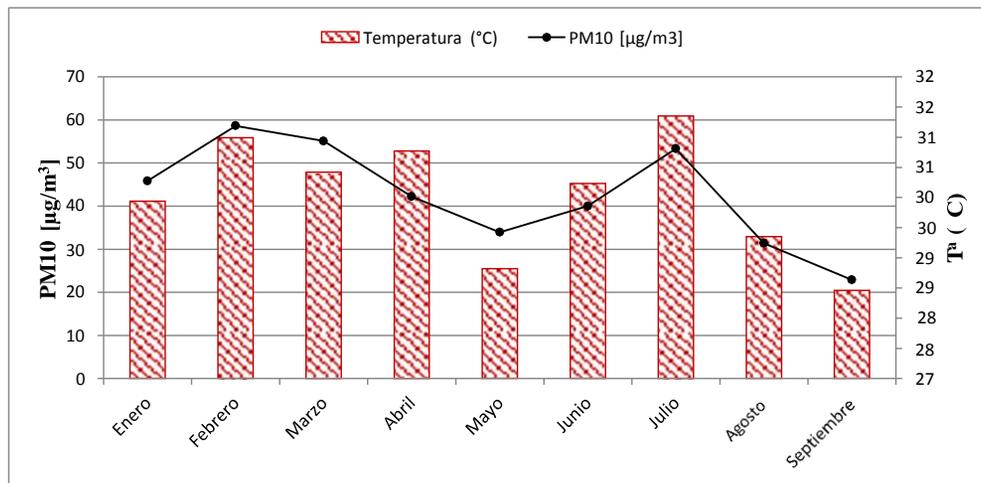


Como se observa, los vientos predominantes en enero y febrero se ubican sobre el primer cuadrante; mientras que para agosto, septiembre y octubre, se ubican sobre el tercer cuadrante, coincidiendo con los meses en los cuales se evidencia un incremento de la precipitación.

Cabe resaltar que los vientos de mayor intensidad ocurren con mayor frecuencia en el primer trimestre del año y se observa que estas componentes tienen una dirección mayoritaria en NE, con una frecuencia promedio de 20,3%.

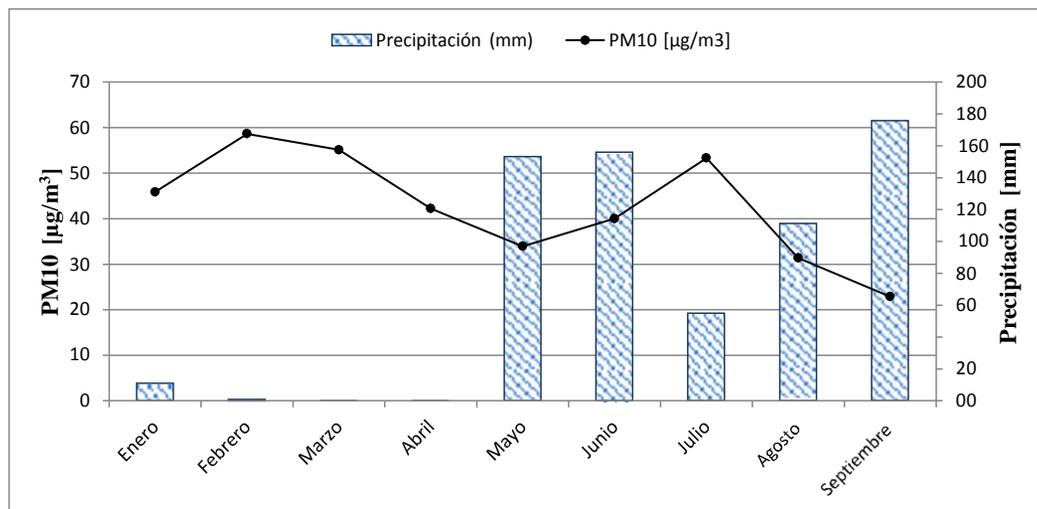
La gráfica 6 presenta el comportamiento de las concentraciones promedio de PM₁₀ registradas en ZM13 durante el periodo de enero a septiembre de 2014, contra la temperatura medida en la Estación Francia - IDEAM.

Gráfica 6. Comportamiento de la concentración de PM₁₀ respecto a la temperatura [°C]



La gráfica 7 muestra una fuerte relación inversa entre la precipitación y las concentraciones de PM₁₀. En los meses más lluviosos del año (mayo y septiembre), la concentración de PM₁₀ es la más baja.

Gráfica 7. Comportamiento de la concentración de PM₁₀ respecto a la precipitación [mm]



También se determina con claridad que los meses con mayor concentración de PM₁₀ son febrero y julio, en los cuales predominan los vientos de la dirección NE; mientras que los meses de menor concentración de PM₁₀ (mayo, agosto y septiembre) predominan los viento de la dirección WSW.

6.2. ANÁLISIS PRELIMINAR

El personal técnico y operativo de Corpocesar ha realizado conteos vehiculares en diferentes épocas del año y para días laborales y dominicales, así como monitoreos horarios con equipos automáticos que proporcionan información detallada que permite obtener perfiles horarios del comportamiento del material particulado. Con esta información se podrían identificar de forma aproximada las posibles fuentes que aportan contaminación al aire.

En este apartado se presentan los resultados de los conteos vehiculares y monitoreos horarios realizados en el último año.

6.2.1. Conteos Vehiculares

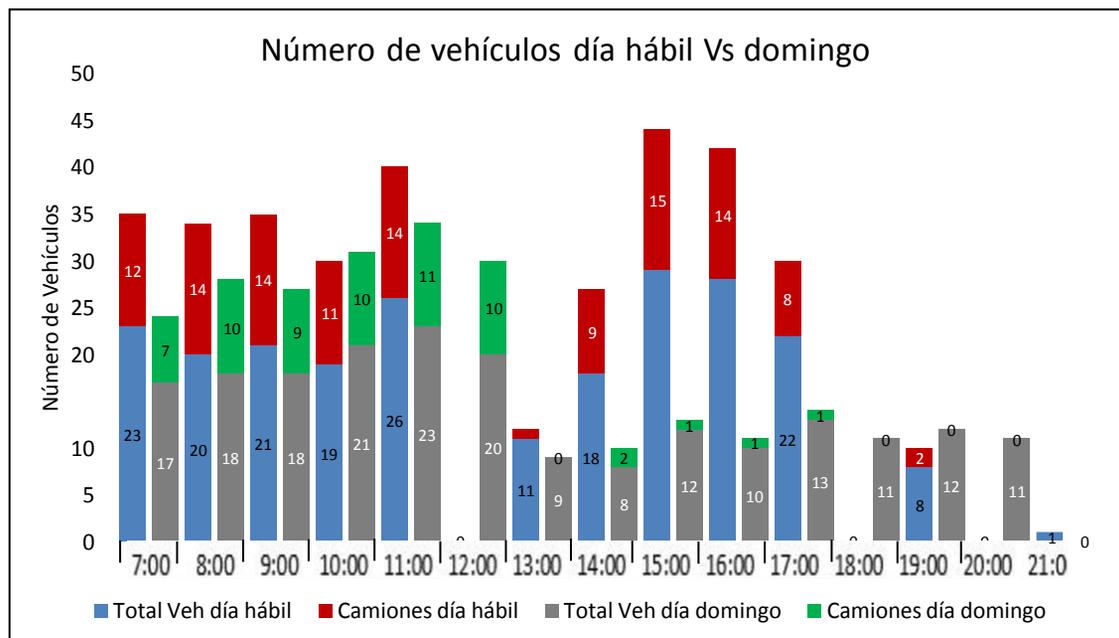
El primer conteo vehicular sobre la vía que comunica los corregimientos de El Hatillo y La Loma de Calenturas se realizó los días viernes 20 y domingo 29 de septiembre de 2013, entre las 7:00 a.m. hasta las 10:00 p.m. para ambos días.

Los resultados se muestran en la gráfica 8 por conteo acumulado de cada hora y en la Tabla 6 para el total acumulado por tipo de vehículo:

Tabla 6. Resultados conteo vehicular, septiembre 20 y 29 de 2013.

Día	Motos	Autos	Taxis	Camionetas	Buses	Camiones	Veh Totales
Laboral	100	2	0	5	6	114	227
Dominical	127	5	0	9	0	62	203

Gráfica 8. Número de vehículos por hora registrados el 20 de septiembre de 2013 (día laboral) y 29 de septiembre (domingo)



Al comparar los resultados de los conteos vehiculares realizados en un día de semana normal y un día festivo (domingo), se evidencia un cambio notable en la cantidad de camiones que circulan por esta vía, en un día normal de la semana

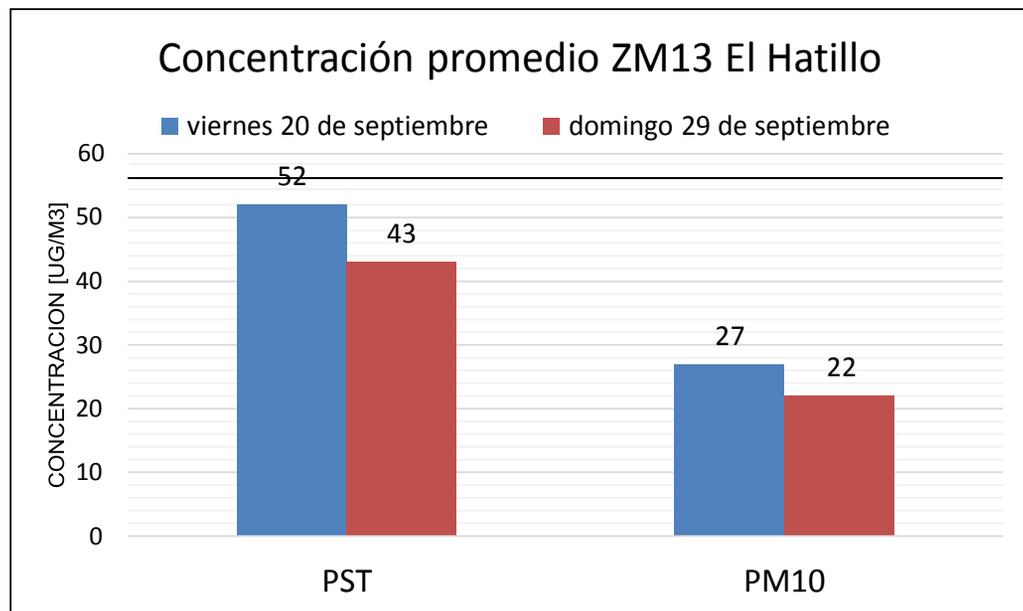
pasan cerca del doble de camiones que en un día festivo, esto debido a que las actividades industriales de la zona no operan a su totalidad un día festivo. Con base en la información suministrada por Corpocesar, se ha evidenciado que principalmente los camiones que utilizan la vía despavimentada El Hatillo-La Loma pertenecen a una empresa de la zona productora de aceite de palma.

Ilustración 8. Tipo de camiones que utilizan la vía en donde se realizó el aforo vehicular.



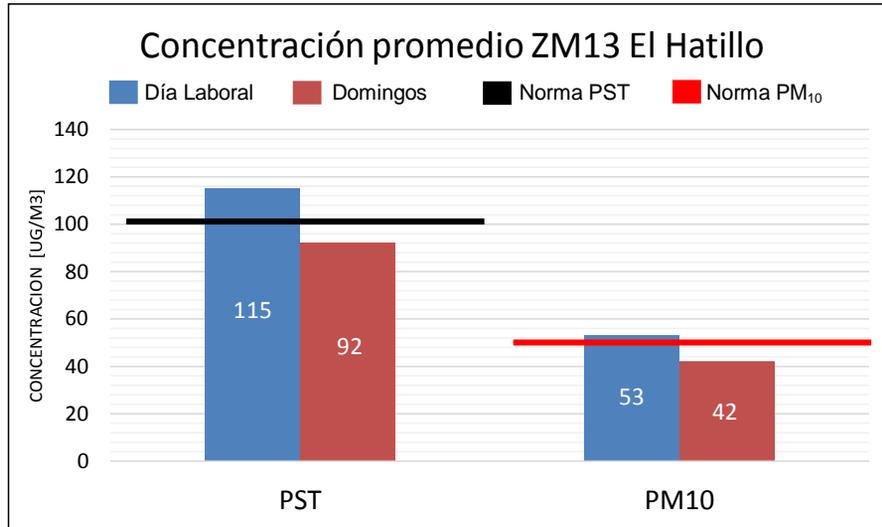
Los resultados del aforo se compararon con los datos de calidad del aire obtenidos en la estación ZM13. La gráfica 9 muestra la diferencia entre las concentraciones en los días en los cuales se realizó el conteo vehicular, concluyendo que ambos parámetros (PST y PM_{10}) disminuyeron el día festivo (domingo), cuando la operación del sector industrial de la zona es menor y el número de camiones también es menor. La disminución entre estos dos días fue de 17% en PST y 19% en PM_{10} .

Gráfica 9. Concentración de Material particulado para los días del conteo vehicular.



Para reducir la incertidumbre asociada a la medición durante un solo día, se realizó un promedio con todos los monitoreos realizados por el SEVCA_ZCC en los días domingo de los últimos 2 años (2013 y 2014) y se comparó con el promedio de los monitoreos realizados en días laborales de los mismos años. Los resultados concuerdan con los datos obtenidos los días de conteo vehicular 20 y 29 de septiembre, ya que la disminución de PST y PM_{10} de los domingos es del 20% respecto a los días laborales. Adicionalmente, se observa en estos promedios históricos que los domingos no se supera la norma anual mientras que los días laborales sí, lo cual es un indicio evidente de la afectación que sufre la calidad de aire por el paso de mayor cantidad de vehículos (especialmente camiones) y de la operación normal de las actividades industriales de la zona.

Gráfica 10. Concentración material particulado día laboral y domingos 2012 – 2014.



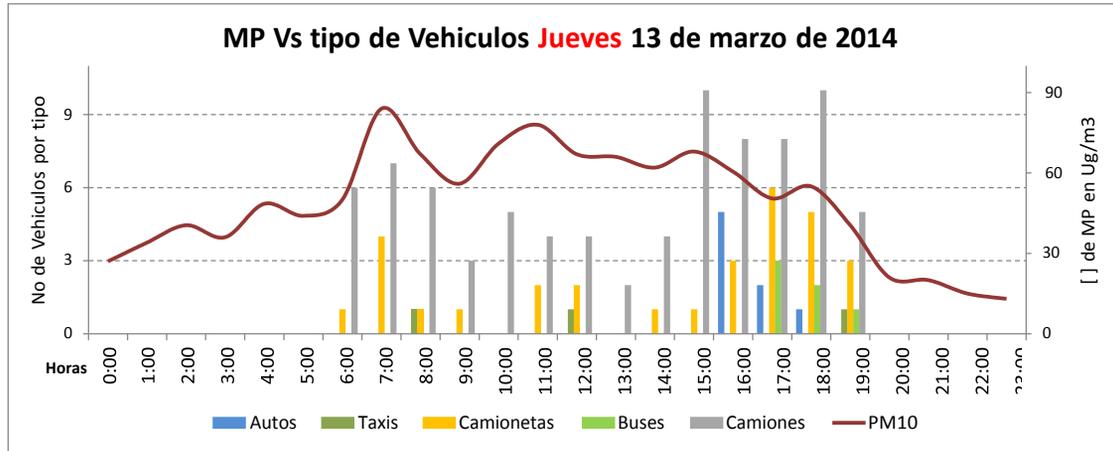
El segundo conteo vehicular se realizó el jueves 13 de marzo y domingo 23 de marzo de 2014, en donde se tuvo la oportunidad de realizar simultáneamente monitoreo horario de PM_{10} con un analizador automático FHC14¹⁷. En la tabla 7 se encuentra el detalle del resultado del conteo realizado por el personal técnico de Corpocesar y en las gráficas 11 y 12, la comparación de los aforos y la concentración horaria de PM_{10} .

Tabla 7. Resultados conteo vehicular marzo 13 y 23 de 2014.

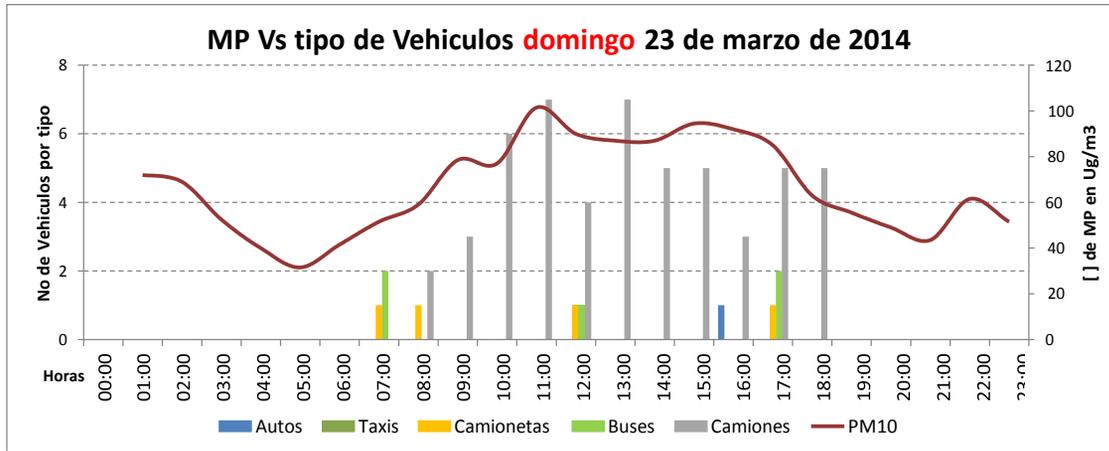
Día	Motos	Autos	Taxis	Camionetas	Buses	Camiones	Veh Totales
Laboral	279	9	3	35	8	140	474
Dominical	203	1	0	7	6	54	271

¹⁷ Thermo Scientific FH62C14, monitor automático con principio de atenuación de rayos Beta. EQPM-1102-150.

Grafica 11. Número de vehículos Vs MP registrados el 13 de marzo de 2014 (laboral)



Grafica 12. Número de vehículos Vs MP registrados el 23 de marzo de 2014 (dominical)



Con base en lo observado en esta última gráfica, el incremento del paso de camiones por la vía destapada El Hatillo – La Loma es directamente proporcional a las concentraciones registradas por el analizador automático de PM₁₀. Adicionalmente, este tipo de muestreador permite conocer el comportamiento de la calidad del aire para cada hora y se puede observar en ambas graficas que las mayores concentraciones se registran entre las 6:00 y 18:00, coincidiendo con el

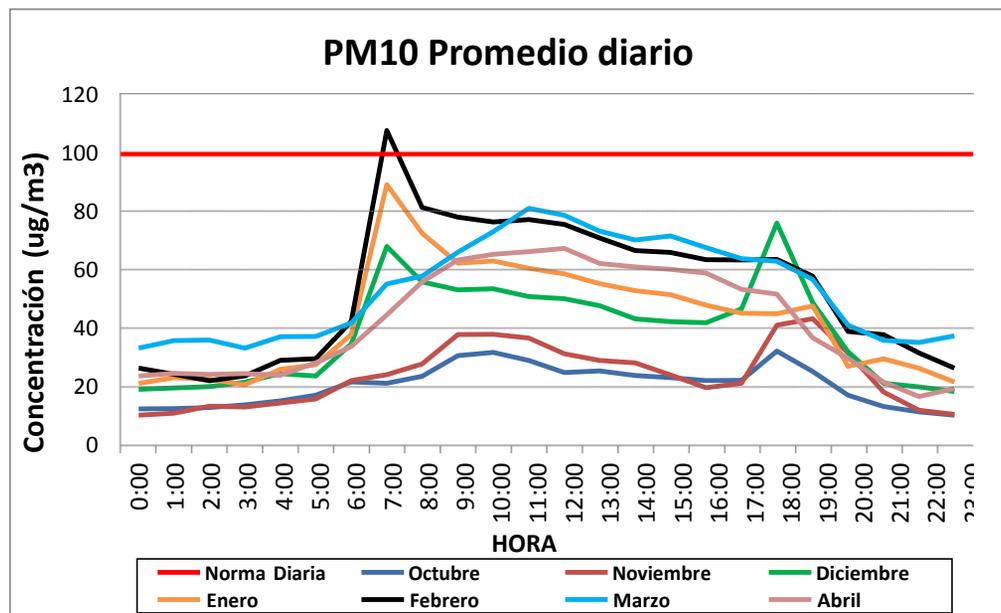
horario de operación de la empresa productora de aceite de palma que se encuentra en la zona.

6.2.2. Monitoreo automático de material particulado en El Hatillo

Con el objeto de profundizar la conclusión anterior, la gráfica 13 presenta los resultados del monitoreo horario realizado por Corposesar entre octubre de 2013 y abril de 2014 con el analizador Thermo FH62C14.

Los monitoreos durante 7 meses continuos muestran un comportamiento horario característico, en el cual las mayores concentraciones de material particulado corresponden al inicio y final de la jornada laboral de 10 horas, posiblemente por la circulación de fuentes móviles entre las 7:00 am y 6:00 pm.

Grafica 13. Perfil horario de MP entre los meses de octubre de 2013 y abril de 2014 en ZM13.



Tanto el conteo vehicular como el monitoreo especial con el analizador automático sobre la vía que comunica los corregimientos El Hatillo y la Loma sugieren que

existe una incidencia de las fuentes móviles sobre la calidad del aire que respira la población de la zona de interés.

Con base en estos resultados, funcionarios de Corpocesar realizaron un requerimiento a la empresa productora de aceite de palma, que utiliza vehículos pesados para el transporte de la materia prima, y se implementó como medida de control colocar sobre la vía despavimentada residuos de biomasa, con el fin de reducir el levantamiento de material grueso por el paso de vehículos pesados, como se muestra en la Ilustración 9.

Ilustración 9. Acción de control sobre la vía El Hatillo-La Loma realizada a partir del mes de septiembre de 2014.



Es pertinente realizar un nuevo monitoreo horario con un analizador automático y aforo vehicular con las condiciones actuales de la vía para determinar la eficacia de la medida de control implementada.

6.3. ANÁLISIS QUÍMICO DE MATERIAL PARTICULADO

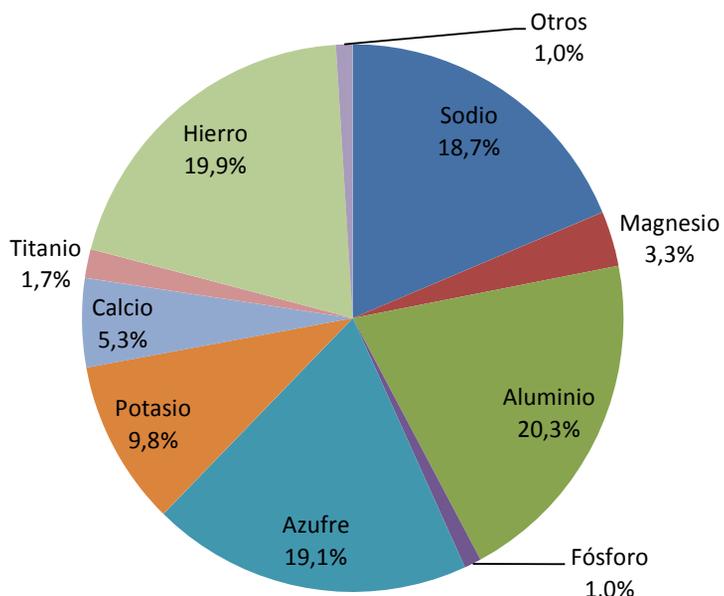
En las tablas 3 y 4 se especifican el número y tipo de muestras analizadas en el laboratorio de Higiene de la División de Salud Ambiental del Estado de Wisconsin (WSLH) y a continuación se exponen los análisis obtenidos.

6.3.1. Componentes mayoritarios

6.3.1.1. Metales solubles en agua. Los resultados analizados en esta etapa se obtuvieron utilizando como técnica de caracterización Espectrometría de Masas con fuente de Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-MS) usando un equipo Thermo-Finnigan Element 2, con el cual se determinó la concentración de 50 especies elementales. Para realizar un análisis de los metales mayoritarios en las muestras, fueron seleccionados los componentes que representan una fracción superior al 1% de la distribución másica de las 50 especies; los resultados generales son presentados en los anexos digitales del presente trabajo de aplicación.

Como se puede observar en la gráfica 14 los metales con mayor presencia en las muestras analizadas son en su orden el Aluminio (Al), Hierro (Fe), Azufre (S) y Sodio (Na), respectivamente. De las especies reportadas por el laboratorio se pueden identificar nueve componentes metálicos fundamentales en el porcentaje másico que corresponde a esta caracterización.

Grafica 14. Distribución media de metales solubles en agua en las muestras tomadas en la estación de monitoreo ZM13. Otros: Metales con participación inferior a 1%.

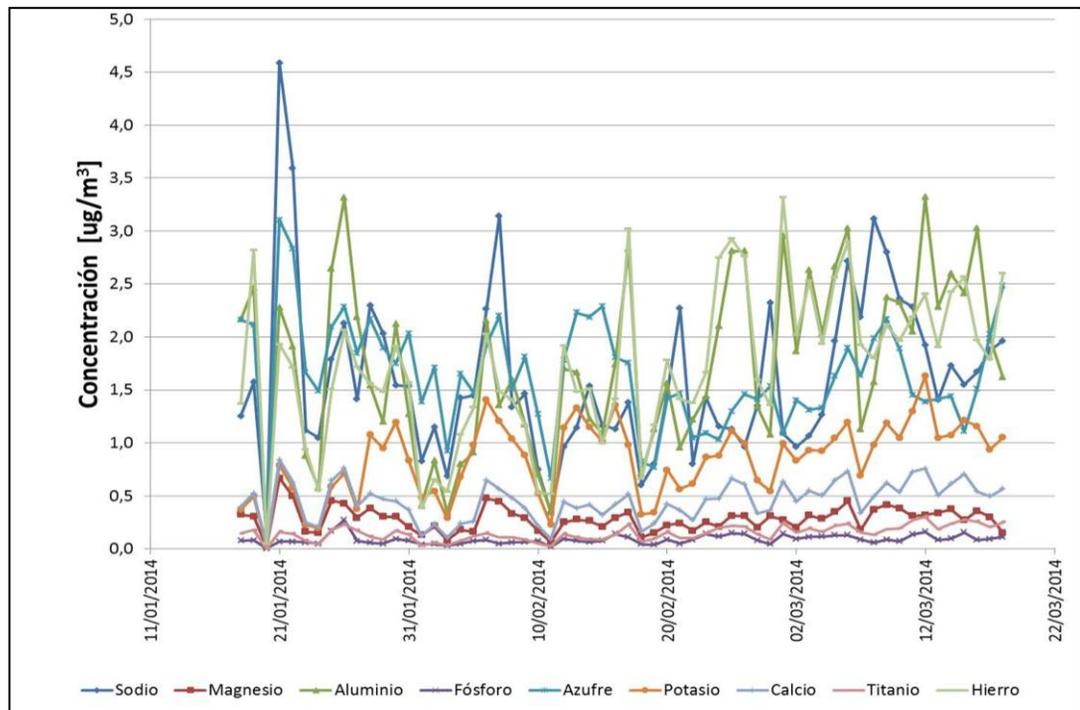


La gráfica 15 muestra el comportamiento de las concentraciones de metales durante el periodo de monitoreo y en la Tabla 8 se presentan los datos estadísticos básicos utilizados para el análisis de componentes mayoritarios, con respecto a la técnica de caracterización usada en esta sección. Es de resaltar que durante el día 20 de Enero de 2014 (lunes), se observan las concentraciones mínimas de los metales solubles analizados.

Tabla 8. Principales resultados de la caracterización por ICP-MS a los filtros TFE. [ug/m³].

Especie	# Datos	Promedio	Máximo	Fecha Max.	Mínimo	Fecha Min.
Aluminio	60	1,74	3,32	12/03/2014	0,06	20/01/2014
Hierro	60	1,71	3,31	01/03/2014	0,05	20/01/2014
Azufre	60	1,64	3,10	21/01/2014	0,15	20/01/2014
Sodio	60	1,61	4,59	21/01/2014	0,14	20/01/2014
Titanio	60	0,15	0,30	12/03/2014	0,01	20/01/2014
Magnesio	60	0,28	0,66	21/01/2014	0,02	20/01/2014
Potasio	60	0,84	1,63	12/03/2014	0,02	20/01/2014
Calcio	60	0,45	0,84	21/01/2014	0,03	20/01/2014
Fósforo	60	0,09	0,27	26/01/2014	0,01	20/01/2014

Grafica 15. Resultados de metales solubles en agua con porcentajes mayoritarios en la muestras analizadas. Al, Fe, S, Na, Ti, Mg, K, Ca, P [$\mu\text{g}/\text{m}^3$].



6.3.1.2. Aniones y cationes. En esta sección fueron analizados los filtros de cuarzo (QFFL) mediante cromatografía de iones (IC), obteniendo la concentración de iones presente en las muestras de PM_{10} . La gráfica 16 muestra la distribución de la concentración de los iones identificados durante los días de muestreo.

La Tabla 9 presenta los datos estadísticos básicos de los iones determinados en las muestras. Se observa que los sulfatos presentan la mayor concentración promedio entre los iones con un máximo de $8,30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que los cloruros presentan la menor concentración promedio con un valor máximo de $1,89 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Gráfica 16. Concentración de iones en los filtros analizados respecto al tiempo de monitoreo. [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

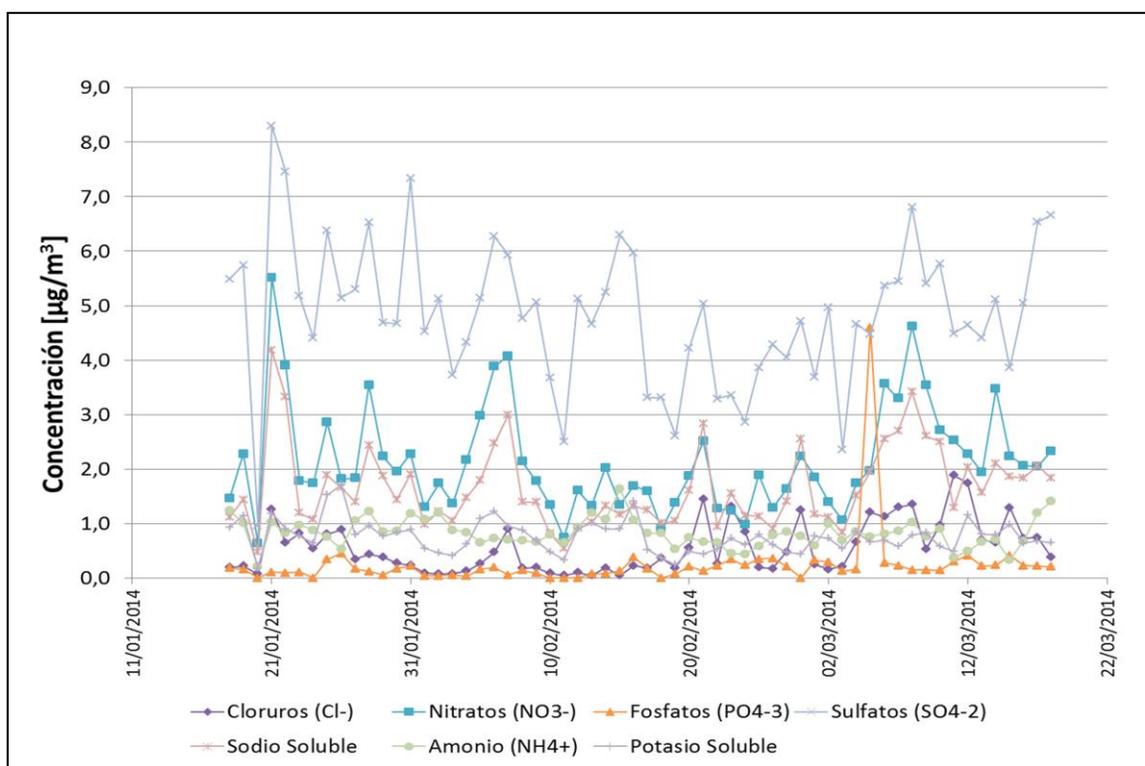


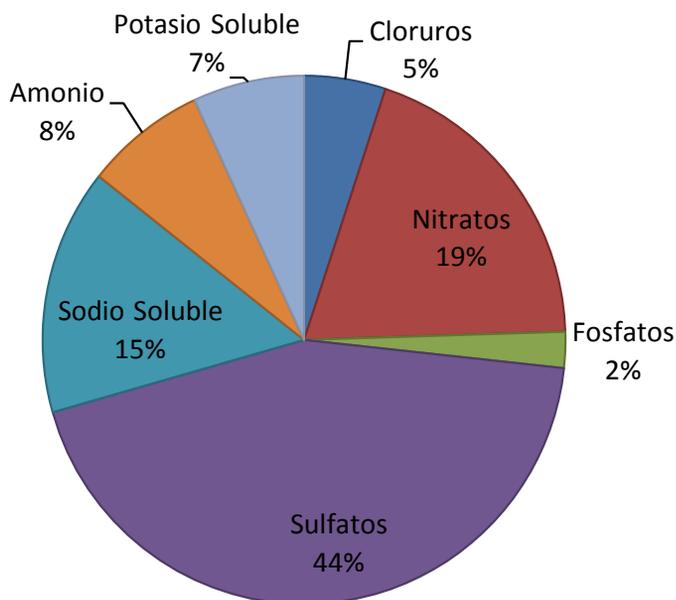
Tabla 9. Principales resultados de la caracterización por IC a los filtros QFFL. [$\mu\text{g}/\text{m}^3$].

Especie	Datos	Promedio	Máximo	Fecha Max.	Mínimo	Fecha Min.
Cloruros (Cl-)	60	0,56	1,89	11/03/2014	0,05	11/02/2014
Nitratos (NO ₃ -)	60	2,15	5,51	21/01/2014	0,64	20/01/2014
Fosfatos (PO ₄ -3)	60	0,24	4,60	05/03/2014	0,00	24/01/2014
Sulfatos (SO ₄ -2)	60	4,84	8,30	21/01/2014	0,96	20/01/2014
Sodio Soluble	60	1,66	4,18	21/01/2014	0,47	20/01/2014
Amonio (NH ₄ +))	60	0,83	1,63	15/02/2014	0,21	20/01/2014
Potasio Soluble	60	0,76	1,71	26/01/2014	0,17	20/01/2014

Los datos fueron totalizados con el fin de determinar la distribución de la concentración de los iones, donde el 44% de estos corresponden a los sulfatos, seguido del 19% y 15% para los Nitratos y Sodio Soluble, respectivamente, siendo estos tres los iones mayoritarios presentes en las muestras. La distribución promedio de los iones es presentada en la gráfica 17. Los iones con menor

presencia en las muestras corresponden a los fosfatos, con un porcentaje medio del 2%.

Gráfica 17. Distribución media de los iones en las muestras tomadas en la estación de monitoreo ZM13.

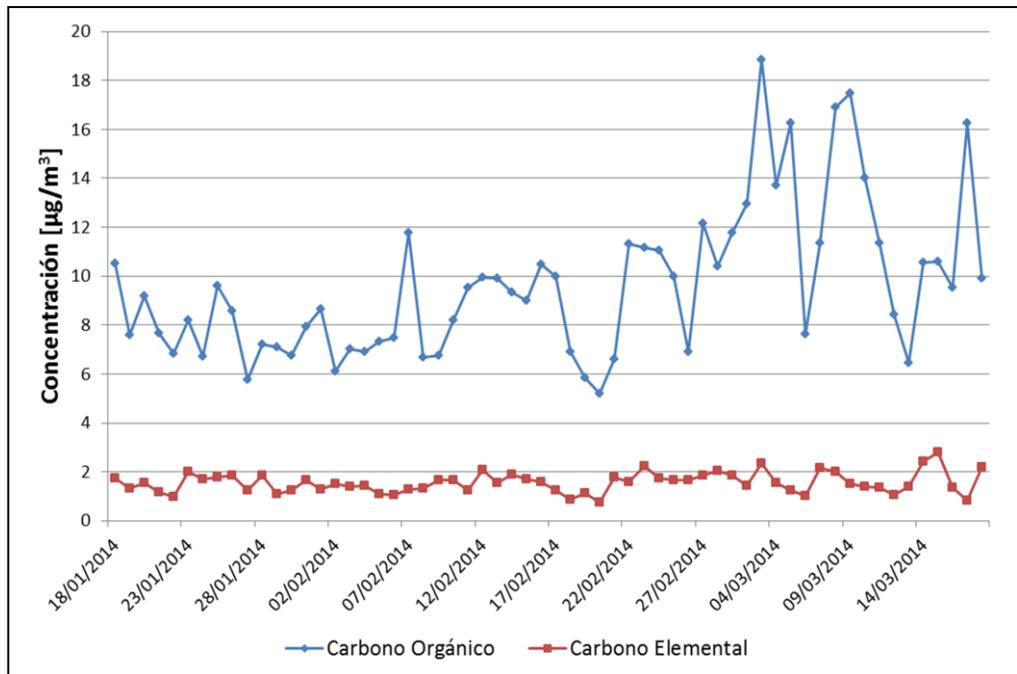


6.3.1.3. Carbono orgánico y elemental (OC y EC). La gráfica 18 presenta las concentraciones diarias de OC y EC para las muestras analizadas durante el periodo de estudio. Se observa que los días con mayores concentraciones promedio de carbono orgánico se registraron hacia el final de la campaña de muestreo, entre los días 02/03/2014 al 10/03/2014, y todos resultados presentan una desviación estándar entre ellos de $3,09 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Por otra parte, los valores de carbono elemental presentan concentraciones más constantes a lo largo del periodo analizado con un valor promedio de $1,56 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y una desviación estándar entre ellos de $0,42 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La correlación entre los valores de EC y OC es muy baja con un R^2 de 0,095 lo que evidencia la posibilidad que el aporte de estas especies no provenga de la misma fuente de emisión. Por otra

parte la relación EC/OC promedio es igual a 0,17 y el EC en las muestras diarias no supera el 27% del OC.

Gráfica 18. Concentración de carbono orgánico y elemental en los filtros analizados respecto al tiempo de monitoreo. [$\mu\text{g}/\text{m}^3$].



6.3.1.4. Hidrocarburos aromáticos policíclicos. La concentración de hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH, por sus siglas en inglés) fue determinada mediante extracción de solvente – TD- GCMS. La gráfica 19 presenta la distribución promedio de los PAH en las muestras analizadas.

Como puede observarse el indeno(1,2,3-cd)pireno y el benzo(g,h)perileno son los PAH mayoritarios en las muestras con porcentajes de 21% y 20%, respectivamente. Así mismo los PAH con porcentajes superiores a 4% son en su orden descendente el benzo(b)fluoranteno, reteno, coroneno, benzo-pireno y piceno. Los valores estadísticos básicos de estos siete PAH mayoritarios son presentados en la Tabla 10.

Gráfica 19. Distribución media de los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH) en las muestras tomadas en la estación de monitoreo ZM13

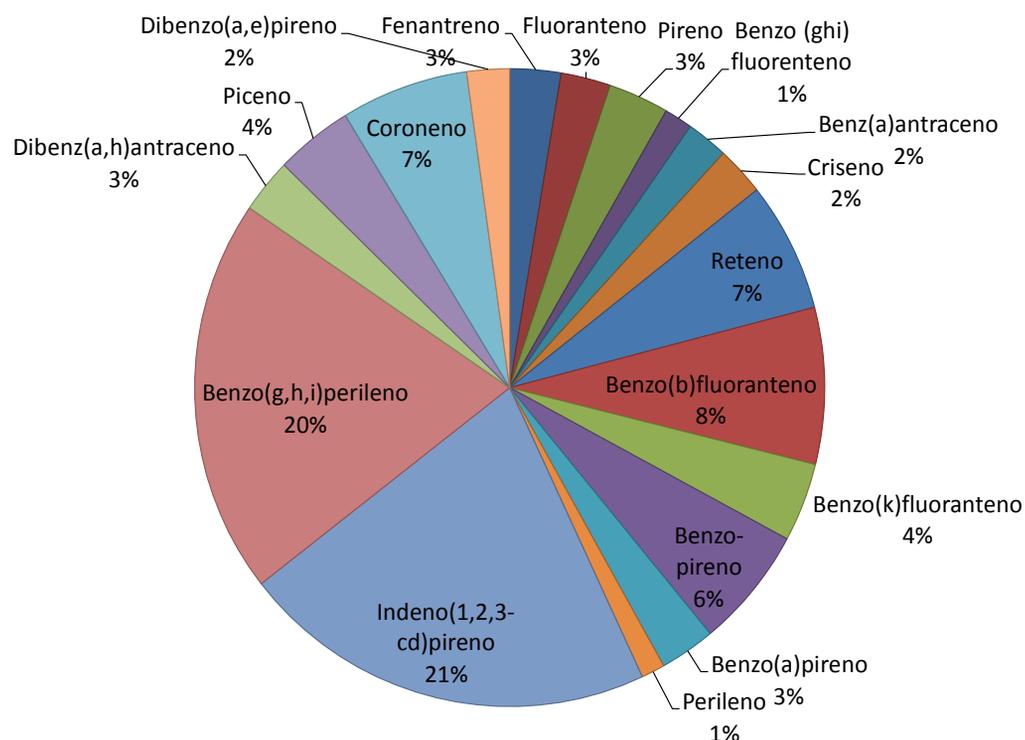


Tabla 10. Principales resultados de la caracterización por extracción de solvente – TD- GCMS a los filtros QFFH. [ng/ m³].

Especie	# Datos	Promedio	Máximo	Fecha Max.	Mínimo	Fecha Min.
Fenantreno	20	0,04	0,09	17/02/2014	0,01	02/02/2014
Reteno	20	0,11	0,19	17/02/2014	0,00	10/03/2014
Benzo(b)fluoranteno	20	0,13	0,26	20/02/2014	0,04	10/03/2014
Benzo-pireno	20	0,10	0,19	21/01/2014	0,04	10/03/2014
Indeno(1,2,3-cd)pireno	20	0,34	0,71	11/02/2014	0,10	14/02/2014
Benzo(g,h,i)perileno	20	0,32	0,82	11/02/2014	0,14	10/03/2014
Piceno	20	0,06	0,14	16/03/2014	0,04	01/03/2014
Coroneno	20	0,10	0,26	11/02/2014	0,05	01/03/2014

6.3.2. Acumulados másicos

Algunos elementos se encuentran presentes en forma de óxidos en el ambiente y, por consiguiente, en el material particulado. Por lo tanto, la masa elemental identificada debe corregirse teniendo en cuenta el oxígeno asociado a dichos

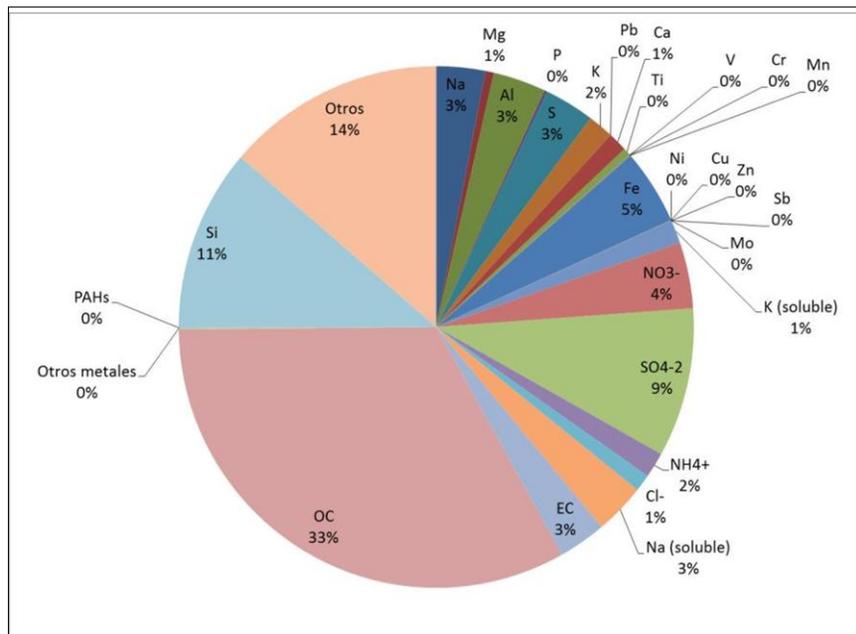
componentes. Así mismo, los componentes orgánicos incluyen dentro de su estructura hidrógeno y oxígeno cuya cantidad, al no ser determinada directamente, debe estimarse a partir de su asociación al carbono orgánico cuantificado.

Para analizar los acumulados de las caracterizaciones se realizó una reconstrucción másica basada en los factores de conversión descritos por Hernández (2012), adicionalmente el Sílice fue incluido como especie teniendo en cuenta una relación de $Si = 3.41 * Al$ (Mason, 1960). Los promedios de los resultados de las caracterizaciones mencionadas anteriormente fueron totalizados para analizar su distribución. La gráfica 20 presenta la distribución promedio luego de la reconstrucción másica, los resultados son presentados con base a la especie analizada mediante caracterización.

Los datos de la reconstrucción másica fueron comparados con el análisis gravimétrico del PM_{10} . De acuerdo con los resultados obtenidos fue posible realizar una reconstrucción másica con promedio de porcentajes de 86,3%. De esta forma se observa en la gráfica 20 un porcentaje de 13,7% de masa no cuantificada mediante análisis químico.

Se observa que los PAH tienen un porcentaje de participación no representativo debido a las bajas concentraciones detectadas, por otra parte la materia orgánica representada por el contenido de OC representa el componente mayoritario dentro de los datos analizados con un 32,9%. El Si determinado mediante reconstrucción másica es la tercera especie con mayor aporte en el PM_{10} . La participación de los metales analizados equivale al 18,4% en masa, mientras que los iones aportan un 20.6%.

Gráfica 20. Distribución media de la composición másica determinada mediante diferentes técnicas de caracterización en las muestras tomadas en la estación de monitoreo ZM13.



6.4. MODELOS RECEPTORES

Teniendo en cuenta el análisis realizado en el numeral 6.3, las especies fueron clasificadas por su participación másica en la corriente de material particulado PM_{10} y la relevancia de las especies como referente en el momento de asignar los aportes de las fuentes de emisión, de acuerdo con lo descrito por algunos autores [Hernández, 2012; Hamad S.H., 2015; Villalobos., 2015]. La Tabla 11 presenta el listado de las especies utilizadas en el modelo con sus respectivos valores estadísticos principales.

Inicialmente se realizó la corrida del modelo incluyendo los PAH, pero finalmente no fueron tomados en cuenta para el análisis de los modelos receptores con base en lo descrito en el apartado 6.3.2; adicionalmente se observa con los resultados obtenidos en esta corrida preliminar que la concentración de los PAH en las

fuentes de emisión es muy homogénea y la inclusión de estos datos en el modelo no genera un aporte claro en el momento de la distribución de especies (composición de la fuente) y aportes de cada una de las fuentes de emisión. Con el fin de unificar las unidades entre las caracterizaciones realizadas y el PM₁₀ medido por los equipos de la estación ZM13, se utilizó un volumen de referencia de 24 m³ y 1627 m³ de acuerdo a las especificaciones reportadas para los equipos en campo, LowVol¹⁸ y HighVol¹⁹, respectivamente. Por consiguiente, el análisis se presenta en unidades de µg/m³.

Tabla 11. Datos estadísticos básicos de las especies utilizadas en el modelo receptor

Especie	# Datos	Promedio (µg/m ³)	Desviación	Máximo	Mínimo
Sodio	60	1,607	0,790	4,588	0,145
Magnesio	60	0,280	0,116	0,666	0,020
Aluminio	60	1,742	0,814	3,319	0,063
Fósforo	60	0,087	0,044	0,269	0,003
Azufre	60	1,645	0,520	3,103	0,149
Potasio	60	0,842	0,348	1,631	0,024
Calcio	60	0,452	0,184	0,842	0,028
Titanio	60	0,147	0,070	0,302	0,004
Hierro	60	1,716	0,725	3,313	0,048
Cloruros (Cl⁻)	60	13,380	11,370	45,345	1,153
Nitratos (NO₃⁻)	60	51,540	23,417	132,346	15,279
Fosfatos (PO₄⁻³)	60	6,637	13,836	110,297	0,748
Sulfatos (SO₄⁻²)	60	116,232	31,889	199,280	23,108
Sodio Soluble	60	39,862	17,896	100,228	11,385
Amonio (NH₄⁺)	60	19,849	6,330	39,174	5,014
Potasio Soluble	60	18,213	7,090	41,146	4,114
OC (µg/filter)	60	230,566	74,215	452,595	124,465
EC (µg/filter)	60	37,334	9,981	66,910	18,260
PM 10	60	1296,058	388,256	3532,800	545,040

Los datos utilizados fueron tratados teniendo en cuenta las indicaciones reportadas por diferentes autores referenciados en literatura científica. Los valores iguales a cero o por debajo del límite de detección (LD) en la concentración fueron reemplazados por el promedio de las concentraciones de los otros datos de la

¹⁸ Flujo de medición = 16.7 LPM lo cual equivale a 1.002 m³/h o 24.048 m³ en un día

¹⁹ Flujo de medición = 1,13 m³/min lo cual equivale a 1627 m³/día

especie, la incertidumbre de estos datos fue de cuatro veces la concentración asignada. Para el caso de los datos de PM_{10} , se tomó como incertidumbre un valor de 5% de las concentraciones reportadas en cada fecha, tal como lo establece el fabricante del equipo.

6.4.1. Modelo PMF, Factorización de matriz positiva

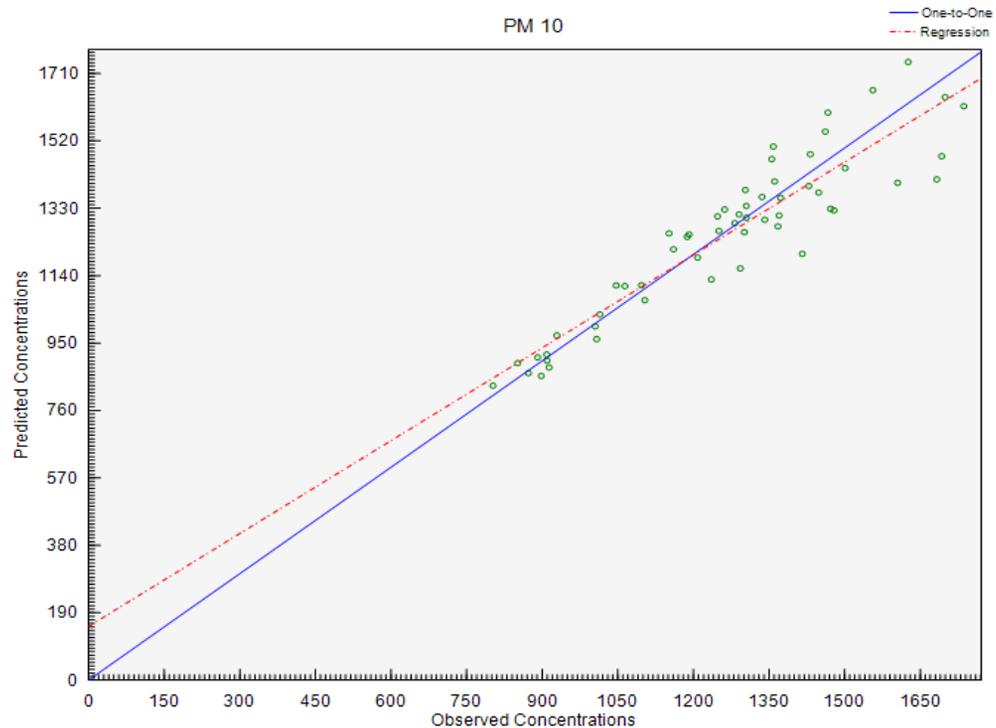
Para el desarrollo de este modelo se realizaron las siguientes suposiciones:

- Los valores extremos en la gráfica comparativa de valor predicho versus valor observado fueron removidos, de tal forma que los valores reportados para las fechas 01/20/14, 02/11/14, 02/9/14 y 02/28/14 no fueron tenidos en cuenta en el modelo.
- Las especies con una relación baja entre el promedio de la concentración y el promedio de las incertidumbres (S/N) se clasificaron como de influencia baja (*weak*), de acuerdo a lo indicado en la guía de usuario del programa (EPA/600/R-14/108, 2014) (K, PO_4^{-3} , Na y K solubles).
- El programa fue iniciado utilizando 5 puntos de partida diferentes, cada uno con 20 corridas, para un total de 100 iteraciones, de donde fue seleccionada el mejor ajuste teniendo en cuenta el valor de Q_R .

6.4.1.1. Principales resultados respecto a PM_{10} . A continuación se presentaran los resultados del modelo respecto a la composición y distribución de fuentes de PM_{10} . El modelo permite analizar el comportamiento de las demás especies incluidas en el modelo; sin embargo, no son el punto central del presente trabajo de aplicación.

Tomando como punto de partida de las iteraciones el 17 (*seed*), se obtuvo un ajuste del modelo con una Q_R de 2415 y una Q_T de 3108. Se debe tener en cuenta que los valores Q permiten evaluar que tan bien se ajusta el modelo a los datos de entrada y es seleccionada la corrida con menor valor Q.

Gráfica 21. Valores observados versus predichos de PM₁₀ con la aplicación del modelo PMF, usando 5 factores. Modelo PMF, estación ZM13.

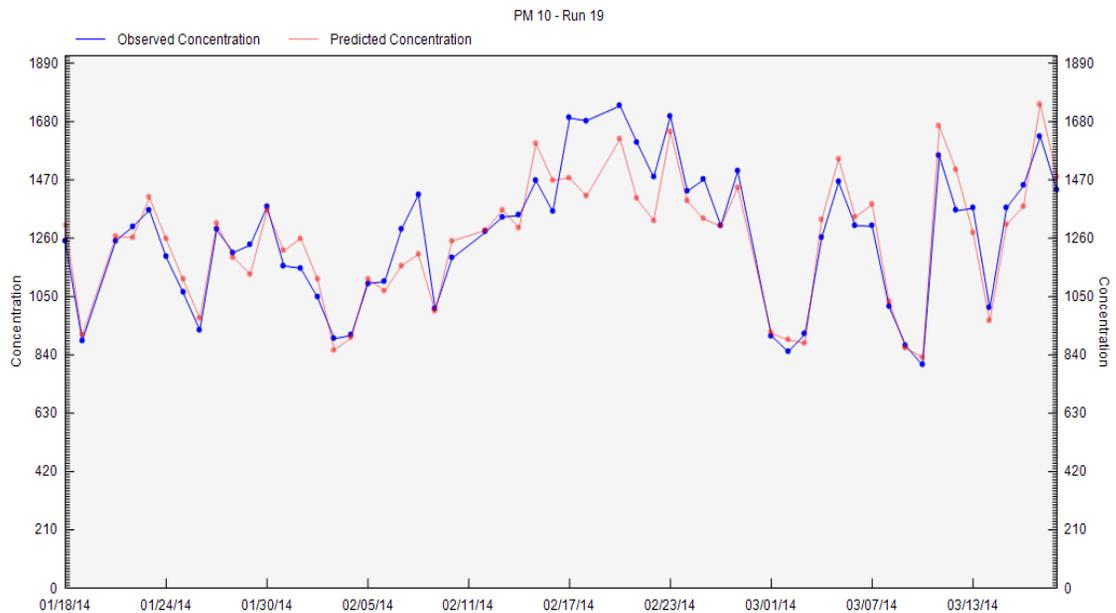


Los datos de entrada fueron corridos tomando como punto de partida 4 y 5 factores. Los resultados de ajuste del modelo para PM₁₀ evidencian la necesidad de utilizar 5 factores de referencia o 5 fuentes, teniendo en cuenta la posible procedencia y el aporte de las especies analizadas. De acuerdo con esto, la gráfica 21 muestra la relación entre los valores predichos por el modelo y los observados con su respectivo ajuste; cabe resaltar que la regresión de los datos de esta figura cuenta con coeficiente de correlación R^2 de 0,85, lo que permite concluir que se observa una representación confiable de los resultados con el uso de este modelo.

De manera similar, la gráfica 22 presenta el comportamiento de los valores predichos y observados durante el periodo de tiempo del monitoreo. Nuevamente, se observa una predicción muy aproximada de los valores utilizando el modelo

PMF planteado. Los valores que no han sido predichos con precisión coinciden con valores de entrada que presentan grandes incertidumbres.

Gráfica 22. Relación de valores observados versus predichos respecto a la serie de tiempo de PM10. Modelo PMF, estación ZM13.



Para poder determinar la contribución de las fuentes a la generación de material particulado PM₁₀, es importante analizar la concentración de cada una de las especies en cada una de las posibles fuentes, de esta forma es posible identificar inicialmente las fuentes de emisión más participativas. La gráfica 23 muestra el porcentaje de las especies presentes y la concentración de las mismas en las 5 fuentes seleccionadas.

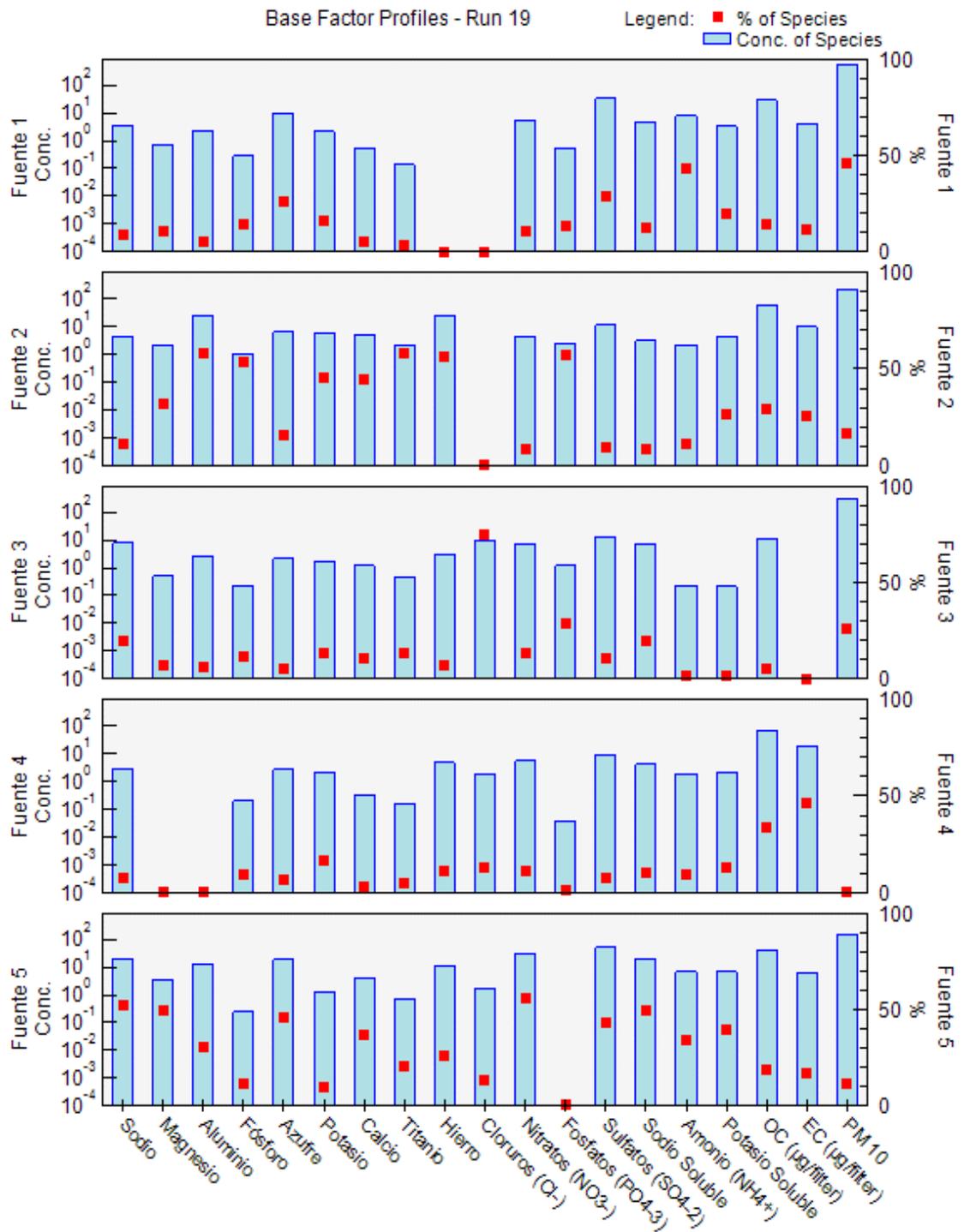
De acuerdo con esto es posible identificar la distribución de las especies de la siguiente forma:

La **Fuente 1**, cuenta con un porcentaje mayoritario de Amonio (NH₄⁺), aproximadamente el 44% del total de esta especie, acompañado de un 30% de los

Sulfatos (SO_4^{-2}), 26% del Azufre (S) y 20% de Potasio (K). Adicionalmente se observa la presencia en menor cantidad del carbono orgánico (OC) 14% y el 11% del carbono elemental (EC). De acuerdo con la literatura (Polissar et al., 1998 y Bruinen de Bruin et al., 2006), la presencia conjunta de OC, K y cationes como NH_4^+ , permite identificar una fuente de emisión común, que para este caso puede ser atribuida a incendios forestales o el uso de biomasa como combustible.

La **Fuente 2**, presenta un contenido mayoritario de Aluminio (Al), Titanio (Ti), Hierro (Fe) y Fosforo (P), con porcentajes del total de la especie de 58%, 58%, 56% y 54%, respectivamente. En este punto, cabe resaltar que a pesar que en los análisis de laboratorio no se tuvo en cuenta la especie Silice (Si), es posible aproximar una relación entre Si/Al y Si/Fe, de tal forma se podría asumir que la fuente generadora de Al y Fe, es una fuente generadora de Si (Mason, 1960 y Cheng et al., 2000). Teniendo en cuenta lo anterior, es posible afirmar que la fuente generadora de estas especies es el suelo o polvo generalizado (Radaman et al, 2003 y Liu et al., 2003). Adicionalmente, es de resaltar la presencia de un porcentaje de 29% de OC y 25% de EC, los cuales, por conocimiento de la zona, pueden ser atribuidos a la presencia de actividades mineras en la extracción de carbón.

Gráfica 23. Perfiles de las fuentes de PM₁₀ de acuerdo a la distribución y aporte de cada especie analizada. Modelo PMF, estación ZM13.



Por otra parte la gráfica 23, muestra que la mayor concentración de Cloruros (Cl-) es focalizada en la **Fuente 3**, con un porcentaje del total de la especie de 75%. Adicionalmente se evidencia la presencia de Fosfatos (PO_4^{-3}) con un 28%, K con 13% y SO_4^{-2} con 11%. Teniendo en cuenta lo anterior y resaltando las concentraciones de Cl- y K, se podría afirmar que la fuente de emisión analizada proviene de la quema de desechos y basuras (Bruinen de Bruin et al., 2006), actividad frecuente en la zona donde se encuentra la estación de muestreo.

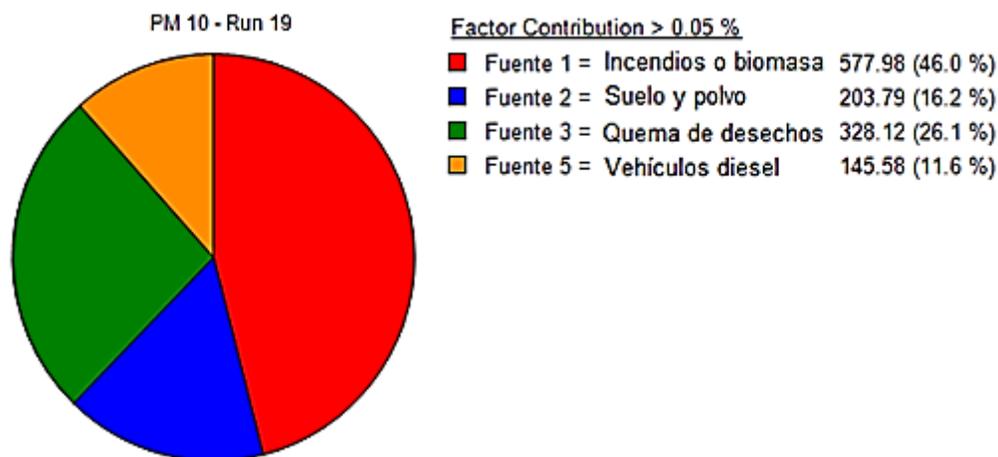
En caso de la **Fuente 4** se observa la presencia mayoritaria de EC y OC, 46% y 33%, respectivamente, lo que permite afirmar que la posible fuente de emisión puede ser causada por motores de vehículos de bajo cilindraje (Radaman et al, 2003), como por ejemplo las motos que circulan en la zona.

Por último la **Fuente 5**, presenta porcentajes de 18% y 17% para el OC y EC, respectivamente, lo que representa la presencia de fuentes móviles. De acuerdo con Bruinen de Bruin et al. 2006, la presencia de especies elementales como Sodio (Na) y el Magnesio (Mg), que para este caso es de 52% y 49%, respectivamente, permiten asumir que la fuente de origen son los vehículos que usan como combustible diesel, adicionalmente la presencia de SO_4^{-2} y Nitratos (NO_3^-) con un 43% y 56%, permite reafirmar que la fuente de emisión son los vehículos accionados con motores diesel (Kim et al., 2005), vehículos de gran circulación en la zona de estudio, tal como se evidenció también en los dos aforos vehiculares realizados en septiembre de 2013 y marzo de 2014.

6.4.1.2. Aportes de las fuentes a la generación de PM_{10} según modelo PMF.

Una vez identificadas las posibles fuentes de emisión de PM_{10} en la sección anterior, el modelo desarrollado realiza una aproximación del porcentaje de aporte de cada una de las fuentes a la corriente de PM_{10} analizado. La gráfica 24 muestra el aporte de cada una de las fuentes.

Gráfica 24. Distribución de los aportes de cada fuente a la emisión de PM₁₀ en la zona de estudio. Modelo PMF, estación ZM13.



Como se evidencia en la gráfica 24 la fuente con mayor aporte a la concentración de PM₁₀ es la quema de biomasa o su uso como combustible, con un aporte del 46% del PM₁₀. Esta fuente puede asociarse a la presencia en la zona de empresas de producción de aceite de palma como Palmargo S.A., que utiliza como combustible para la generación de vapor y energía la biomasa.

Adicionalmente, según los reportes entregados anualmente por Corposesar, entre los meses de enero y marzo de 2014 se registraron incendios forestales, como se muestra en la Tabla 12.

Tabla 12. Incendios forestales registrados durante la campaña de monitoreo.

Fecha	Lugar del incendio forestal
23/01/2014	Predio las cuevas frente a Calenturitas
25/01/2014	Plantación Ramal férreo
30/01/2014	Cerca de mina Pribbenow
31/01/2014	Cerca de colector sedimentable P9
06/02/2014	Frente mina calenturitas
08/02/2014	Conato frente CNR barrio sabana linda
18/02/2014	Vía y cruce Rincón Hondo
21/02/2014	Predio CNR cerca ZM3
25/02/2014	Finca Canori
16/03/2014	Predios CNR

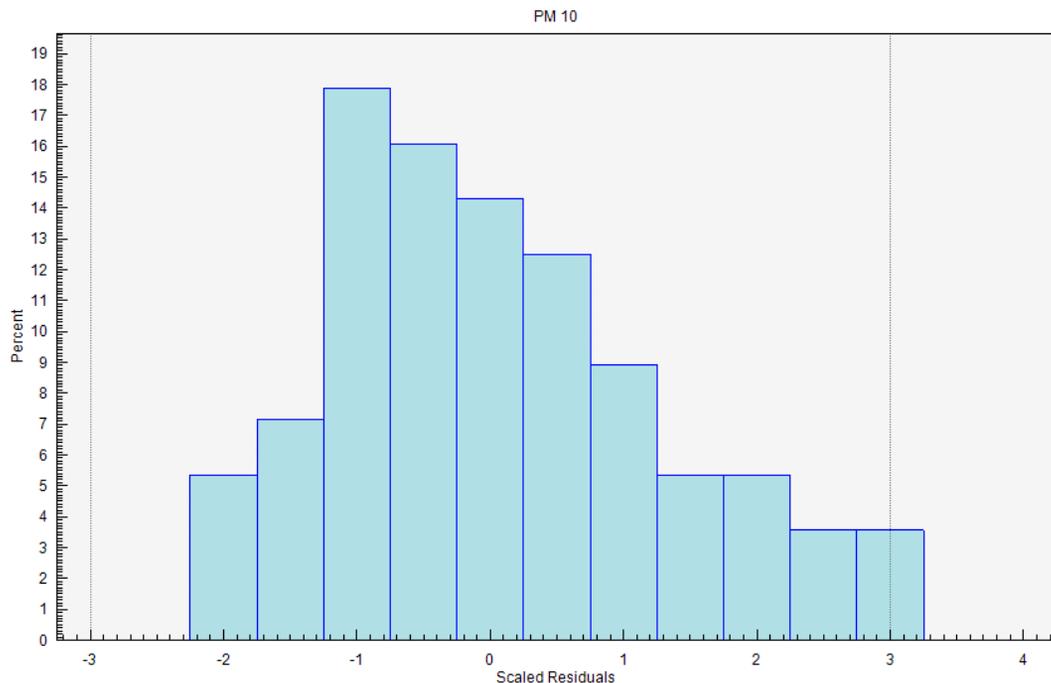
La *Fuente 2* representa el 16% de las emisiones de PM_{10} y está asociada al material mineral, que puede emitirse como polvo de las vías o por la actividad de extracción minera. Las vías de acceso a la zona donde se encuentra ubicada la estación ZM13 son vías sin pavimentar; adicionalmente, está el posible aporte de PM_{10} por el movimiento de tierra producto de la extracción de carbón que se transporta a largas distancias.

El Hatillo no cuenta con un sistema de recolección de residuos sólidos adecuado, ni relleno sanitario y es muy común la práctica de quemar de estos residuos en la zona. Esto se hace evidente en la contribución de estas fuentes al 26% de las concentraciones de PM_{10} , cuyo perfil químico corresponde a la *Fuente 3*.

La gráfica 24 presenta solo factores de contribución superiores a 0,05%. Para el caso de la *Fuente 4*, motos de bajo cilindraje, se observa que, de acuerdo con el modelo PMF, el aporte a las concentraciones de PM_{10} es mínimo y no representa una fuente a considerar. Por último, la *Fuente 5* correspondiente a vehículos pesados accionados por diésel, con un aporte del 12%. Esta fuente es atribuida principalmente al constante tráfico de vehículos para el desarrollo de actividades industriales en la zona.

La gráfica 25 muestra el análisis residual del modelo PMF aplicado para la predicción de PM, se observa que la concentración y distribución de PM_{10} es descrita de manera aceptable, teniendo en cuenta el comportamiento normal que tiene la distribución de los residuos y la desviación focalizada entre -3 y 3.

Gráfica 25. Análisis residual para el modelo receptor ajustando la especie PM10. Modelo PMF, estación ZM13.



6.4.2. Modelo UNMIX

Para el desarrollo de este modelo se realizaron las siguientes suposiciones:

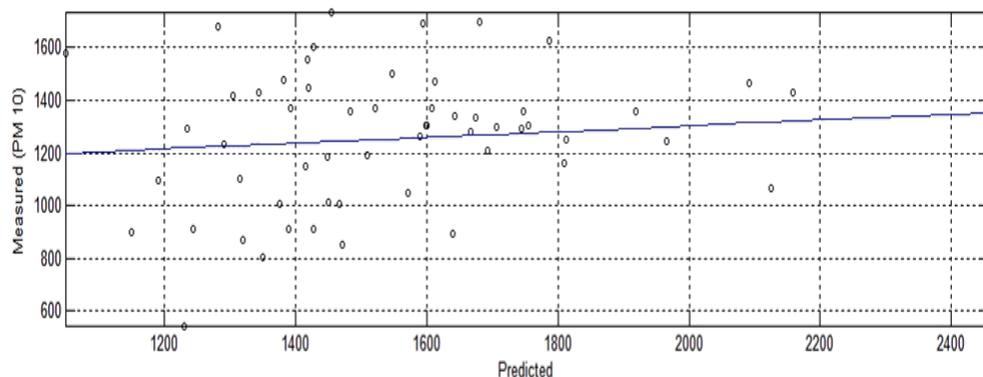
- Fueron vinculadas 19 especies analizadas con mayor porcentaje másico, tal como se describe en la Tabla 11, sin excluir datos por fuera con extremos altos.
- De manera similar a las suposiciones realizadas para el modelo PMF, se retiraron las observaciones de las fechas 02/11/14, 02/9/14 y 02/28/14, considerandos datos con desviaciones altas con relación de los puntos medios de las mediciones.
- Las especies fosfatos, potasio y sodio soluble fueron consideradas como especies no seleccionadas (*Unselected Species*), de la misma forma que las especies fueron consideradas como “weak” en el modelo PMF.
- Para garantizar un mejor ajuste del modelo a los datos observados, se establecieron cinco fuentes de emisión de material particulado.

6.4.2.1. Principales resultados respecto a PM₁₀. Para el caso de las aproximaciones usando el modelo UNMIX 6.0, no se evidencia un ajuste fuerte entre los datos predichos y observados para el PM₁₀. Sin embargo, el modelo general presenta un mínimo valor de correlación “R²” de 0.95, lo que permite afirmar que el modelo establecido describe el comportamiento de las diferentes especies analizadas con un 95% de confianza. Adicionalmente, la mínima relación señal a ruido para la corrida seleccionada fue de 1.64.

La gráfica 26 muestra la relación lineal entre estos valores. Se puede observar que los puntos encontrados son muy dispersos y la regresión lineal tiene un ajuste bajo.

UNMIX 6.0 sugiere el uso de 4 factores o fuentes de emisión. Sin embargo, se busca una solución con 5 factores que permita realizar un comparativo con el modelo PMF planteado. El uso de más factores disminuye la incertidumbre de los datos predichos por el modelo.

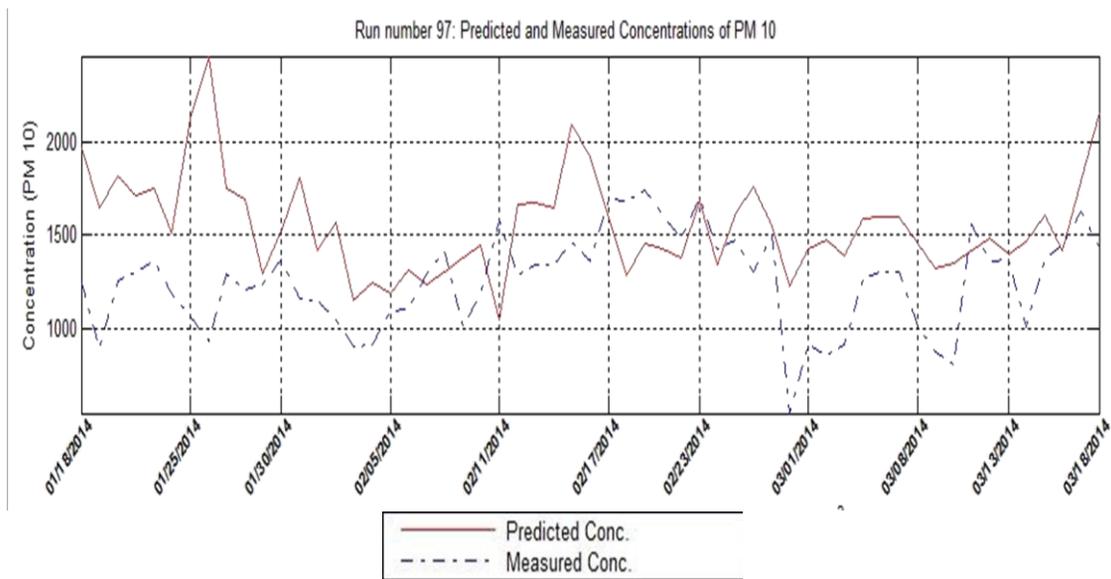
Gráfica 26. Valores observados versus predichos de PM 10, usando 5 factores. Modelo UNMIX, estación ZM13.



La serie de tiempo de los valores predichos y observados no presenta una correlación fuerte, tal como lo presenta la gráfica 27. Para el caso del PM₁₀, los valores extremos no son predichos con una incertidumbre bastante grande. Sin

embargo, cabe resaltar que el modelo utilizado se ajusta de manera satisfactoria para otras especies como lo son el amonio, los sulfatos, fosfatos y potasio, entre otros.

Gráfica 27. Relación de valores observados versus predichos respecto a la serie de tiempo de PM₁₀. Modelo UNMIX, estación ZM13.



De manera similar a lo visto para el modelo PMF, UNMIX realiza una aproximación de la composición de las posibles fuentes de emisión de PM₁₀.

Para este caso, la gráfica 28 presenta la distribución de las especies analizadas en las fuentes seleccionadas en una escala logarítmica.

La asignación de las especies a cada fuente usando UNMIX requiere un poco más de análisis, considerando el tipo de datos y las relaciones másicas de las especies, más aún en las aproximaciones a especies con porciones másicas pequeñas. Teniendo en cuenta lo anterior, se puede observar que la **Fuente 1** presenta la mayor concentración de Al, así como la mayor relación de entre este último y el Hierro (Fe) y el Titanio (Ti). Adicionalmente, la presencia de magnesio

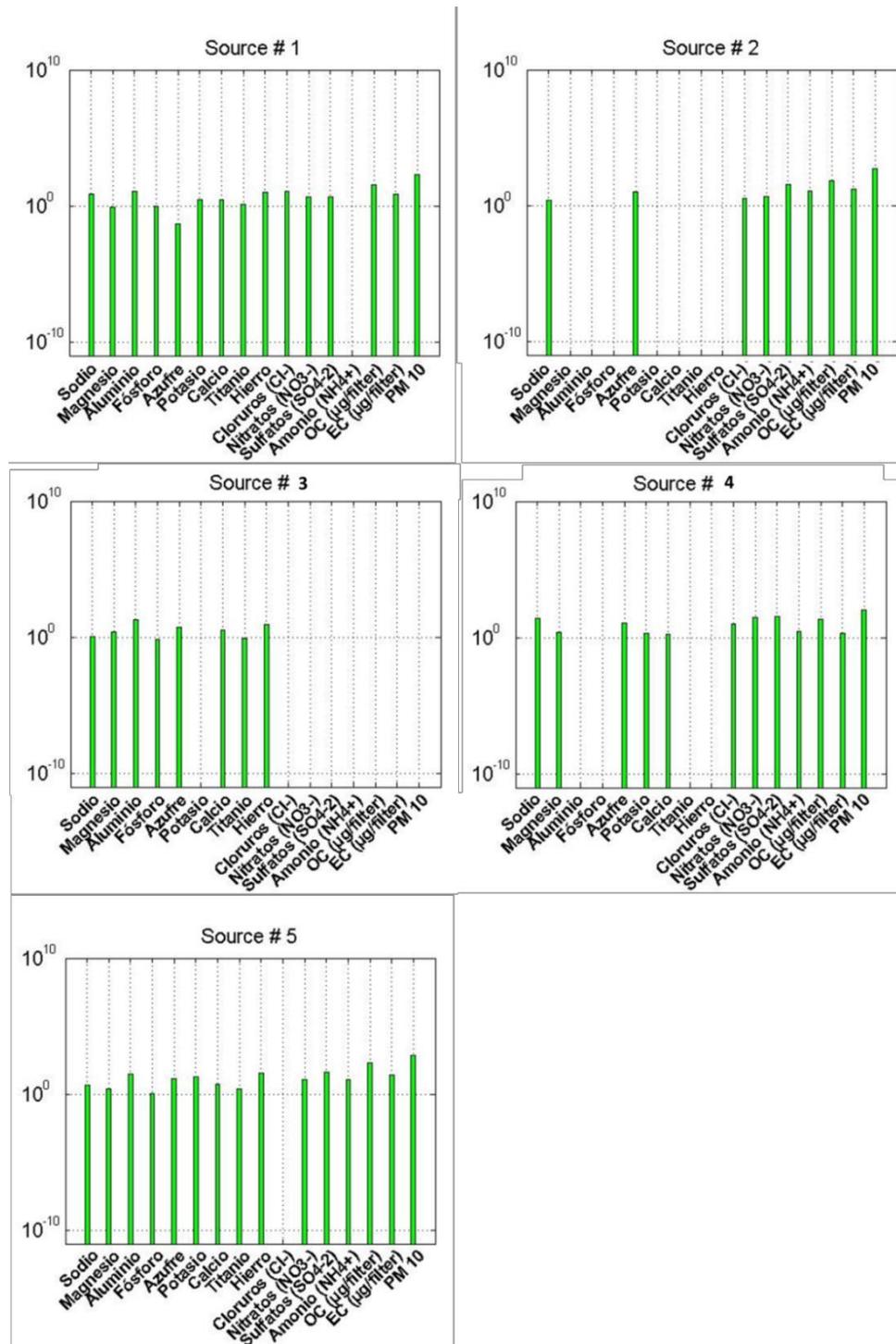
(Mg) permite concluir que la fuente de emisión puede ser atribuida al polvo de carretera y suelos.

La **Fuente 2** presenta presencia mayoritaria de OC, lo que representa la quema de material orgánico. Adicionalmente, se observa la presencia de Cl^- , SO_4^{-2} , los cuales son acompañados de la presencia de Na y K, lo que permite afirmar que la posible fuente de emisión es la quema de basuras y desechos (Bruinen de Bruin et al., 2006), de la misma forma que se observó para el modelo PMF.

En el caso de la tercera fuente, cabe resaltar la ausencia de PM_{10} como especie. Por tanto, se podría concluir que las relaciones másicas mostradas de las otras especies no forman parte de un aporte considerable a la corriente de PM_{10} , similar a lo sucedido con la Fuente 4 del modelo de PMF

Las **Fuentes 4 y 5** tienen distribuciones de las especies muy diferenciadas. Para el primer caso, se observa la presencia de OC y EC que han sido atribuidos a la presencia de emisiones causadas por automotores (Radaman et al, 2003). Adicionalmente, se encuentra la presencia de Na y S elementales, más SO_4^{-2} y NO_3^- , todos estos propios de la combustión del diésel. Por tanto esta fuente puede ser atribuida a vehículos pesados accionados con diésel.

Grafica 28. Perfiles de las fuentes de PM₁₀ de acuerdo a la distribución y aporte de cada especie analizada. Escala logarítmica, Modelo UNMIX, estación ZM13.



Por último, en el caso de la **Fuente 5**, se observa la distribución característica de emisiones causadas por combustibles, considerando la presencia de NH_4^+ y SO_4^{-2} . Adicional a estos, la presencia marcada de K elemental y soluble, permiten afirmar que la fuente de emisión corresponde al uso de biomasa como combustible (Polissar et al., 1998 y Bruinen de Bruin et al., 2006).

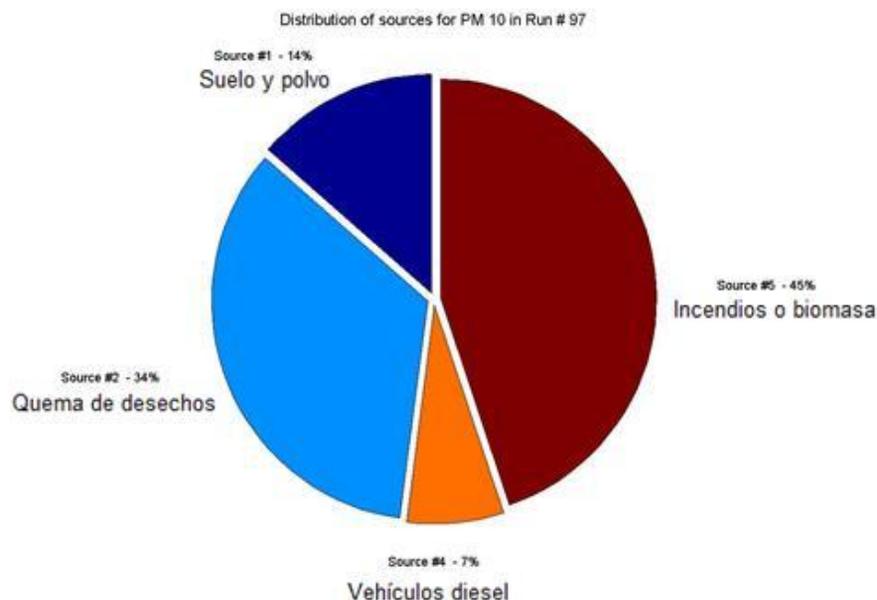
6.4.2.2. Aportes de las fuentes a la generación de PM_{10} según modelo UNMIX.

De manera similar a lo presentado para el modelo PMF, UNMIX realiza una aproximación del porcentaje de aporte de cada una de las fuentes a la corriente de PM_{10} analizada. La

, presenta el aporte de cada una de las fuentes a la emisión de PM_{10} , con la siguiente distribución:

- Fuente 1: Polvo del suelo y carreteras.
- Fuente 2: Quema de desechos y basuras.
- Fuente 4: Vehículos pesados, accionados con diésel.
- Fuente 5: Quema de biomasa o Uso de biomasa como combustible.

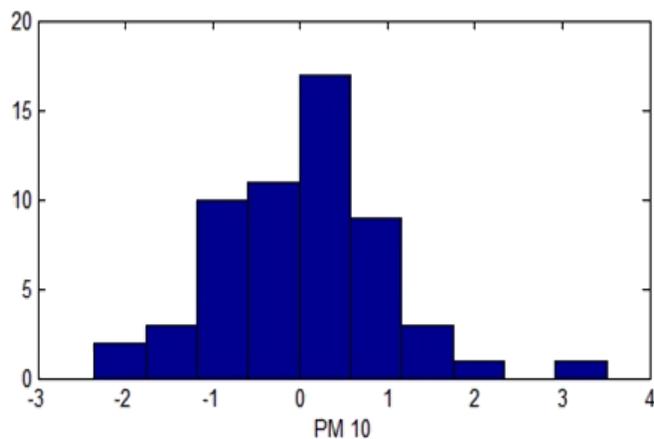
Gráfica 29. Distribución de los aportes de cada fuente a la emisión de PM_{10} en la zona de estudio. Modelo UNMIX, estación ZM13



El origen de las diferentes fuentes encontradas ya ha sido mencionado en la sección 6.4.1.2. De acuerdo con la gráfica anterior, se observa que el mayor aporte a la emisión de PM_{10} es el de la Fuente 5 o uso de biomasa como combustible o incendios forestales con un 45%. La segunda fuente con mayor aporte para este caso corresponde a las emisiones generadas por quema de desechos y basuras con un aporte del 34%, seguido de las emisiones causadas por polvo de carretera y suelo con un porcentaje de 14%. Por último, la fuente con menor aporte de acuerdo con el modelo UNMIX corresponde al tránsito de vehículos pesados accionados con diésel con un valor de 7%.

La gráfica 30 muestra la distribución residual de la corrida seleccionada para el análisis del modelo UNMIX, se encuentra que cuenta con una distribución adecuada y normalizada entre el intervalo de -2 a 2 con un extremo en la parte superior similar a lo encontrado con el análisis residual del modelo PMF.

Gráfica 30. Análisis residual para el modelo receptor ajustando la especie PM_{10} . Modelo UNMIX, estación ZM13.



6.4.3. Comparativo de los resultados obtenidos utilizando los modelos PMF y UNMIX.

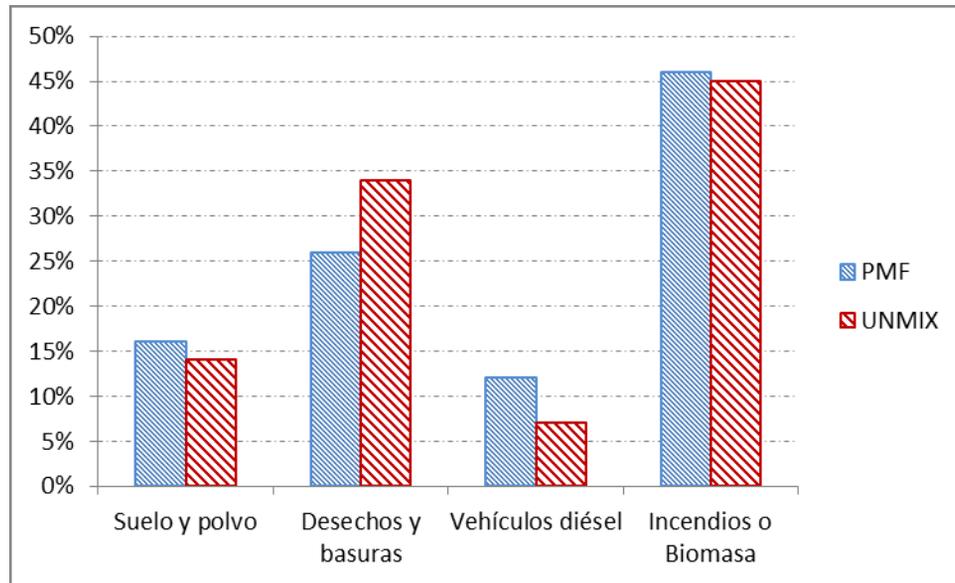
Los modelos de receptor-fuente utilizan procedimientos estadísticos para identificar y cuantificar las fuentes de contaminación en una localización receptora. En este trabajo de aplicación se han utilizado los modelos PMF y UNMIX porque no requieren un conocimiento previo del perfil de cada fuente, precisando sólo datos de medidas ambientales y conocimiento de trazadores de fuente para interpretar los factores. Es de resaltar que los modelos receptores de este tipo pueden presentar diferentes soluciones incluso bajo la misma corrida y puntos de partida, por lo que no es posible encontrar una única solución válida para este tipo de modelación. La gráfica 31 presenta un comparativo entre los aportes de las diferentes fuentes a la emisión de material particulado de acuerdo a lo predicho por el modelo PMF y UNMIX.

Las distribuciones encontradas de los aportes de las diferentes fuentes de emisión de PM_{10} , contemplan para los dos modelos receptores (PMF y UNMIX), cuatro fuentes fundamentales, que aunque la distribución difiere entre el uno y el otro, corresponde a las fuentes que se pueden identificar en el área de interés de la estación ZM13. La quema de biomasa o el uso de esta como combustible representan la fuente con mayor aporte de emisiones de PM_{10} , tanto para el modelo PMF y UNMIX, con porcentajes muy similares, 46% y 45% respectivamente.

Sin embargo, los dos modelos difieren más ampliamente en el porcentaje en la segunda fuente con mayor aporte de emisiones (quema de desechos y basuras), con porcentajes de 26% y 34% para el modelo PMF y UNMIX, respectivamente. Para el caso de las emisiones causadas por el polvo de carretera y suelo, se observan nuevamente porcentajes similares, 16% y 14% para los modelos PMF y UNMIX respectivamente. Cabe recordar que el modelo PMF presentó un mejor ajuste de los datos predichos para PM_{10} que el modelo UNMIX y que para ambos

casos con la composición de las fuentes de emisión es posible determinar las actividades aportantes de PM_{10} a la zona de estudio.

Gráfica 31. Comparativo de la contribución de las fuentes a la emisión de PM_{10} determinado por el modelo PMF y UNMIX



7. PROPUESTA PARA REDUCIR LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN EL ÁREA DE INFLUENCIA DE LA ESTACIÓN EL HATILLO

Con base en el programa de reducción de la contaminación del aire en la zona carbonífera del Cesar, resolución 2176 de 2007²⁰, los requerimientos ambientales de la Agencia Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) a las diferentes empresas mineras presentes en la zona y con la experiencia de varios años del equipo consultor de la empresa K2 Ingeniería en operación de sistemas de vigilancia de calidad del aire, se presenta a continuación una propuesta consolidada de mejoramiento de la calidad del aire en el área de influencia de la estación El Hatillo para que se estudie la posibilidad de implementar las estrategias contempladas a continuación por los diferentes actores que hacen parte de la problemática y de la solución:

1. Teniendo en cuenta que los incendios forestales se presentan principalmente en época seca, entre los meses de enero y marzo, se propone el apoyo logístico de las empresas mineras y palmeras del sector para que la alcaldía de los municipios del Paso y La Jagua cuenten con mínimo un vehículo de emergencia (carro de bomberos) para apagar incendios y un grupo de personas encargadas de vigilar permanentemente la zona para controlar oportunamente los incendios en su fase inicial. Es importante considerar el adecuado almacenamiento de agua durante todo el año para tener disponibilidad del líquido en los 3 meses más secos del año cuando se presentan el 90% de incendios forestales en la zona.

²⁰ Actualmente vigente y expedida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible para las áreas fuentes de contaminación media y moderada clasificadas en la zona de explotación minera de carbón del centro del Departamento del Cesar.

Tabla 13. Propuesta de control para incendios forestales

Fuente de contaminación	Propuesta de control	Responsables
Incendios forestales	Compra y disponibilidad de un carro de bomberos. Equipo de vigilancia permanente entre enero y marzo para controlar los incendios en su fase inicial (conato de incendio)	Alcaldías del Paso y La Jagua. Gobernación del Cesar. Empresas Mineras y Palmeras.

2. Diferentes evidencias del SVCA_ZCC operado por Corpocesar y visitas a la zona de estudio han mostrado que la quema de residuos sólidos se ha constituido como una práctica normal en el centro del departamento sin reconocer la importancia que este inadecuado habito cultural influya de forma negativa en la calidad del aire y en la salud de la población en especial en niños y adultos mayores.

Ilustración 10. Quemadas de residuos sólidos en diferentes puntos de la zona de estudio.





En este orden de ideas, la propuesta de control es evidente y requiere la participación activa de la Gobernación y alcaldías locales para garantizar la recolección oportuna de basuras y su disposición final de forma adecuada.

Tabla 14. Propuesta de control para quemas de residuos sólidos.

Fuente de contaminación	Propuesta de control	Responsables
Quemas de residuos sólidos	Compra y disponibilidad permanente de un camión recolector de basuras. Recolección oportuna de los residuos sólidos. Creación de un relleno sanitario que cumpla con todos los requerimientos ambientales.	Alcaldías del Paso y La Jagua. Gobernación del Cesar. Corpocesar.

3. Las actividades industriales presentes en la estación ZM13 El Hatillo y en general en la zona centro del Cesar, como las empresas mineras y extractoras de palma generan dentro de sus diferentes procesos contaminación atmosférica por material particulado principalmente por el transporte en vías destapadas. De esta forma, las autoridades ambientales (ANLA y Corpocesar) han impulsado procesos de vigilancia y control que han dado buenos resultados pero se requiere que sean complementados con las propuestas de la tabla 15.

Ilustración 11. Emisiones de MP en vías externas e internas.



Tabla 15. Propuesta de control para mitigar el impacto por levantamiento de MP causado por actividades industriales.

Fuente de contaminación	Propuesta de control	Responsables
Levantamiento de material particulado causado por actividades mineras.	<p>Impedir el ingreso de vehículos de propiedad de las empresas mineras (camionetas y buses) al interior de los centros poblados. Crear un parqueadero externo en cada población para este tipo de vehículos.</p> <p>Diseño e implementación del SVCA en tiempo real al interior de los proyectos mineros que cuantifiquen de forma oportuna los impactos sobre la calidad del aire y evalúen las medidas de control implementadas al interior de dichas empresas.</p> <p>Evaluar la efectividad del riego aplicado en vías internas, con base en la información suministrada por el SVCA interno de cada proyecto minero y en caso de ineficiencia de riego, plantear alternativas como el cambio del material de rodadura, utilización de supresores químicos y el diseño e implementación de un plan de riego adecuado.</p> <p>Realizar una evaluación respecto del comportamiento de la velocidad y dirección del viento en la zona para seleccionar las horas del día más favorables para realizar las voladuras.</p>	Empresas mineras ANLA

Levantamiento de material particulado causado por utilización de vías despavimentadas.	Riego frecuente en la vía despavimentada La Loma – El Hatillo. Continuar con la aplicación de residuos de biomasa sobre la misma vía, adecuando un espacio para la circulación exclusiva de las motos para evitar accidentes. Pavimentación de la vía La Loma – El Hatillo.	Palmagro S.A. Alcaldías del Paso y La Jagua. Gobernación del Cesar.
--	---	---

4. Con respecto a la emisión proveniente de la fuente de combustión de la empresa productora de aceite de palma, Corpocesar debe incrementar las visitas de seguimiento y de auditoria a los monitoreos de emisión a la fuente de combustión externa y exigir en el corto plazo la implementación de un sistema de control adecuado que evite la descarga de contaminantes al aire.

Ilustración 12. Emisión proveniente de una fuente fija cercana al corregimiento El Hatillo.



Tabla 16. Propuesta de control para la fuente de combustión externa de Palmagro S.A.

Fuente de contaminación	Propuesta de control	Responsables
Caldera	Diseño e instalación de un sistema de control de material particulado, dióxido de nitrógeno y óxidos de azufre, en cumplimiento de la Resolución 909 de 2008 ²¹ .	Palmagro S.A. Corpocesar.

²¹ Expedida el 5 de junio de 2008 por el entonces Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (hoy MADS), por la cual se establecen las normas y estándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas y se dictan otras disposiciones.

8. CONCLUSIONES

En la zona de influencia de la estación de monitoreo de calidad del aire el Hatillo ZM13 se desarrollan actividades industriales como la extracción de carbón y obtención de aceite de palma, actividades que pueden ser identificadas como fuentes de emisión de material particulado PM_{10} . Adicionalmente a las anteriores fuentes industriales, es evidente la ausencia de la infraestructura adecuada para el control de desechos sólidos, lo cual fomenta quemas a cielo abierto de este tipo de residuos, las vías de acceso a la zona no cuentan con pavimentación que facilitan el levantamiento de material particulado por el paso frecuente de vehículos y por último la presencia de incendios forestales principalmente entre enero y marzo (meses más secos del año) agudizan la problemática de calidad del aire de la zona de estudio.

Corpocesar por medio del SEVCA_ZCC desde el año 2009 ha vigilado el cumplimiento normativo del material particulado respirable (PM_{10}), ha estudiado el comportamiento variable de los parámetros meteorológicos y también ha realizado conteos vehiculares, en donde se logró hacer una relación entre la concentración de material particulado en la zona, la cantidad de vehículos y la actividad industrial, determinando que el material particulado disminuye alrededor de un 20% los domingos, días en los cuales la cantidad de vehículos pesados que utilizan diésel como combustible y la actividad industrial disminuyen en la zona. Sin embargo, con el objetivo de identificar el aporte específico de las fuentes a la contaminación atmosférica y proponer medidas de control más eficientes se utilizaron técnicas como los modelos receptores los cuales permitieron analizar estadísticamente los diferentes datos de la concentración de las especies recolectadas entre enero y marzo de 2014 y fue posible aproximar los diferentes aportes de las fuentes de emisión a la concentración de PM_{10} . Los dos modelos utilizados PMF y UNMIX muestran como principal fuente la quema de biomasa y el uso de esta como combustible y la contribución del polvo de carretera, emisiones provenientes de vehículos pesados y quema de basuras. La distribución de las

fuentes de emisión para los modelos utilizados fueron: En el caso del PMF, uso de biomasa como combustible e incendios forestales = 46%, Quema de desechos y basuras = 26%, Polvo del suelo = 16% y Vehículos pesados, accionados con diésel = 12%. Mientras que para UNMIX fueron: Quema de biomasa y uso de biomasa como combustible = 45%, Quema de desechos y basuras = 34%, Polvo del suelo y carreteras = 14%, Vehículos pesados, accionados con diésel = 7%.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos con la aplicación de los dos modelos receptor, se puede afirmar que el modelo PMF obtuvo como resultado un mejor ajuste de los datos predichos versus los datos observados, y por tanto cuenta con una mejor distribución de las fuentes de emisión que el modelo UNMIX.

Desde el punto de vista del análisis químico, los análisis de metales solubles en agua muestran la presencia mayoritaria de nueve especies entre ellas, Aluminio, Azufre, Hierro, Sodio, Titanio, Magnesio, Potasio, Calcio y Fósforo. Para el caso del análisis de aniones y cationes, se encontró que la mayor cantidad de estos compuestos es aportada por los sulfatos y en menor presencia se encuentran los fosfatos. El análisis de PAHs muestra la presencia mayoritaria de indeno(1,2,3-cd)pireno y el benzo(g,h)perileno respecto al total de la masa de PAH determinada. La reconstrucción másica realizada permite concluir que un porcentaje de 13,7% de la masa total no fue posible cuantificarla mediante análisis químico.

Con la cuantificación del aporte individual de las fuentes identificadas, se proponen medidas de control específicas encaminadas a una mayor efectividad en el control de la contaminación atmosférica por parte de los diferentes actores involucrados, en donde se resalta para las empresas mineras el diseño e implementación del SVCA en tiempo real al interior de los proyectos mineros, la

creación de un parqueadero externo en cada población para impedir el ingreso de vehículos de propiedad de las empresas mineras (camionetas y buses) al interior de los centros poblados, el diseño e implementación de un plan de riego adecuado, plantear alternativas como el cambio del material de rodadura y utilización de supresores químicos y la evaluación respecto del comportamiento de la velocidad y dirección del viento en la zona para seleccionar las horas del día más favorables para realizar las voladuras. La empresa extractora de palma presente en la zona debe en principio diseñar e instalar un sistema de control de material particulado, dióxido de nitrógeno y óxidos de azufre, en cumplimiento de la Resolución 909 de 2008, adicionalmente como principal usuario de la vía despavimentada La Loma – El Hatillo debe continuar con la aplicación de residuos de biomasa sobre la misma vía, adecuando un espacio para la circulación exclusiva de las motos para evitar accidentes. Con respecto a las principales actividades de la Gobernación del Cesar y las alcaldías del Paso y la Jagua se propone la compra y disponibilidad permanente de un camión recolector de basuras para la recolección oportuna de los residuos sólidos, evitando la quema de este tipo de desechos y a largo plazo la creación de un relleno sanitario que cumpla con todos los requerimientos ambientales. Adicionalmente, las Autoridades locales en conjunto con las empresas instaladas en la zona de estudio deben aunar esfuerzos en los meses más secos del año para contar con un equipo de vigilancia para controlar los incendios en su fase inicial (conato de incendio) y la disponibilidad de un carro de bomberos para atender oportunamente este tipo de eventos que se registran en el centro del departamento del Cesar. Finalmente, Corpocesar debe intensificar el seguimiento a las empresas diferentes a los proyectos mineros y continuar con la operación del SEVCA_ZCC como herramienta para la toma de decisiones y evaluación de las medidas de control que se proponen ejecutar en el presente proyecto de aplicación de maestría.

9. RECOMENDACIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos con los dos modelos receptor utilizados (PMF y UNMIX) y con el objeto de disminuir la incertidumbre en los resultados se recomienda el análisis de las fuentes de emisión in situ, de tal forma que se pueda conocer el perfil químico de cada una de las fuentes mediante análisis químico e implementar modelos receptores con balance químico de masa (CMB). Con la información anterior será posible diferenciar el aporte de los incendios forestales presentados y del uso de biomasa como combustible, considerando que estas corrientes representan el mayor aportante a la emisión de material particulado en la zona de acuerdo a los modelos empleados para el presente proyecto. Adicionalmente, se recomienda profundizar para un futuro estudio en el análisis de la contribución de fuentes usando los compuestos orgánicos como trazadores de fuentes específicas. Aunque se hayan encontrado bajas concentración de los PAH estos se podrían utilizar para lograr diferenciar el aporte entre incendios forestales y el uso de biomasa como combustible en la zona minera del Cesar.

Considerando la importancia que representa la reconstrucción másica en el análisis de las fuentes de emisión, se recomienda analizar la composición del porcentaje másico no cuantificado mediante análisis químico.

Se recomienda repetir este tipo de estudios en dos estaciones de forma simultánea (una de ellas influenciada directamente por la actividad minera) para afianzar las conclusiones obtenidas en el presente estudio, en donde se vincule en adelante a la academia de la zona (Universidad Popular del Cesar UPC) para que lideren este tipo de proyectos.

Finalmente, se sugiere hacer un estudio similar al del presente proyecto en espacios interiores de las viviendas en las poblaciones más afectadas, para identificar otras posibles fuentes como cocinas de leña, mascotas o crianza de animales, piso de tierra, etc.

BIBLIOGRAFIA

1. Abu-Allaban, Gertler & Lowenthal. 2002. A preliminary apportionment of the sources of ambient PM₁₀, PM_{2.5}, and VOCs in Cairo. *Atmospheric Environment*, 36(35): 5549-5557.
2. Behrentz E., Sánchez N., Rivera J. 2009. Parte 1: Caracterización de Material Particulado y Modelos Receptores. Elementos técnicos del plan decenal de descontaminación de Bogotá. Secretaría Distrital de Ambiente, Bogotá, D.C., Colombia.
3. Bruinen de Bruin, Koistinen, Yli-Tuomi, Kephelopoulos, & Jantunen, M. 2006. A review of: source apportionment techniques and marker substances available for identification of personal exposure, indoor and outdoor sources of chemicals. JRC—European Commission, p. 54.
4. Buset, Evans, Richard, Brook & Toom-Sauntry. 2006 Use of advanced receptor modelling for analysis of an intensive 5-week aerosol sampling campaign. *Atmospheric Environment*, 40 (Suppl. 2): S482-S499.
5. Buzcu, B.; Fraser, M.P.; Kulkarni, P.; Chellam, S. Source Identification and Apportionment of Fine Particulate Matter in Houston, TX, Using Positive Matrix Factorization; *Environ. Eng. Sci.* 2003, 20, 533-545.
6. Chan & Mozurkewich. 2006. Application of absolute principal component analysis to size distribution data: identification of particle origins. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 6, 10493–10522.

7. Charron & Harrison. Fine (PM_{2.5}) and coarse (PM_{2.5-10}) particulate matter on a heavily tracked london highway: sources and processes. 2005. *Environmental Science and Technology*, 39(20): 7768-7776.
8. Cheng, Z.L., Lam, K.S., Cham, L.Y. Wang, T., Cheng, K.K., 2000. Chemical characteristics of aerosols at coastal station in Hong Kong. I. Seasonal variation of major ions, halogens and mineral dusts between 1995 and 1996. *Atmospheric Environment*, 34, 2771-2783.
9. Chow Judith C. Measurement Methods to Determine Compliance with Ambient Air Quality Standards for Suspended Particles. *J. Air & Waste Manage. Assoc.* 1995, . 45: 320-382.
10. Chow, J. 1995. Measurement methods to determine compliance with ambient air quality standards for suspended particles. *Air & Waste Management Association*, 45: 320-382.
11. EPA Positive Matrix Factorization (PMF) 5.0 Fundamentals and User Guide. U.S. Environmental Protection Agency, 2014.
12. Hamad S, Schauer J, Heo J, Kadhimd A. 2015. Source apportionment of PM_{2.5} carbonaceous aerosol in Baghdad, Iraq. *Atmospheric Research*. 156 (2015) 80–90.
13. Henry, R.C. Duality in multivariate receptor models. 2005. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 77 (1-2):59.
14. Hernández A.J. Análisis de la variación espacial de los componentes del material particulado respirable en la zona carbonífera del departamento del cesar. 2012, Trabajo de Aplicación. Universidad Industrial de Santander.

15. Hopke, Lamb, & Natush. 1980. Multielemental characterization of urban roadway dust. *Environmental Science and Technology*, 14 (2): 164-172.
16. Kim, E.; Hopke, P.K. Source Apportionment of Fine Particles in Washington D.C., Utilizing Temperature-Resolved Carbon Fractions; *J. Air & Waste Manage. Assoc.* 2004, 54, 773-785.
17. Kim, E.; Hopke, P.K.; Kenski, D.M.; Koerber, M. Sources of Fine Particles in a Rural Midwestern U.S. Area; *Environ. Sci. Technol.* 2005, 39, 4953-4960.
18. Kim, E.; Hopke, P.K.; Qin, Y. Estimation of Organic Carbon Blank Values and Error Structures of the Speciation Trends Network Data for Source Apportionment; *J. Air & Waste Manage. Assoc.* 2005, 55, 1190- 1199.
19. Lee, Brook, Dabek-Zlotorzynska & Mabury. 2003 Identification of the major sources contributing to PM_{2.5} observed in Toronto. *Environmental Science and Technology*, 37(21): 4831-4840.
20. Liu, W.; Hopke, P.K.; Han, Y.-J.; Yi, S.-M.; Holsen, T.M.; Cybart, S.; Kozlowski, K.; Milligan, M. Application of Receptor Modeling to Atmospheric Constituents at Potsdam and Stockton, NY; *Atmos. Environ.* 2003, 37, 4997-5007.
21. Lonati, Giugliano, Butelli, Romele & Tardivo. 2005. Major chemical components of PM_{2.5} in Milan (Italy). *Atmospheric Environment*, 39(10): 1925-1934.
22. Mason, B. 1960. *Principles of Geochemistry*. Second Edition. London. John Wiley & Sons Inc.

23. Polissar, A.V.; Hopke, P.K.; Paatero, P.; Malm, W.C.; Sisler, J.F. Atmospheric Aerosol over Alaska 2. Elemental Composition and Sources; J. Geophys. Res. 1998, 103, 19045-19057.
24. Querol, Alastuey, Rodríguez, Plana, Ruiz, Cots, Massague Puig. 2001. PM10 and PM2.5 source apportionment in the Barcelona Metropolitan area, Catalonia, Spain. Atmospheric Environment, 35(36): 6407-6419.
25. Ramadan, Eickhout, Xin-Hua, Buydens & Hopke. 2003. Comparison of Positive Matrix Factorization and Multilinear Engine for the source apportionment of particulate pollutants. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 66:15- 28.
26. Seigneur, Pai, Louis, Hopke & Grosjean. 1997. Review of air quality models for particulate matter. American Petroleum Association.
27. Shafer, M.M., Perkins, D.A., Antkiewicz, D.S., Stone, E.A., Quraishi, T.A., Schauer, J.J., 2010. Reactive oxygen species activity and chemical speciation of size-fractionated atmospheric particulate matter from Lahore, Pakistan: an important role for transition metals. J. Environ. Monit. 12, 704–715.
28. Vargas, F., Rojas, N., Pachón, J., Russell, A., 2012. PM₁₀ characterization and source apportionment at two residential areas in Bogota. Atmospheric Pollution Research, 3, 72-80.
29. Villalobos A.M, Barraza F., Jorquera H., Schauer J.J. Chemical speciation and source apportionment of fine particulate matter in Santiago, Chile, 2013. Science of the Total Environment 512–513 (2015) 133–142.

30. Zhao, W.; Hopke, P.K. Source Apportionment for Ambient Particles in the San Geronio Wilderness; *Atmos. Environ.* 2004, 38, 5901-5910.