

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS



**ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS DE
MATERIAL PARTICULADO PM10 EMPLEANDO MODELOS RECEPTORES EN LA
ZONA ATMOSFÉRICA DE LA UNIVERSIDAD DE LA COSTA C.U.C.**

SEBASTIÁN RENE RUGELES AHUMADA.

ANDRÉS SEBASTIÁN SILVA TIBABIJA

UNIVERSIDAD DE LA COSTA CUC

Departamento Civil y Ambiental

Programa de Ingeniería Ambiental

Barranquilla, Colombia

2017

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

**ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS DE
MATERIAL PARTICULADO PM10 EMPLEANDO MODELOS RECEPTORES EN LA
ZONA ATMOSFÉRICA DE LA UNIVERSIDAD DE LA COSTA C.U.C.**

Para obtener el título de Ingeniero Ambiental

Grupo de investigación:

Gestión y Sostenibilidad Ambiental GESSA

Línea de investigación:

Control de la Contaminación

TESISTAS:

Sebastián Rene Rugeles Ahumada.

Andrés Sebastián Silva Tibabija

Director de trabajo de grado

MSc. Leandro Gómez Plata

Codirectora de trabajo de grado

PhD. Dayana Agudelo Castañeda

UNIVERSIDAD DE LA COSTA CUC

Departamento Civil y Ambiental

Programa de Ingeniería Ambiental

Barranquilla, Colombia

2017

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

Nota de Aceptación

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Barranquilla, Atlántico, 4 de septiembre del 2017

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

Dedicatoria

A Dios, Gracias le doy por haberme permitido lograr alcanzar mis objetivos propuestos durante el inicio de mi trabajo de investigación, por toda la perseverancia, paciencia que me dio para culminar con éxito, por iluminarme y llenarme de sabiduría, para esta etapa de mi vida, además de su infinita bondad y amor.

A Mis Padres, A Ruth María Ahumada Jiménez y Álvaro Hernán Rugeles González, personas que quiero y aprecio mucho, por haberme apoyado en todo momento sin falta alguna en esta etapa tan importante de mi vida, en mi formación como Ingeniero Ambiental, por ser mis guías día y noche, mis modelos a seguir, por todos los consejos que nunca estuvieron de más.

A Mi Abuela, Ruth Jiménez de la Rosa, quien para mí nunca dejara de ser como una madre, que siempre ha estado conmigo en las buenas y en las malas, apoyándome durante todo este proceso y toda mi vida.

A Mi Compañero y Amigo, Andrés Sebastián Silva Tibabija, por la paciencia y tolerancia que tuvo durante este largo proceso, y por sus consejos y apoyo en los momentos de estrés durante toda esta etapa.

A Mi Tutor y amigo Leandro Gómez Plata por su acompañamiento, asesoría, consejos, por compartir muchos de sus conocimientos en este proceso de formación, por tener la paciencia que muy pocos docentes tienen, al momento de confiar y trabajar en la elaboración de este trabajo investigativo.

Sebastián Rugeles Ahumada.

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

Dedicatoria

A Dios por ser mi guía, mi fortaleza y el que guio mi camino a lo largo de este trabajo
A mis padres Carmen Jazmín Tibabija y Hernando Silva Castro por su apoyo durante esta etapa académica a pesar de las dificultades.

A mi abuela Alejandrina Tibabija por siempre cuidarme y estar conmigo en cada etapa de mi formación.

A mi compañero y amigo Sebastián Rugeles por su incondicional apoyo y por la paciencia que me tuvo durante todo este proceso.

A mi tutor Leandro Gómez, por su acompañamiento, asesoría, consejos, por compartir sus conocimientos durante este proceso de formación y por tener la paciencia que muy pocos profesores tienen durante el tiempo que se desarrolló este trabajo de grado.

Andrés Silva Tibabija.

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

Agradecimientos

Nuestro más profundo y sincero agradecimiento a todas aquellas personas que con su ayuda colaboraron de alguna manera en la realización de este proyecto, en especial a nuestro docente MSc. Leandro Gómez Plata, director de esta investigación, por la orientación, el seguimiento y la supervisión continua de la misma, pero sobre todo por la motivación y el apoyo recibido a lo largo de estos meses, de igual manera, un reconocimiento merece el interés mostrado por el trabajo y las sugerencias recibidas de la PhD. Dayana Agudelo Castañeda, quien con sus aportes de conocimiento, nos ayudó a culminar satisfactoriamente la investigación planteada.

A la Universidad de la Costa C.U.C por brindarnos toda la infraestructura, equipos y material educativo justo y necesario para el desarrollo de este proyecto. Al Centro de Investigaciones Ambientales (CITA), por la prestación de su laboratorio cuando se era necesario y la implementación de los equipos que se requirió para la ejecución del proyecto. A las auxiliares de laboratorio Erika Arbeláez y Ana Belén Villalobos, que incondicionalmente tuvieron una gran disposición y apoyo para gran parte la ejecución de este proyecto.

Gratitud a quienes fueron nuestros docentes, compañeros, y auxiliares, Ciencias Básica - Departamento Civil y Ambiental – Programa de Ingeniería Ambiental.

Muchas gracias.

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

Resumen

En la presente investigación se evaluó el aporte de las diferentes fuentes de material particulado mediante una etapa de muestreo de 4 meses, una etapa de caracterización química de los filtros empleados para captar el material particulado y el empleo de modelación para la determinación del aporte de fuentes de emisión de material particulado y de esta manera poder realizar su reconstrucción másica en el área geográfica de la Universidad de la Costa (C.U.C.). Las mediciones de material particulado PM_{10} se realizaron durante los meses de abril, mayo, junio y julio, correspondientes a época seca, con periodicidad de muestreo de tres días y espacios de medición de 24 horas continuas, en la Universidad de la Costa en Barranquilla. La concentración de PM_{10} se determinó gravimétricamente, logrando expresar la concentración en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, obteniendo una concentración promedio de $63.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. De acuerdo con los resultados obtenidos para la caracterización de las especies químicas en el PM_{10} , se cuantificaron por el método de fluorescencia de rayos x, especies más comunes en el material particulado como sodio (Na), cloro (Cl), aluminio (Al), azufre (S), magnesio (Mg), calcio (Ca), potasio (K), hierro (Fe), manganeso (Mn), fósforo (P), cobre (Cu) y zinc (Zn), mientras que la presencia de carbono orgánico y carbono elemental se detectó por la técnica de análisis termo gravimétrico. Para la última etapa, se emplearon los modelos receptores balance químico de masa (CMB) y factorización de matriz positiva (PMF), con el propósito de estimar las contribuciones a de las fuentes emisoras de PM_{10} . Fueron asociadas las fuentes emisiones de parque automotor con un 36% de contribución, seguido por la combustión de aceite residual con un 28% de contribución, después a las fuentes de aerosol marino y polvo urbano con un 17%, y por último con menor dominancia la fuente de hornos industriales con 2% de contribución para CMB. Para el modelo PMF se identificaron fuentes tales como la quema de biomasa con un 36,2% de contribución, seguido por la re-suspensión de suelo, actividades de construcción y demolición con un 24,9% de

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

contribución, luego el aerosol marino con un 20,0% de contribución, después la combustión incompleta de las industrias con un 16,6% de contribución y por último el parque automotor con un 2,2% de contribución. Logrando así, determinar cada aporte del material particulado que rodean la zona atmosférica de la Universidad de la Costa (C.U.C.) y generando el primer diagnóstico del contaminante PM_{10} al que están expuestas las personas que transitan por esa zona.

Palabras clave: Material particulado, PM_{10} , modelación, modelo receptor

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

Abstract

In the present investigation, the contribution of the different sources of particulate material was evaluated by means of a sampling step of 4 months, a stage of chemical characterization of the filters used to capture the particulate material and the use of modeling to determine the contribution of sources Of emission of particulate material and in this way to be able to carry out its mass reconstruction in the geographical area of the University of the Coast (CUC). Measurements of PM₁₀ particulate material were carried out during the months of April, May, June and July, corresponding to the dry season, with sampling period of three days and measurement spaces of 24 continuous hours, at the University of the Coast in Barranquilla. The concentration of PM₁₀ was determined gravimetrically, being able to express the concentration in $\mu\text{g} / \text{m}^3$, obtaining an average concentration of $63.1 \mu\text{g} / \text{m}^3$. According to the results obtained for the characterization of the chemical species in the PM₁₀, x-ray fluorescence, the most common species in the particulate material such as sodium (Na), chlorine (Cl), aluminum (Al) (Mn), magnesium (Mg), calcium (Ca), potassium (K), iron (Fe), manganese (Mn), phosphorus (P), copper (Cu) and zinc (Zn) Of organic carbon and elemental carbon was detected by the thermal gravimetric analysis technique. For the last stage, the chemical mass balance (CMB) and positive matrix factorization (PMF) models were used, in order to estimate the contributions to PM₁₀ emitting sources. The sources of automobile fleet emissions were associated with a contribution of 36%, followed by the combustion of residual oil with a contribution of 28%, followed by sources of marine aerosol and urban dust with 17%, and lastly with less dominance the source of industrial furnaces with 2% contribution to CMB. For the PMF model, sources such as biomass burning with a contribution of 36.2% were identified, followed by re-suspension of soil, construction and demolition activities with a 24.9% contribution, then the marine aerosol with A 20.0% contribution, then the incomplete combustion of industries with a contribution of

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

16.6% and finally the automotive fleet with a contribution of 2.2%. Thus, to determine each contribution of the particulate material that surround the atmospheric zone of the University of the Coast (C.U.C.) and generating the first diagnosis of the pollutant PM10 to which the people that transit through that zone are exposed.

Keywords: Particulate matter, PM10, modeling, receiver model.

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

Contenido

Lista de tablas y figuras

1. Introducción	17
2. Planteamiento y justificación del problema	19
3. Objetivos	22
3.1 Objetivo general	22
3.2 Objetivos específicos	22
4. Estado del arte	23
5. MARCO TEÓRICO	29
5.1 Material particulado	29
5.2 Fuentes de PM ₁₀	30
5.2.1. Aerosol marino	31
5.2.2. Compuestos Inorgánicos Secundarios (CIS)	31
5.2.3. Compuestos orgánicos	32
5.3 Efectos del PM ₁₀ en la salud	33
5.4 Modelos receptores	34
5.4.1. CMB	35
5.4.2. PMF	36
6. METODOLOGÍA	38
6.1 Área de estudio	38
6.2 Protocolo de muestreo	39
6.3. Determinación de la concentración de PM ₁₀	40
6.4. Determinación de la concentración de especies químicas	43
6.5 Modelación	44
6.5.1 Modelo receptor CMB 8.2	44
6.5.2 Modelo receptor PMF 5.0	51
7. RESULTADOS	60
7.1 Resultados monitoreo	60
7.2 Composición Química del PM ₁₀	64

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

7.2.1. Correlación entre carbono orgánico y carbono elemental	66
7.3. Reconstrucción másica de PM ₁₀	68
7.4. Contribución de fuentes por medio del modelo CMB 8.2.....	69
7.5 Contribución de fuentes por medio del modelo PMF 5.0.....	75
7.6 Análisis / Discusión	81
8. CONCLUSIONES	84
9. REFERENCIAS	86
10. ANEXOS.....	96
10.1 Anexos CMB	96
Anexo 10.1.2 Archivos AD.TXT	96
Anexo 10.1.3 Archivo PR.TXT.....	98
Anexo 10.1.4: archivos opcionales.....	102
Anexo 10.1.5 Resultados CMB	103
10.2. Anexos PMF-5.0.....	104
Anexo 10.2.1. Obs/Pred Time Series.	105
Anexo 10.2.2. Contribución	111

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

Lista de tablas y figuras

Tablas

Tabla 6.1 Nomenclatura de acuerdo con cada fuente estudiada.....	49
Tabla 6.2 Ejemplo de archivo de entrada “Concentration Data File”	52
Tabla 6.3 Corrida número 18 del modelo PMF.....	59
Tabla 7.1 Datos de concentración general de acuerdo a las fechas monitoreadas	60
Tabla 7.2 Estudios realizados sobre PM ₁₀ en Colombia	62
Tabla 7.3 Parámetros estadísticos de la concentración de especies químicas medidas en el PM ₁₀ . (Desviación estándar de la muestra)	65
Tabla 7.4 Estimación de las fuentes contribuyentes.....	70
Tabla 7.5 Análisis de diferentes corridas / rangos aceptables	71
Tabla 7.6 Informe principal / CMB – 8.2.....	72
Tabla 7.7 Estadísticas de corrida base.....	75

Figuras

Figura 5.1 Dimensiones del material particulado comparado con una hebra de cabello. ...	30
Figura 6.1 Mapa con indicación del área de estudio.....	38
Figura 6.2 Localización del punto de muestreo en el Área de estudio.	39
Figura 6.3 Ilustración de las recomendaciones para la ubicación de un punto de muestreo.	40
Figura 6.4 Equipo de muestreo de bajo volumen Partisol Plus 2025.....	41
Figura 6.5 Filtros de cuarzos rotulados y acondicionados después de la etapa de muestreo	43
Figura 6.6 Inicio interfaz - EPA-CMB8.2.....	46
Figura 6.7 Selección de archivos de entrada.....	46
Figura 6.8 Opciones para establecer los datos de la corrida	47
Figura 6.9 Muestra de datos ambientales	48
Figura 6.10 Montaje de las especies analizadas.....	49
Figura 6.11 Montaje de fuentes a asociar.....	50
Figura 6.12 Resultados – Informe principal / Contribución de especies / (MPIN) matriz .	50
Figura 6.13 Interfaz inicial PMF 5.0 para la entrada de archivos correspondientes.....	54
Figura 6.14 Concentration/Uncertainty, Clasificación a “Strong, Weak, Bad” de los diferentes elementos de manera aleatoria.....	55
Figura 6.15 Concentraciones de elementos seleccionados con respecto a las fechas analizadas.	56
Figura 6.16 Datos Excepcionales de acuerdo a la selección a aleatoria de los elementos y compuestos, (Strong, Weak and Bad, User- Excluded Samples, Samples Excluded Due to Missing Values).....	57
Figura 6.17 Base Model / Base Model Runs – Datos a manejar; Number of Runs and Number of Factors.....	58

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

Figura 6.18 Resumen de las 20 corridas efectuadas por el modelo PMF 5.0	58
Figura 7.1 Concentraciones de PM10 obtenidas durante el periodo de muestreo	62
Figura 7.2 Concentración promedio mensual de PM ₁₀ (ug/m ³).....	64
Figura 7.3 Concentración de componentes determinados en el material particulado PM ₁₀	66
Figura 7.4 Muestra la correlación entre carbono orgánico y carbono elemental	67
Figura 7.5 Reconstrucción másica de PM10. Carbono orgánico (CO), carbono elemental (CE.), elementos (Na, Mg, K, Fe, P, Ca, Ba, y Sr)	68
Figura 7.6 Porcentaje de concentración de cada especie estudiada, asociando las 5 fuentes.	73
Figura 7.7 Determinación de la contribución de los elementos para cada fuente.....	74
Figura 7.8 Factor de contribución para el TOT (PM ₁₀).	75
Figura 7.9 Dispersión del PM ₁₀ observado / previsto (Concentraciones).....	76
Figura 7.10 Contribución de los perfiles / Concentración de especies - % de especies	77
Figura 7.11 Concentración de cada especie estudiada, asociando los 5 Factores.....	80
Figura 7.12 Factor de contribución para el PM10 – corrida número 18.....	81

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

Glosario

Material particulado: Conjunto de partículas sólidas o líquidas, exceptuando el agua, que están presentes en suspensión en la atmósfera y que se originan a partir de una variedad de fuentes naturales o antropogénicas.

Sistema de Vigilancia de Calidad de Aire (SVCA): Red de equipos que monitorea y analiza las concentraciones de ciertos contaminantes en la zona atmosférica.

Organización Mundial de la Salud (OMS): Es un organismo especializado de las naciones unidas fundado en 1948 cuyo objetivo es alcanzar, para todos los pueblos, el mayor grado de salud.

Fracción PM₁₀: Material particulado con un diámetro aerodinámico menor o igual a 10 micrómetros nominales en condiciones de referencia.

Contaminante criterio: Sustancias, o elementos en estado sólido, líquido o gaseoso, causantes de efectos adversos en el medio ambiente, los recursos naturales renovables y la salud humana a los cuales se le han hecho varios estudios y sirven de juicio para otras investigaciones.

Modelamiento: Procedimiento de introducción y análisis de datos en un software específico para obtener resultados acerca del comportamiento de un contaminante.

Inmisión: Es la transferencia de contaminantes del aire desde la atmósfera libre a un receptor tal como un ser humano, planta o edificación.

Especies químicas: Conjunto de entidades moleculares químicamente idénticas que pueden formar elementos o compuestos químicos.

Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA): Es una agencia del gobierno federal de Estados Unidos encargada de proteger la salud humana y proteger el medio ambiente: aire, agua y suelo.

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

Balance químico de masa (CMB): Modelo desarrollado por la EPA empleado para determinar el aporte de ciertas fuentes sobre un contaminante específico.

Factorización Positiva de la Matriz (PMF): Modelo receptor matemático desarrollado por científicos de la EPA que provee apoyo científico para estimar contribuciones de fuentes acerca de un contaminante en particular. desarrollo y revisión de estándares de calidad de aire.

Emisión: Descarga de una sustancia o elemento, en estado sólido, líquido o gaseoso, o en alguna combinación de estos, provenientes de una fuente fija o móvil.

Fuente de emisión: Es toda actividad, proceso u operación, realizado por los seres humanos, o con su intervención, susceptible de emitir contaminantes al aire.

Modelo receptor: Modelo matemático empleado para el estudio y la determinación del aporte de las diferentes fuentes de material particulado.

Fuente móvil: Es la fuente de emisión que, por razón de su uso o propósito, es susceptible de desplazarse, como los automotores o vehículos de transporte a motor de cualquier naturaleza.

Fuente fija: Fuente de emisión situada en un lugar determinado e inamovible, aun cuando la descarga de contaminantes se produzca en forma dispersa.

Tasas de emisión: Son los rangos a los cuales un contaminante se emite más dependiendo de la actividad realizada.

Metales pesados: Se refiere a cualquier elemento químico metálico que tiene una densidad relativamente alta y es tóxico en concentraciones bajas. Los metales pesados son componentes naturales de la corteza terrestre.

1. Introducción

Los problemas de la calidad del aire se originan cuando se encuentran presentes especies químicas en la atmósfera que no son posibles encontrar en un estado natural o cuando esas mismas especies químicas se encuentran a unos niveles inadecuados que son perjudiciales para la salud (MAVDT et al., 2010). El material particulado (PM) corresponde a un conjunto de partículas sólidas y líquidas que están presentes en suspensión en la atmósfera, pueden variar significativamente en tamaño, forma, composición y se originan a partir de una variedad de fuentes naturales o antropogénicas. Estas partículas suelen clasificarse según el radio aerodinámico, en partículas suspendidas totales (PST), menores a $100\ \mu\text{m}$, PM_{10} diámetro igual o inferior a $10\ \mu\text{m}$, $\text{PM}_{2.5}$ con diámetro aerodinámico nominal menor o igual a $2,5\ \mu\text{m}$ y PM_1 , partículas con diámetro aerodinámico menor a $1\ \mu\text{m}$. siendo consideradas estas tres últimas como fracciones respirables porque tienen la capacidad de penetrar al interior de los pulmones y causar efectos tóxicos (Díaz-Robles et al., 2008)

El material particulado es un conglomerado de partículas sólidas y líquidas suspendidas en la atmósfera que puede ser producto de una actividad natural o antropogénica las cuales son el objeto de estudio de este trabajo de investigación (Aciniegas Suarez, 2012), dichas partículas se clasifican de acuerdo a su diámetro aerodinámico en $\text{PM}_{1.0}$, $\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10} , este último nombrado es el centro de atención de los diferentes análisis llevados a cabo en este estudio. La emisión de este tipo de contaminante se convierte en un problema de salud pública para las personas que habitan en grandes ciudades puesto que este tipo de contaminante acarrea ciertas especies químicas las cuales en ciertas cantidades son perjudiciales para la salud humana (Bello Silva, Sergio; Oyarzún Gómez, 1991). En Colombia la ley que regula el índice de calidad de aire y los

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

niveles máximos permisibles de cada contaminante es la resolución 610 del 2010 (MAVDT, 2010). Sin embargo, los límites máximos permisibles estipulados por la ley en muchas ocasiones se ven superados en las zonas que cuentan con un sistema integrado de vigilancia de calidad de aire y en las zonas que no cuentan con dicho sistema la situación de contaminación por causa de este contaminante criterio llega a ser desconocida. A nivel global según la organización mundial de la salud existe una estrecha relación cuantitativa entre la exposición a altas concentraciones de pequeñas partículas (PM_{10} y $PM_{2,5}$) y el aumento de la mortalidad o morbilidad diaria y a largo plazo, puesto que los niveles máximos permisibles expuestos por esta entidad son más estrictos que los de la normativa nacional vigente debido a que cuando las concentraciones de partículas pequeñas y finas son reducidas, la mortalidad equivalente también desciende, suponiendo de que otros factores se mantengan sin cambios (OMS, 2016).

2. Planteamiento y justificación del problema

Dentro de las problemáticas ambientales que más costos generan en Colombia se encuentra el control de las emisiones de contaminantes atmosféricos Material Particulado, NO_x y SO_2 (Colombiano, Rojano, Angulo, & Restrepo, 2013) dichos compuestos son nocivos para la salud de las personas, según estudios realizados por la OMS (Romero Placeres, Diego Olite, & Álvarez Toste, 2006).

El contaminante asociado a esta problemática, que genera mayor preocupación, es el material particulado respirable. Debido a esto, la temática de este trabajo se refiere a la determinación de componentes mayoritarios y especies tóxicas en el material particulado, siguiendo la línea de investigación en torno a la calidad del aire. El material particulado PM_{10} debe ser medido por las redes de monitoreo de calidad del aire, según la normatividad colombiana y es la fracción que más comúnmente sobrepasa los valores estipulados en la resolución 610 del 2010 (Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible et al., 2012).

Si bien las causas de la contaminación del aire pueden ser naturales (emisiones volcánicas, biogénicas, desérticas, marinas, etc.) o antropogénicas. Son éstas últimas las que inciden más negativamente sobre la calidad del aire. Existe un gran número de contaminantes atmosféricos con distintas repercusiones en la atmósfera. Entre ellos destacan CO_2 , CO , SO_2 , NO , NO_2 , O_3 troposférico, NH_3 , H_2S , y material particulado atmosférico (Querol, 2008).

Las grandes ciudades, (con más de un millón de habitantes), cuentan con parques automotores grandes y con zonas industriales bien establecidas, que se convierten en un mayor número de fuentes móviles y fijas de contaminación atmosférica y generan un aumento en el riesgo medioambiental para la salud. Hay evidencia científica que relacionan la exposición al material particulado atmosférico con el aumento de la carga de morbilidad medible en accidentes

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

cerebrovasculares, cánceres de pulmón y neumopatías crónicas (OMS, 2016). A demás de los efectos en la economía por costo de enfermedades (Ortiz-Durán & Rojas-Roa, 2013), daños a la vegetación, reducción de la visibilidad, lluvia ácida, daño a los animales e interferencia con la fotosíntesis de las plantas (Querol, 2008).

Barranquilla es un Distrito Especial, Industrial y Portuario que ha demostrado un crecimiento demográfico alto y significativos aumentos de inversión en el sector industrial y comercial. Generando un beneficio para los habitantes de la ciudad que permite suponer un agravante en la calidad el aire de la misma, por el aumento de las concentraciones de los contaminantes, sin ser el material particulado PM_{10} una excepción. Desafortunadamente, la situación actual de la calidad del aire en Barranquilla es desconocida y el Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire (SVCA) encargado de registrar y reportar los parámetros ambientales de los contaminantes presentes en el aire, se encuentra en desarrollo para instalar 2 estaciones fijas y una estación móvil. Razón que preocupa a las autoridades ambientales de la región como lo es la Corporación Autónoma Regional del Atlántico (CRA) que actualmente se encuentra trabajando en la instalación y puesta en marcha de 7 estaciones de monitoreo dentro de los territorios de su jurisdicción (CRA, 2016).

Es por la ausencia de este sistema de monitoreo que resulta imposible cuantificar dichos parámetros para poder llegar a estimar el grado de contaminación al que están expuestos tanto la comunidad universitaria como los transeúntes de la zona aledaña a la Universidad de la Costa. El material particulado es considerado como un conjunto complejo de elementos desde el punto de vista mineralógico y químico; variable en función de la zona donde se realice los muestreos (urbanos, rurales, industriales) y de la meteorología. Sin embargo, se pueden llegar a considerar cuatro grupos principales de compuestos químicos en el PM_{10} , los cuales son: la fracción mineral, el aerosol marino, los Compuestos Inorgánicos Secundarios (CIS) y los compuestos orgánicos

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

(Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, 2016). A estos grupos se suman productos de las actividades industriales, los cuales aportan concentraciones anómalas desde un punto de vista geoquímico a la atmósfera. A pesar de que las emisiones antropogénicas de material particulado son mucho menos importantes a nivel global que las emisiones naturales, el material particulado de origen antrópico llega a ser más importante en las áreas urbanas. Debido a que por su composición química puede llegar a ser más tóxico que el de origen natural (Consejería de medio ambiente y ordenación del territorio., 2016).

Saber acerca de la composición química del material particulado, tiene una gran importancia no solo desde la perspectiva de la química de la atmósfera, sino en el conocimiento de la calidad del aire que se respira en las ciudades (Aciniegas Suarez, 2012).

Con la realización de este trabajo se pretende evaluar el nivel de exposición de la comunidad universitaria a los constituyentes químicos del material particulado con ayuda de modelos receptores basado en el balance químico y en estadística multivariada. Permitiendo establecer una línea base del comportamiento de la composición de este contaminante criterio de la atmósfera en la zona estudiada y estandarizando una metodología de cuantificación, caracterización y modelación reproducible y aplicable a otras zonas atmosféricas de la ciudad.

Lo anteriormente descrito impulso la investigación llevada a cabo, ya que hizo la cuantificación de las sustancias consideradas como componentes mayoritarios y/o tóxicos de la fracción PM_{10} del material particulado respirado en una zona específica de alta influencia peatonal en la ciudad. Planteando la siguiente pregunta problema: ¿Cuáles son las fuentes emisoras con mayor aporte al material particulado PM_{10} , en la atmósfera exterior de la Universidad de la Costa (CUC)?

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Establecer el aporte de las fuentes emisoras de material particulado mediante caracterización química y modelación por medio de modelos receptores, en la Universidad de la Costa (C.U.C.).

3.2 Objetivos específicos

- Cuantificar las especies químicas mayoritarias, presentes en el PM_{10} captado en la Universidad de la Costa.
- Reconstruir másicamente el PM_{10} en el aire de la Universidad de la Costa (C.U.C.).
- Evaluar el aporte de las fuentes emisoras de material particulado mediante los modelos de inmisión balance químico de masa CMB y factorización positiva de la matriz PMF

4. Estado del arte

La contaminación del aire es un fenómeno ampliamente estudiado en las grandes metrópolis del mundo debido a los problemas ambientales, y los efectos en la salud que han sido asociados a lo largo del tiempo (Romero Placeres et al., 2006). Actualmente, varias ciudades consideran la calidad del aire prioridad debido a la vulnerabilidad potencial de su gran número de habitantes, porque concentran grandes industrias y tienen un alto grado de movilidad mediante transporte terrestre. Aunque la contaminación del aire no solo se debe a la emisión por parte de las actividades realizadas por el hombre, también puede ser generada por fenómenos naturales. Ambos tipos de emisiones pueden afectar a pequeña o a gran escala la vida animal, vegetal, la salud y el bienestar humano (MAVDT et al., 2010).

Está demostrada la relación directa entre los casos de muertes prematuras, casos de bronquitis, hospitalizaciones por enfermedades respiratoria crónica y el número de visitas a salas de urgencia, con los contaminantes atmosféricos (Acevedo Bohórquez et al., 2013). Para Colombia se presentaron un total de 11226 casos de enfermedades crónicas de las vías respiratorias para el año 2010, correspondiente a un 5,6 % del total de episodios de enfermedades en el país, que podrían asociarse directamente a la contaminación atmosférica, según el informe del diagnóstico nacional de salud ambiental (MAVDT et al., 2010)(Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible et al., 2012).

Debido a los avances tecnológicos y científicos, actualmente se cuenta con diferentes estrategias y herramientas útiles, que pueden ayudar a identificar y cuantificar las sustancias presentes en el material particulado como lo es la caracterización química y los diferentes modelos receptores. Un referente en este tipo de herramientas es la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, que cuenta con diferentes modelos y bases de datos aplicables en

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

la investigación en calidad del aire, con el fin de apoyar la toma de decisiones que conlleven al alcance del desarrollo sostenible (Aciniegas Suarez, 2012).

A continuación se describe la importancia de la caracterización química y los modelos receptores, para el diagnóstico de la calidad del aire en centros urbanos haciendo una revisión de las aplicaciones en diferentes ciudades.

En Barcelona/España (Pey Betrán, Alastuey, Querol Carceller, & Mata i Perelló, 2007) se realizó la caracterización de más de 60 componentes químicos, mediante diferentes metodologías estandarizadas: espectrometría de emisión atómica (ICP-OES) (para determinar elementos mayoritarios: Al, Fe, K, Ca, Na, Mg, S, P, Ba, Cr, Cu, Mn, Ni, Sr, Pb, Ti, V, Zn), espectrometría de emisión atómica acoplada a espectrometría de masa (ICP-MS) (para elementos traza: Li, e, V, Cr, Co, Ni, Mn, Cu, Zn, As, Se, Rb, Sr, Y, Zr, Hf, Cd, Sn, Ba, Tierras raras, Pb, Bi Th y U), cromatografía iónica (para determinar iones solubles Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-}) y análisis termo-óptico para determinar carbono orgánico (CO) y carbono elemental (CE). El estudio realizado manifiesta que la principal fuente de contaminación atmosférica por material particulado en la zona es el tráfico rodado, generando importantes emisiones primarias, reflejadas claramente en el número de partículas y en el contenido en aerosoles carbonosos, y de precursores gaseosos que forman aerosoles secundarios, otro tipo de fuente se debe a la re-suspensión del material particulado depositado sobre las vías de tránsito, siendo uno de los problemas en la zona urbana. En España, más precisamente en el Distrito Minero de Riotinto – Faja Piritica de Ibérica (De la rosa, 2011) realizaron la caracterización química para un monitoreo de dos años, y tomado muestras con periodicidad de cuatro días, con tiempo de muestreo de 24 horas, empleando un captador de alto volumen de cabezal de corte para PM_{10} . Utilizando ICP-MS, ICP-OES, cromatografía iónica y análisis elemental para carbono. También se emplearon cálculos estequiométricos para estimar los contenidos de carbonato y sílice (a partir de las

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

concentraciones Ca, Mg y Al), y para el sulfato marino (a partir de Na y Cl), con el fin de determinar el impacto de la explotación y las escombreras mineras antiguas (principales fuentes de elementos tóxicos As, Cu, Pb y Zn) en el aire, debido a la presencia en los residuos de finas partículas minerales de sulfuros metálicos, tales como pirita, calcopirita, esfalerita, galena y arsenopirita. En este estudio concluyeron que las concentraciones medias de elementos potencialmente tóxicos podrían considerarse, como fondo geoquímico o línea de base de la actual situación pre-operacional, y marco de referencia para evaluar el impacto sobre la atmósfera de la actividad minera que se prevé desarrollar en el futuro próximo en la región.

En baja California, México, se realizó un estudio de la composición química del material particulado PM_{10} (Canales-Rodríguez, Quintero-Núñez, Castro-Romero, & García-Cuento, 2014) discriminado la zona urbana y rural, mediante dos estaciones de monitoreo y teniendo en cuenta la variación estacional meteorológica. Obteniendo la concentración de PM_{10} mediante el método gravimétrico y usando técnicas de caracterización como la espectroscopia de análisis de dispersión de rayos X (EDS), la cromatografía iónica, transmitancia térmica-óptica y espectroscopia de absorción atómica; para identificar el material geológico, material orgánico, nitrato de amonio, elementos trazas (desde el N al Pb, en excepción del aluminio, silicio, calcio, hierro, cloro, potasio, sodio, y azufre), carbón elemental, sulfato de amonio y sales minerales. En este estudio se verificó que el material orgánico es la especie mayoritaria en el PM_{10} de la temporada de invierno en la zona urbana con 54,52%, producido por la quema y residuos orgánicos, en cambio para la zona rural en la misma temporada la especie mayoritaria es el material geológico con 53,67%, debido mayormente a la erosión causado por el viento. Mientras que para la temporada de verano el PM_{10} en ambas zonas de estudio (zona urbana y zona rural) la especie mayoritaria fue derivada del material geológico con 75,48% y 53,34% respectivamente, producido por el polvo de la región.

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

A nivel de Sur América, se han desarrollado caracterizaciones químicas del material particulado (F. A. Vargas, Rojas, Vargas, & Rojas, 2010) en Bogotá; estableciendo el aporte de fracciones carbonaceas y carbonato de calcio asociado a fuentes de combustión, de la fracción mineral asociadas a polvos fugitivos y de re-suspendidos por fuentes móviles, determinando la composición y concentración de material particulado a partir del método gravimétrico teniendo en cuenta los métodos estandarizados. Deduciendo que los mayores aportes al PM₁₀ en Bogotá están constituidos por fracciones carbonaceas, las cuales están asociadas principalmente a las fuentes de combustión, tanto fijas como móviles y que la fracción mineral, asociada a polvo fugitivo o re-suspendido por fuentes móviles, es también apreciable.

Dentro de los pocos reportes encontrados en la región Caribe Colombiana, se encuentra el trabajo desarrollado en Santa Marta. Hallando la presencia de carbón mineral, carbón de combustión, halita, cuarzo, feldespatos y de fracciones arcillosas, e identificando grupos mineralógicos (zeolita, caolinita, micas, entre otros) aplicando la metodología de Difractometría de rayos X. Sentando que una de las causas de la contaminación atmosférica por material particulado en el área de estudio son fuentes móviles y fuentes fijas (García, Pinzón, & Cueto, 2005).

El aporte para cada tipo de fuente emisora a la concentración de material particulado, se puede evaluar cuantitativamente a partir de las concentraciones de los elementos presentes en el mismo, aplicando diferentes técnicas de modelo de receptor, dentro de los más comunes se encuentran el *Positive Matrix Factorization* (PMF), *Chemical Mass Balance* (CMB), UNMIX, entre otros; en el cual se logra identificar las posibles fuentes generadoras de distintos elementos; la EPA-EEUU (Environmental Protection Agency., 2004) ha desarrollado diferentes modelos que permiten la utilización de estos modelos mediante interfaz gráfica y de manera relativamente amigable con el usuario, potencializando su utilización.

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

La identificación de fuentes por PMF igualmente fue utilizada en América del Sur, Santiago de Chile para el año 2008 (Aluanlli Villalobos, 2008), donde se realizó un estudio dando como resultados perfiles de diferentes fuentes. Detectando de manera general en fracciones finas y gruesas mediante una caracterización química los elementos Al, As, Br, Ca, Cu, Fe, K, Mn, Ni, P, Pb, S, Si, Ti, V, Zn y C, que las fuentes emisoras para las fracciones finas del material particulado son significativamente diferentes entre temporadas frías y cálidas. Dentro de las fuentes asociadas a los elementos trazados se encontraron quema de biomasa o combustión de leña para de carbono orgánico y carbono elemental, As y Br proveniente de emisiones vehiculares de componentes como los frenos o neumáticos, Fe o Si del polvo suspendido, además de Pb, Ni, y V provenientes de fuentes fijas como las grandes industrias. Para fracciones gruesas se asociaron las mismas fuentes e emisión, además del aerosol marino el cual es rico en NaCl y el polvo construcción. Para un aporte de mayor aproximación, en Colombia/Bucaramanga (Castro Ortiz, Fernando Castro Suarez, Luis Chacón Velasco, Andrea Rodríguez Villamizar, & Berena Herrera López, 2009) aplican los modelos PMF y UNMIX de la U.S. EPA (Environmental Protection Agency., 2004) con el objetivo de identificar las principales fuentes generadoras del material particulado en el área. La información obtenida en el análisis físico-químico se utilizó respectivamente para correr los dos modelos receptor-fuente, donde se logró cuantificar que el principal responsable de la contaminación atmosférica es el transporte vehicular, con un aporte entre el 54% y 62%, seguido de las fuentes naturales o geológicas con un 20 y 32%. A nivel mundial el modelo CMB, ha sido ampliamente aplicado para determinar la contribución de las fuentes, normalmente este modelo resuelve un sistema de ecuaciones lineales, que incluye perfiles de concentración ambiente y de origen, utilizando la varianza efectiva ponderada de mínimos cuadrados (Watson, Cooper, & Huntzicker, 1984). Otros modelos son aplicados en Norte América, por ejemplo; realizando un seguimiento a las concentraciones de material

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

orgánico primario (MO) y carbono elemental (CE) en ocho fuentes diferentes; los vehículos de gasolina, los vehículos diésel no viales, y vehículos todo terreno, quema de biomasa, leña, la combustión de gas natural, polvo de caminos, y todas las demás fuentes, se realizó un inventario de emisiones individuales para cada fuente, y luego se aplicó un modelo de transporte químico tridimensional (PMCAMx). Teniendo en cuenta el episodio anterior evaluada por (Gaydos et al., 2007) en el este de los Estados Unidos, para predecir las concentraciones de MO y de la CE primarios de cada fuente. Los resultados del modelo de código de resolución temporal se comparan con los resultados de los modelos de balance de masas químicas (CMB); otro modelo aplicado, donde existen diferencias significativas entre el modelo de código de resolución temporal y las predicciones del modelo CMB para algunas de las fuentes incluyendo en el inventario que se realiza a ciertas fuentes, se evidencio que en las emisiones de partículas orgánicas procedentes de la combustión de gas natural están sobreestimados, y que las emisiones de MO y la CE procedentes de la quema de madera y todoterreno diésel son demasiado altas en el noreste de los Estados Unidos. Este modelo predice valores razonables para el polvo del camino y otros por tanto MO primaria y CE. Las concentraciones de MO y de la CE primarias previstas para estas categorías de fuentes en Pittsburgh y las ocho ubicaciones de búsqueda están de acuerdo con los resultados del CMB. En general, el modelo de código de resolución temporal fue una técnica rápida y fácil para predecir las contribuciones de las fuentes de MO primaria y CE (Lane, Pinder, Shrivastava, Robinson, & Pandis, 2007)

5. Marco teórico

5.1 Material particulado

El material particulado atmosférico, también conocido como partículas en suspensión, corresponde al conjunto de partículas sólidas o líquidas, exceptuando el agua, que están presentes en suspensión en la atmósfera y que se originan a partir de una variedad de fuentes naturales o antropogénicas (Aciniegas Suarez, 2012). Este se clasifica según su radio aerodinámico en: partículas suspendidas totales (PST); que comprende las partículas menores a 100 μm de diámetro aerodinámico y que por ende no sedimentan en periodos cortos, al contrario persisten suspendidas en el aire (varias horas) por su densidad y tamaño; las partículas PM_{10} o partículas con diámetro igual o inferior a 10 micrómetros (μm) y las partículas $\text{PM}_{2.5}$ o con un diámetro aerodinámico nominal menor o igual a 2,5 μm (Saldarriaga Molina & Echeverri Londoño, Carlos Alberto; Molina Pérez, 2004). Las partículas con diámetro aerodinámico de PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$ se consideran como fracciones respirables (Sbarato, Sbarato, & Ortega, 2007) debido a que son aquellas que logran pasar el tracto respiratorio penetrando en los alvéolos pulmonares. En la figura 5.1, se puede dimensionar el orden de magnitud del diámetro de las diferentes fracciones del material particulado atmosférico, al ser comparado con el diámetro del cabello humano y con arena fina de playa. Como ya se mencionó anteriormente el diámetro de las partículas PM_{10} es de 10 micrómetros, mientras que el diámetro promedio del cabello humano está entre 50 y 70 micrómetros y el de la arena de playa es de 90 micrómetros.

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

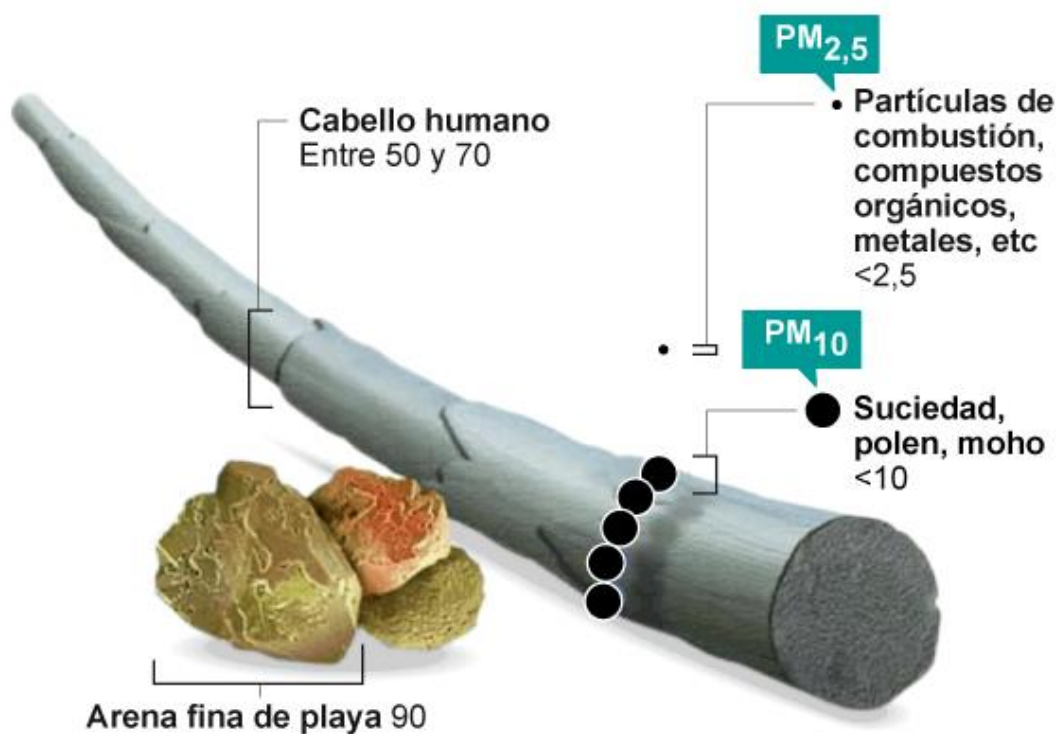


Figura 5.1 Dimensiones del material particulado comparado con una hebra de cabello. (EPA, 2010).

5.2 Fuentes de PM₁₀

El PM₁₀ es una compleja mezcla de productos químicos y/o elementos biológicos, como metales, sales, materiales carbonosos, nitratos, sulfatos y endotoxinas que pueden interactuar entre sí formando otros compuestos (Viana Rodríguez, 2003). Según la naturaleza química de las partículas, las fuentes de emisión de material particulado pueden ser clasificadas en dos categorías: i) fuentes primarias que emiten material particulado directamente a la atmósfera y ii) fuentes secundarias que emiten sustancias que forman el material particulado a partir de precursores en la fase gaseosa como consecuencia de procesos físicos y químicos a nivel atmosférico (García Lozada, 2009).

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

El material particulado puede contemplarse como un conjunto complejo desde el punto de vista mineralógico y químico. Teniendo en cuenta las zonas de muestro (rurales, urbanas, industriales), la mineralogía y química general de las partículas es muy diversa (Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio., 2016). Esta parte del material particulado refleja la composición mineralógica y química del área fuente. En este se resalta la presencia de carbonatos tales como calcita (CaCO_3) y dolomita (CaMgCO_3), y silicatos, como cuarzo (SiO_2), feldespatos y arcillas, como la caolinita e ilita, así como también menores cantidades de yeso ($2\text{H}_2\text{O CaSO}_4$) y óxidos de hierro como la hematites (Fe_2O_3).

Estas partículas se identifican por su granulometría muy gruesa, aunque dependiendo de la velocidad del viento se pueden encontrar partículas en el rango de las finas (Alfaro, 1998).

5.2.1. aerosol marino.

El material particulado proveniente del aporte de aerosol marino es el más abundante después de la fracción mineral debido a la presencia de un 90% de áreas oceánicas sobre continentales en la Tierra. El aerosol marino se forma por el rompimiento de las olas y la actividad del viento sobre la superficie de los océanos (Argumedo & Castillo, 2016).

Desde un punto de vista químico, su estructura es similar a la del agua marina, compuesta primordialmente por NaCl (halita), KCl (silvina) y sulfatos de calcio, magnesio y potasio, siendo sus fracciones granulométricas gruesas ($>20 \mu\text{m}$), sin embargo también depende del mecanismo de formación (Maring, Savioe, Izaguirre, Custals, & Reid, 2003).

5.2.2. compuestos inorgánicos secundarios (CIS).

Son llamados compuestos inorgánicos secundarios y en este grupo destacan sulfatos, nitratos y amonio. Los compuestos de azufre y nitrógeno existentes en la atmósfera tienen

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

generalmente un origen secundario, ya que se forman como resultado de la oxidación de sus precursores gaseosos.

En cuanto a las fuentes naturales, los sulfatos se originan por oxidación de los gases de azufre naturales presentes en la atmósfera, como SO_2 de volcanes, o di-metil sulfuro ($(\text{CH}_3)_2\text{S}$, DMS) en los océanos. Por otra parte los nitratos resultan de la oxidación de los óxidos de nitrógeno (NO_x) de fuentes naturales como la desnitrificación de los suelos, los incendios forestales, las descargas eléctricas que ocurren en las tormentas y emisiones biogénicas (Seinfeld & Pandis, 1998).

En lo que respecta a las fuentes antropogénicas correspondientes a los principales precursores gaseosos antropogénicos de los nitratos se encuentran los óxidos de nitrógeno (NO_x), emitidos por el tráfico rodado y por procesos industriales a través de la combustión de gas, carbón o *fueloil* y biomasa (Universidad Nacional Autónoma de México. Centro de Ciencias de la Atmósfera & GRANIEL, 2007).

5.2.3. compuestos orgánicos.

Los compuestos orgánicos se clasifican en compuestos semi-volátiles y volátiles. Los primeros a su vez se subdividen en compuestos órgano-halogenados que contienen a los PCB y DDT, e hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH) originarios de la combustión incompleta de la materia orgánica y compuestos derivados del petróleo. Las amplias extensiones de masa vegetal (especialmente coníferas) son consideradas las fuentes principales de precursores gaseosos de aerosoles orgánicos secundarios (Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, 2016).

5.3 Efectos del PM₁₀ en la salud

La relación del material particulado con las enfermedades respiratorias ha venido tomando significativa importancia en el campo del control de la contaminación debido a el considerable aumento de enfermedades respiratorias producto de este contaminante atmosférico (Suárez & Pérez, 2006). El material particulado es causante de diferentes tipos de afecciones respiratorias como el asma bronquial, la bronquitis además de enfermedades cardiovasculares, anemia y cefalea, entre otras (Oyarzún, 2010). Todos estos efectos adversos a la salud dependen, por una parte, de la concentración y la duración de la exposición del individuo al contaminante y de la susceptibilidad de las personas expuestas (D'Amato & Holgate, 2002).

La contaminación atmosférica constituye así un problema ambiental debido a que la acción antrópica genera un efecto sobre un componente ambiental (aire) y el deterioro de éste afecta la supervivencia y calidad de vida del hombre debido a que por esta situación se ve vulnerada su salud (Peña-Cortés, F., Henríquez, 2002). Uno de los atenuantes que contribuye a la contaminación atmosférica y a la reducción de la calidad de vida del hombre es el material particulado (MP) ya que este tiene una incidencia negativa en la salud humana, que se manifiesta especialmente por problemas cardiovasculares y respiratorios (Yepes & Oliver, 2013). Entre las enfermedades que se conocen ligadas a la presencia de material particulado en el aire respirado, podemos citar: EPOC, asma ocupacional, alergias, bronquitis crónica y hasta cáncer e incluso infecciones respiratorias agudas (IRA) (Casas, Peña-Cortés, & Osses Bustingorry, 2004).

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

5.4 Modelos receptores

En la actualidad existen diferentes tipos de modelos para interpretar la calidad del aire (Puliafito & Quaranta, 2009), teniendo en cuenta que, dentro de este contexto, un modelo es una representación simplificada de un sistema, proceso o teoría que intentan mejorar nuestra capacidad de comprender, predecir y posiblemente controlar el comportamiento del mismo (Neelamkavil, 1987). Consecuentemente, la modelación de la calidad del aire se instaure como una herramienta de análisis para la simulación y predicción de impactos ambientales de diversas fuentes de emisión, sean fijas o móviles (Mendoza & Garcia, 2009). La implementación de modelos puede ser utilizada en diferentes proyectos o procesos, ya sea para la evaluación de las emisiones durante la generación de energía por quema de combustibles fósiles como carbón o gas natural, así como también para la valoración de vías en sectores industriales o sectores urbanos como autopistas, de igual manera puede ser empleada para evaluar los impactos sobre el componente atmosférico, debido a la construcción de vías, oleoductos o presas y la operación de canteras, escombreras o almacenadores de combustibles (Hernandez, 2013).

Los modelos receptores se distinguen porque permiten estimar por medio de la introducción de ciertos datos tomados en campo, la posible contribución de cada fuente de acuerdo a las tasas de emisión y a los contaminantes asociados a la misma. Para la aplicación de los modelos, se deben tener en cuenta tres características de gran importancia: la primera es la información meteorológica disponible como la temperatura, velocidad y dirección del viento, humedad relativa y radiación solar; la segunda los factores de emisión o la medición de las tasas de emisión de los diferentes contaminante a la atmósfera y la tercera es la topografía del área en estudio, ya que la dispersión de los contaminantes presenta un comportamiento diferente en zonas montañosas y en zonas planas (Forero gonzalez & Delgado Herrera, 2008). La relación de estos tres factores permite establecer el comportamiento de los contaminantes que se procedan a

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

modelar, ya sea material particulado, óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, compuestos orgánicos volátiles (COV) (Sánchez, Vega, Reyes, & Mugica, 1997) hidrocarburos en un área específica. Estos factores juegan un papel importante a la hora de escoger que tipo de modelo se va a emplear la vez que nos brindan una idea de cómo ajustar el modelo durante la introducción de los datos.

5.4.1. cmb.

Dentro de los modelos receptores utilizados para la determinación de la calidad del aire, se encuentra el Balance Químico de Masa (CMB, por sus siglas en ingles) de la Agencia de Protección al Ambiente de los Estados Unidos (USEPA) (Environmental Protection Agency, 2004). Este modelo receptor se compone de una solución a un sistema de ecuaciones lineales que expresan cada receptor de la masa química recolectada en un filtro ambiental.

Para la versión de CMB 8.2, se considera una ecuación lineal que expresa cada concentración química del receptor como la suma de las contribuciones de las fuentes, aplicando la teoría de mínimos cuadrados ponderados, y usando todas las mediciones de las especies químicas disponibles y sus incertidumbres, para dar mayor peso a las especies químicas con menor grado de incertidumbre. Conociendo los perfiles de las fuentes, CMB busca minimizar el valor del CHI SQUARE (χ^2) que es la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de la proporción R / U que corresponden a la especie de ajuste dividida por los grados de libertad (DF).

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^n \left[\frac{(X_j - \sum_{k=f_{jk}}^N g_k)^2}{\sigma_j^2 + \sum_{k=1}^N \sigma^2_{f_{jk}} g_k^2} \right] \quad (ec. 1)$$

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

Donde σ_{x_j} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) es la incertidumbre de las concentraciones de las j especies medidas, y $\sigma_{f_{jk}}$ es la incertidumbre en la fracción de las j especies en el perfil de la fuente k . (Environmental Protection Agency., 2004).

La relación entre las fuentes de PM_{10} ambiente y las muestras colectadas se evaluará mediante un modelo de receptor basado en el Balance Químico de masa (CMB, por sus siglas en inglés). El CMB determina la contribución de cada fuente y la incertidumbre del cálculo. El modelo CMB utiliza los perfiles de emisión de las fuentes de contaminantes, para estimar su contribución a un receptor específico (Sánchez et al., 1997). Se supone que la concentración total de una especie química en particular en el receptor es la suma lineal de cada contribución individual de diversas fuentes. El modelo de receptor CMB utiliza los resultados del análisis de regresión de mínimos cuadrados de la composición química del material para estimar las contribuciones más apropiadas de distribución según las fuentes.

Antes de ejecutar el modelo, se requiere obtener del conocimiento previo de los perfiles de emisión de las diferentes fuentes que podrían aportar a los niveles de material particulado, observados en un punto de interés (Cooper & Jr, 1980).

Como una suma lineal de los productos de las contribución de las fuentes relacionada con la composición propia y el factor de aporte (Sánchez et al., 1997). El modelo CMB calcula los valores de las contribuciones de cada fuente y las incertidumbres de los valores (William Giraldo Aristizábal, 2011).

5.4.2. pmf.

Otro modelo receptor empleado para estudios de calidad del aire es el Matriz Factorización Positiva (PMF por sus siglas en inglés), dicho modelo receptor se fundamenta en el principio de conservación de masa (Aluanlli Villalobos, 2008). Este modelo presenta variables en

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

el perfil de cada factor, valores positivos ya que la aparición de valores negativos desaparece y es de utilidad en la medida en que no es fácil la interpretación de las contribuciones negativas en los factores obtenidos, así al tener cada concentración una medida de error asociada, el PMF consigue mejores ajustes de los datos que los obtenidos por otros modelos receptores estadísticos (Teixeira, Agudelo-Castañeda, & Mattiuzi, 2015). Resolviendo la siguiente ecuación:

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

Siendo “ X_{ij} ” la concentración media de la especie “j” en la muestra “i”, g_{ik} es la concentración con que la fuente “k” contribuye a la muestra “i”, “ f_{kj} ” fracción másica de la especie “j” en la fuente “k” y “ e_{ij} ” la parte de las medidas que no puede ser explicada por el modelo, llamado residual. Esta ecuación resuelve más de una solución, aportando diferentes factores que se ajusten a los datos experimentales (EPA, 2014).

6. Metodología

6.1 Área de estudio

La Universidad de la Costa (CUC) (Figura 6.1) se encuentra ubicada al nororiente en referencia con el río Magdalena específicamente entre calles 58 y 52 y entre carreras 55 y 66. Su dirección es calle 58 # 55 – 66. Este centro educativo se localiza en la ciudad de Barranquilla, la cual está ubicada sobre la margen occidental del río Magdalena a 7,5 km de su desembocadura en el mar Caribe. Es el principal eje económico de la región caribe colombiana, entre las actividades económicas destacan el comercio y la industria, cuenta con una población de 1 228 621 personas aproximadamente y un amplio parque automotor (Galvis, 2009) (Alcaldía de Barranquilla, 2010).

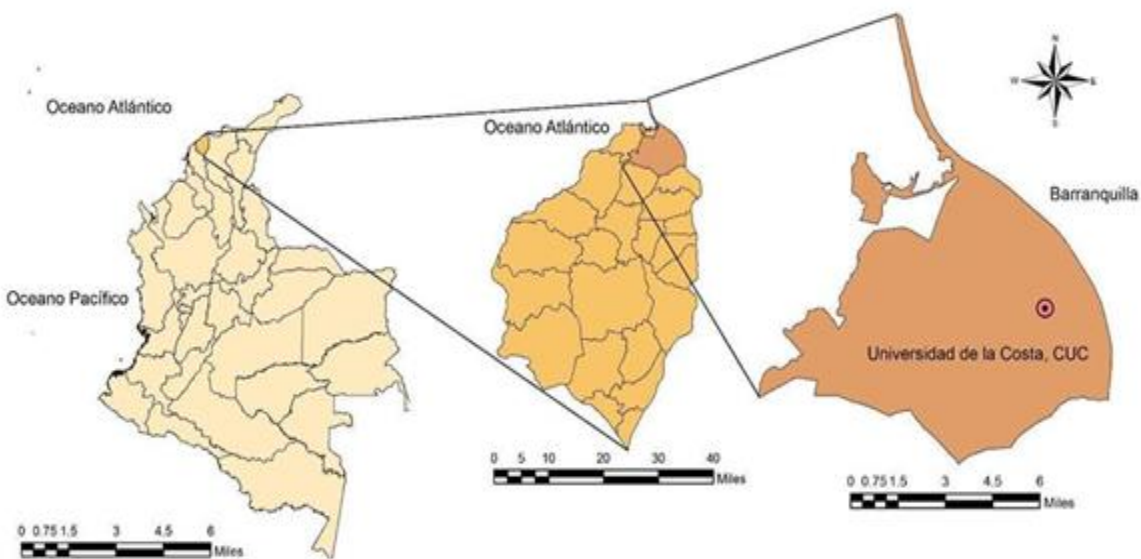


Figura 6.1 Mapa con indicación del área de estudio. (Rugeles Ahumada & Silva Tibabija, 2017).

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS



Figura 6.2 Localización del punto de muestreo en el Área de estudio. Copyright (Google-earth, 2016).

6.2 Protocolo de muestreo

El punto de muestreo se seleccionó de tal manera que cumpliera con los requerimientos citados en el protocolo de muestreo de calidad de aire (MAVDT, 2010), (Figura 6.3) los cuales son: (i) el equipo captador se ubicó de tal manera que estuviese alejado de las salidas de sistemas de aire acondicionado o ventilaciones de edificios, (ii) se evitaron también las zonas de parqueo, depósitos de químicos o de combustibles, (iii) no se emplearon generadores eléctricos para el funcionamiento del equipo de muestreo, (iv) se evitaron sitios muy cercanos a acumulaciones o almacenamiento de residuos sólidos o líquidos, (v) el equipo de muestreo de PM_{10} se instaló, de tal manera que estuviese alejado de carreteras sin pavimento, campos deportivos, lotes sin vegetación o cualquier fuente emisora de material particulado que pudiese alterar la medición.

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

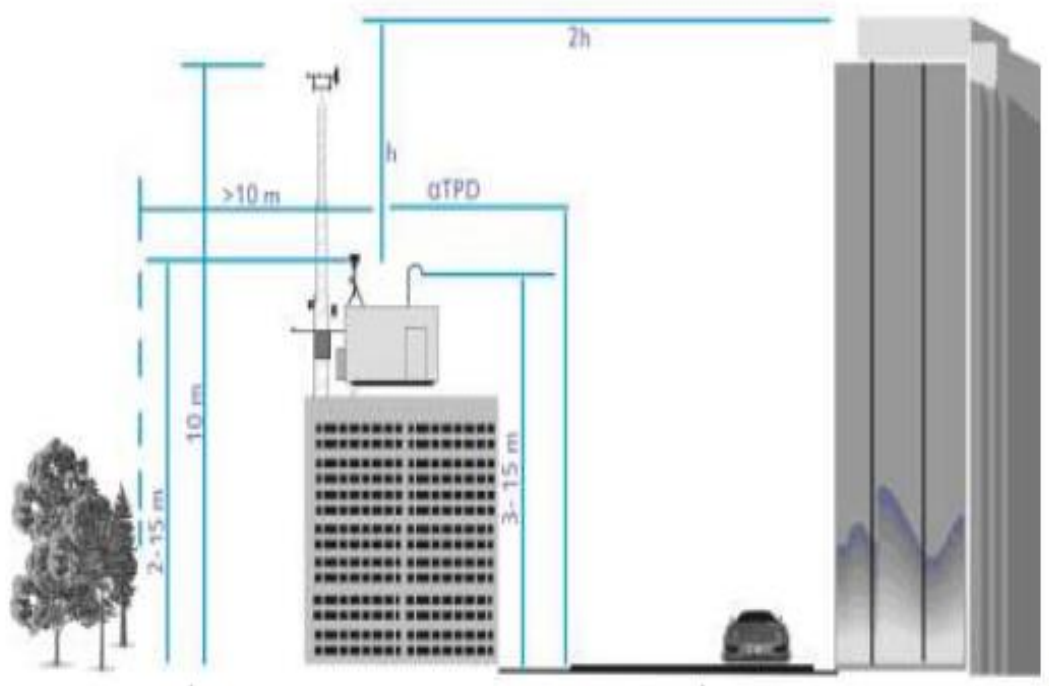


Figura 6.3 Ilustración de las recomendaciones para la ubicación de un punto de muestreo. (MAVDT, 2010).

6.3. Determinación de la concentración de PM_{10}

El muestreo se ejecutó durante un periodo de cuatro (4) meses comprendidos entre abril y julio del 2015, que acuerdo a la información meteorológica de la ciudad corresponden a un periodo transicional entre la temporada seca y la temporada de lluvia, estableciendo una frecuencia de muestreo, de tres días y tiempos de medición de 24 horas continuas, se utilizó un equipo de monitoreo de bajo volumen Partisol Plus 2025 (ver Figura 6.4); que cumple con los requerimientos de la U. S. *Environmental Protection Agency* (EPA). En la figura 6.4, se observa el equipo de medición instalado. Los filtros empleados para la recolección del material particulado fueron filtros de cuarzo marca WhatmanTM. La determinación del material particulado se desarrolló mediante el método gravimétrico, pesando los filtros antes y después de

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

tomada la muestra y los filtros se acondicionaron, dejándolos, un periodo de 24 horas a 25 °C y a una humedad relativa menor del 50 % antes de ser pesados.



Figura 6.4 Equipo de muestreo de bajo volumen Partisol Plus 2025. (Rugeles Ahumada & Silva Tibabija, 2017).

La determinación del material particulado se desarrolló mediante el método gravimétrico, pesando los filtros en una balanza digital antes y después de tomada la muestra. Al tener los datos de pérdida de peso del TGA 50, se determina la concentración de material particulado menor a 10 micras (PM_{10}) por unidad de aire medido, por medio de la siguiente (Forero Gonzalez & Delgado Herrera, 2008).

$$[PM_{10}] = \frac{P_f - P_i}{Q} * 1000000 \left(\frac{\mu g}{m^3} \right) \quad (ec. 3)$$

Dónde: Q es el caudal del aire, calculado en el equipo de muestreo; p_i : Es el peso del filtro limpio; p_f : peso del filtro muestreado; 1000000: factor de conversión de unidades de medidas.

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

Para expresar la concentración del material participado en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, se consideraron las mediciones de presión barométrica y temperatura para lo cual se utilizó la siguiente ecuación establecida en la resolución 601 del 4 de abril del 2006.

$$N.L = N.C.R * \left(\frac{Pb_{local}}{760}\right) * \left(\frac{298^{\circ}K}{273}\right) + t^{\circ}C \quad (ec. 4)$$

Dónde:

N.L. = norma de la calidad de aire local

N.C.R = norma de calidad de aire a condiciones de referencia

Pb_{local} = presión barométrica promedio local, mmHg

t°C = temperatura ambiente promedio local, °C

Luego de haber llevado a cabo el monitoreo en los días estipulados, se procedió a rotular los filtros de acuerdo a la fecha y número de muestra para luego empaquetarlos en bolsitas plásticas como se muestra en la figura 6.5 y disponerlos finalmente en el desecador.

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

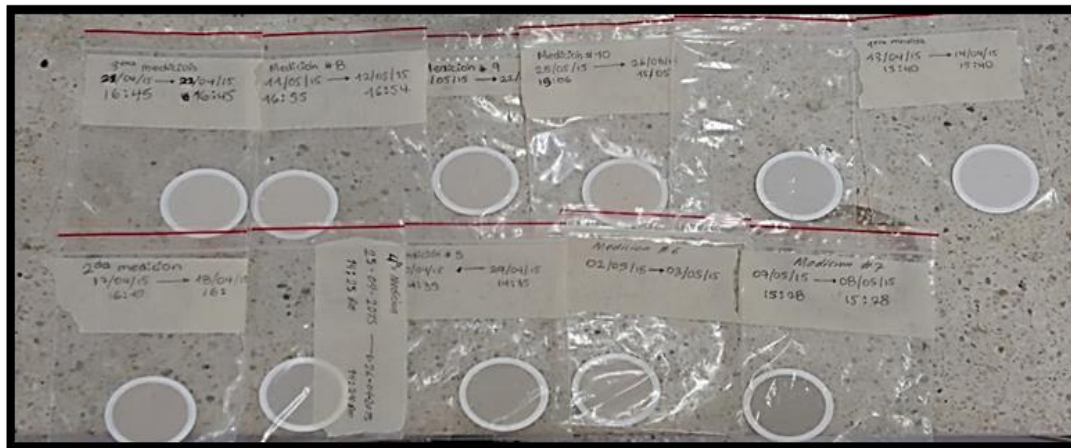


Figura 6.5 Filtros de cuarzos rotulados y acondicionados después de la etapa de muestreo. (Rugeles Ahumada & Silva Tibabija, 2017).

6.4. Determinación de la concentración de especies químicas

Posterior a la etapa de muestreo y al acondicionamiento de los filtros se procedió a cortar cada filtro en cuatro partes iguales para el desarrollo de cada análisis, mediante fluorescencia de rayos X, absorción atómica, TGA y química húmeda que se empleó para determinar ciertos metales y minerales.

Para el análisis de carbono orgánico (C_{org}) y de carbono elemental (C_{elem}), se utilizó la técnica de análisis termo-gravimétrico en atmósfera oxidante; la cual registro la pérdida de peso por ciento de una muestra de prueba mientras que la muestra se calentó a una velocidad uniforme en un entorno adecuado. Mientras que para la determinación de la concentración de iones sulfatos se utilizó el método espectrofotométrico, usando nitrato de potasio como estándar para la curva de calibración y midiendo la absorbancia de la muestra a 220 nm.

Los resultados obtenidos fueron sistematizados para cada contaminante y se realizaron los cálculos estequiométricos de las concentraciones para las diferentes fechas de muestreo, teniendo en cuenta ciertas variables como masa de la fracción del filtro, masa final del filtro completo,

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

concentración de PM₁₀ del filtro en $\frac{\mu g}{m^3}$, masa del contaminante a analizar, tiempo de medición, volumen de aire y flujo del equipo. De acuerdo con la técnica y especie química analizada.

$$Conc. \left(\frac{\mu g}{m^3} \right) = \frac{\frac{C_M (\% P/P) - C_B (\% P/P)}{100} * m(g) * \frac{A_T (cm^2)}{A_C (cm^2)} * 1 \times 10^6 \left(\frac{\mu g}{g} \right)}{v(m^3)} \quad (ec. 5)$$

Donde C_M es la concentración de la muestra, C_B es la concentración del blanco, A_T es el área total del filtro, A_C es el área del filtro medida y v es el volumen de aire muestreado.

6.5 Modelación

6.5.1 modelo receptor cmb 8.2.

“Una de las ventajas al momento de la aplicación del CMB es que requiere un número relativamente pequeño de muestras generalmente menor a 30” (Bruin, Koistinen, Yli-Tuomi, Kephelopoulos, & Jantunen, 2006, p.).

La ejecución de este modelo asume: que (i) las composiciones de las fuentes de emisión son constantes durante el periodo de toma, de muestras en el ambiente y en la fuente; (ii) las especies químicas no reaccionan entre sí; (iii) el número de fuentes es menor que el número de las especies; (iv) los perfiles de las fuentes son linealmente independientes, con un grado importante de diferenciación; para el modelo CMB se construyeron una serie de archivos de entrada con extensión .TXT debido a que la extensión reconocible por el software. Estos archivos en específico describen información necesaria para la ejecución del modelo y la obtención de los resultados (Forero & Delgado, 2008, p. 8).

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

El primer archivo; *Muestras del ambiente receptor*, se realizó un listado, por columnas del lugar, la fecha y el tiempo de muestreo, la fracción de las partículas estudiadas, y las columnas consecutivas se completan con las concentraciones de las especies químicas analizadas en unidades de $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (ver anexo 11.1).

Luego de estudiar el área de influencia donde se realizó el muestreo, se estableció el segundo archivo; se le denominó *perfiles de fuentes*, y en él se consignaron las diferentes variables o actividades industriales que según el conocimiento previo están presentes en el área de estudio, seleccionando las más relevantes como industrias en general, fuente geológica, emisiones de vehículos de diésel, y gasolina, según el conocimiento de los perfiles y considerando que las especies químicas trazadoras de dichas fuentes, estuvieran presentes en el PM_{10} estudiado. Los perfiles de las fuentes fueron extraídos del programa SPECIATE 4.0, de la EPA (Hsu, Strait, & Beck, 2006). Los perfiles se seleccionaron en función de las fuentes locales de emisión existentes en el área de estudio.

Para obtener un mejor ajuste del modelo se crearon 3 archivos más: el primero describió los días de muestreo, el segundo los métodos analíticos utilizados para la determinación de las especies, y el tercero la descripción de las fuentes, todos tres guardados con terminal de extensión “.SEL” (Forero gonzalez & Delgado Herrera, 2008).

Generalmente se preparan los archivos de control para una aplicación determinada seleccionando así la opción de “*Use Control File*” estos archivos comúnmente se usan en modelos de calidad de aire para especificar los archivos de entrada que se solicitarán durante el tiempo de ejecución, de lo contrario, si no se cuenta con un archivo de control se ejecuta el programa con ficheros de entradas específicas seleccionando así, el modo “*Select Individual Input Files*” (ver Figura 6.6).

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

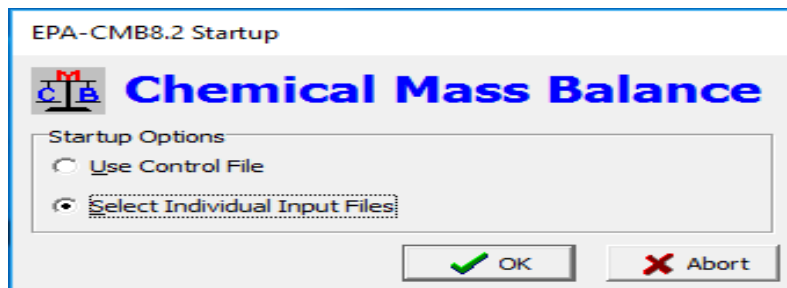


Figura 6.6 Inicio interfaz - EPA-CMB8.2. (Environmental Protection Agency., 2004)

Los archivos descritos anteriormente, fueron ingresados al software del modelo CMB mediante la la interfaz presentada en la Figura 6.7. Ingresadno primero los archivos en formato .txt., datos ambientales y perfiles de origen, por ser obligatorios y luego los opcionales en formato “.sel” de los datos ambientales, especies y perfiles de origenes.

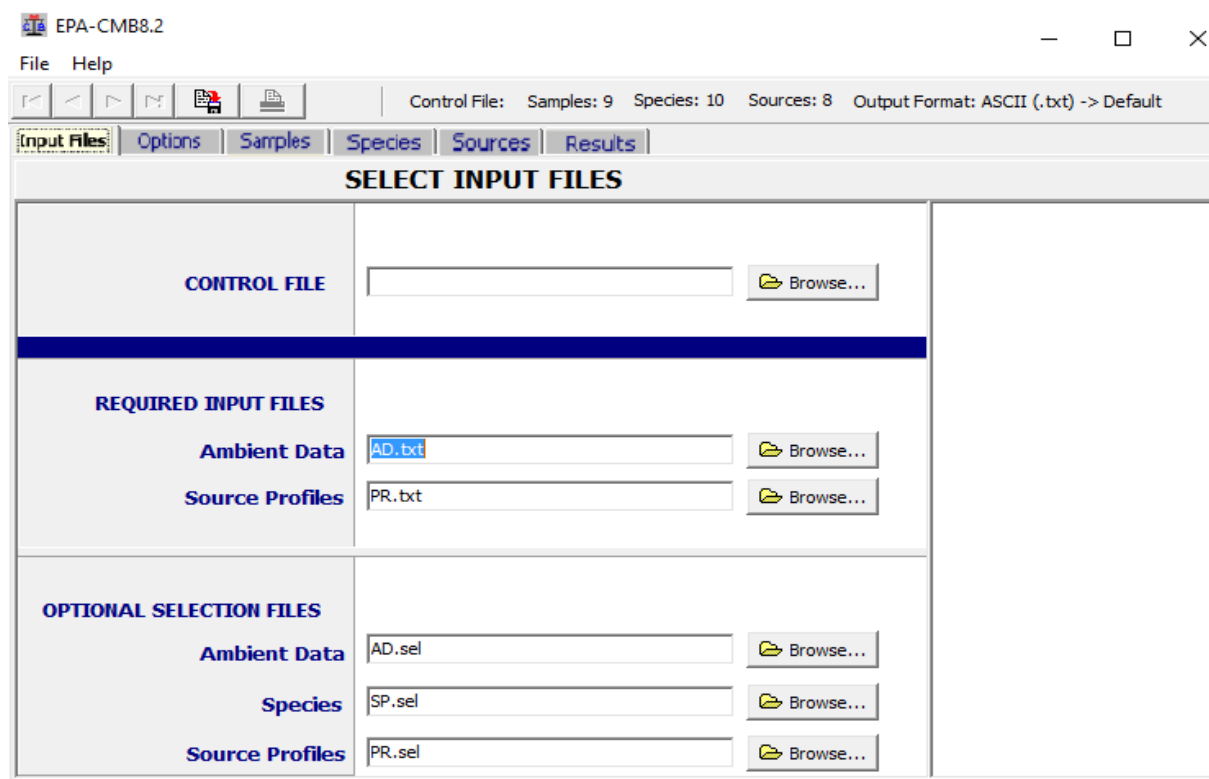


Figura 6.7 Selección de archivos de entrada. (Environmental Protection Agency., 2004)

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

Luego se procedió a establecer las diferentes opciones para la corrida, mediante la pestaña “Options”, que se observa en la figura 6.8, tales como el delta de interacciones aleatorias; con el propósito de que se encuentre solución y/o convergencia aceptable para la corrida; la incertidumbre máxima de la fuente, donde la máxima es un umbral expresado como un porcentaje de la masa total medida que por defecto del modelo es 20%. Mientras que la mínima se estableció un valor predeterminado de 0.95 siendo aceptable en un intervalo 0.0 – 1.0. Luego se ingresaron los decimales a mostrar en los archivos de salida, teniendo en cuenta que en la interfaz solo admite un valor máximo de 6. Por último, se seleccionó las unidades reportadas en los resultados (ver Figura 6.8).

The screenshot shows the EPA-CMB8.2 software window. The title bar reads 'EPA-CMB8.2'. The menu bar includes 'File' and 'Help'. The toolbar contains icons for file operations. The status bar shows 'Control File:', 'Samples: 0', 'Species: 10', 'Sources: 20', and 'Output Format: Comma-separated Value (.csv)'. The 'Options' tab is active, displaying the 'SET OPTIONS FOR CURRENT SESSION' dialog. The options are as follows:

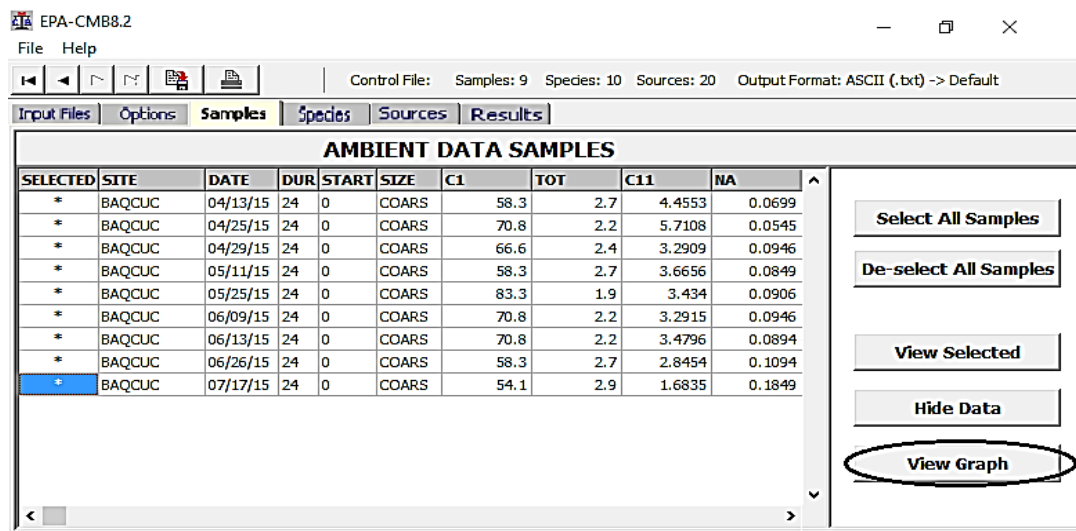
Option	Value
Iteration Delta	20
Maximum Source Uncertainty (%)	20
Minimum Source Projection	0.95
Decimal Places Displayed	5
Measurement Units	µg/m ³
Output File Format	ASCII (.txt) -> Default
Britt and Luecke	<input type="checkbox"/>
Source Elimination	<input type="checkbox"/>
Best Fit	<input type="checkbox"/>
Fit Measure Weights:	
Chi Square	1.000
R Square	1.000
Percent Mass	1.000
Fraction Estimate	1.000

A 'Reset to Default' button is located on the right side of the dialog.

Figura 6.8 Opciones para establecer los datos de la corrida. (Environmental Protection Agency., 2004).

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

A continuación, se seleccionó un conjunto de muestras analizadas en las que se realizó la distribución a las fuentes asociadas, esta arrojó una serie de gráficos útiles, para verificar los archivos de datos de entrada y su información (concentraciones, incertidumbres, fechas de muestreo, etc.) (ver Figura 6.9).



The screenshot shows the EPA-CMB8.2 software interface. The title bar reads 'EPA-CMB8.2'. The menu bar includes 'File' and 'Help'. The status bar shows 'Control File: Samples: 9 Species: 10 Sources: 20 Output Format: ASCII (.txt) -> Default'. The main window has tabs for 'Input Files', 'Options', 'Samples', 'Species', 'Sources', and 'Results'. The 'Species' tab is active, displaying a table titled 'AMBIENT DATA SAMPLES'. The table has the following columns: SELECTED, SITE, DATE, DUR, START, SIZE, C1, TOT, C11, and NA. The data rows are as follows:

SELECTED	SITE	DATE	DUR	START	SIZE	C1	TOT	C11	NA
*	BAQCUC	04/13/15	24	0	COARS	58.3	2.7	4.4553	0.0699
*	BAQCUC	04/25/15	24	0	COARS	70.8	2.2	5.7108	0.0545
*	BAQCUC	04/29/15	24	0	COARS	66.6	2.4	3.2909	0.0946
*	BAQCUC	05/11/15	24	0	COARS	58.3	2.7	3.6656	0.0849
*	BAQCUC	05/25/15	24	0	COARS	83.3	1.9	3.434	0.0906
*	BAQCUC	06/09/15	24	0	COARS	70.8	2.2	3.2915	0.0946
*	BAQCUC	06/13/15	24	0	COARS	70.8	2.2	3.4796	0.0894
*	BAQCUC	06/26/15	24	0	COARS	58.3	2.7	2.8454	0.1094
*	BAQCUC	07/17/15	24	0	COARS	54.1	2.9	1.6835	0.1849

On the right side of the table, there are several buttons: 'Select All Samples', 'De-select All Samples', 'View Selected', 'Hide Data', and 'View Graph'. The 'View Graph' button is circled in red.

Figura 6.9 Muestra de datos ambientales. (Environmental Protection Agency., 2004).

(La pestaña “Species”, nos mostrara la creación del archivo opcional donde se insertaron los datos como elementos, junto con la nomenclatura que se asocia a los perfiles, y el método usado para la determinación de cada especie, se seleccionó todos los elementos para lograr determinar a qué fuente se asoció, utilizando en el cálculo las estimaciones de la contribución a estas fuentes) (Ver figura 6.10).

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

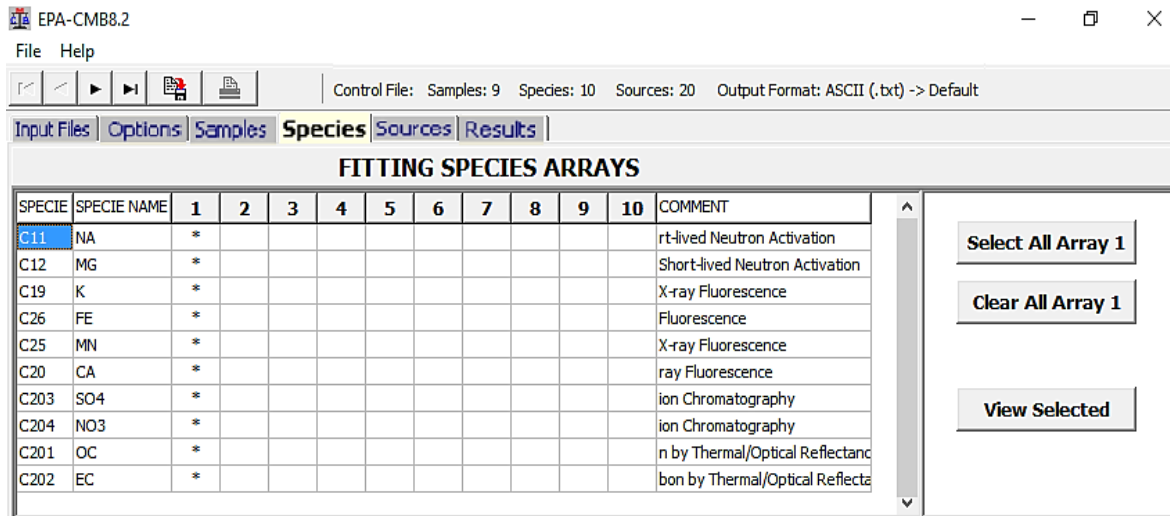


Figura 6.10 Montaje de las especies analizadas. (Environmental Protection Agency., 2004)

En la pestaña “Sources”, inicialmente seleccionamos las fuentes a evaluar de interés teniendo en cuenta el lugar donde se realizó el muestreo, tener en cuenta que el número de muestras debe ser igual o menor al número de fuentes seleccionadas, de lo contrario al momento de hacer la corrida el programa arrojará error, llevando automáticamente a la pestaña de selección de datos ya sea de especies o fuentes (ver Figura 6.11).

Tabla 6.1 Nomenclatura de acuerdo con cada fuente estudiada

MARIN	Aerosol marino
UDUST	Polvo urbano
AUTPB	Escape de auto con plomo
RDOIL	Combustión de aceite residual
KRAFT	Fábrica de papel kraft
ALPRO	Producción de aluminio
STEEL	Alto horno de acero
FERMN	Horno de ferromanganeso

Nota. Las palabras del lado izquierdo indican el nombre designado para cada tipo de fuente empleada por el modelo receptor en su interfaz de usuario. (Environmental Protection Agency., 2004)

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

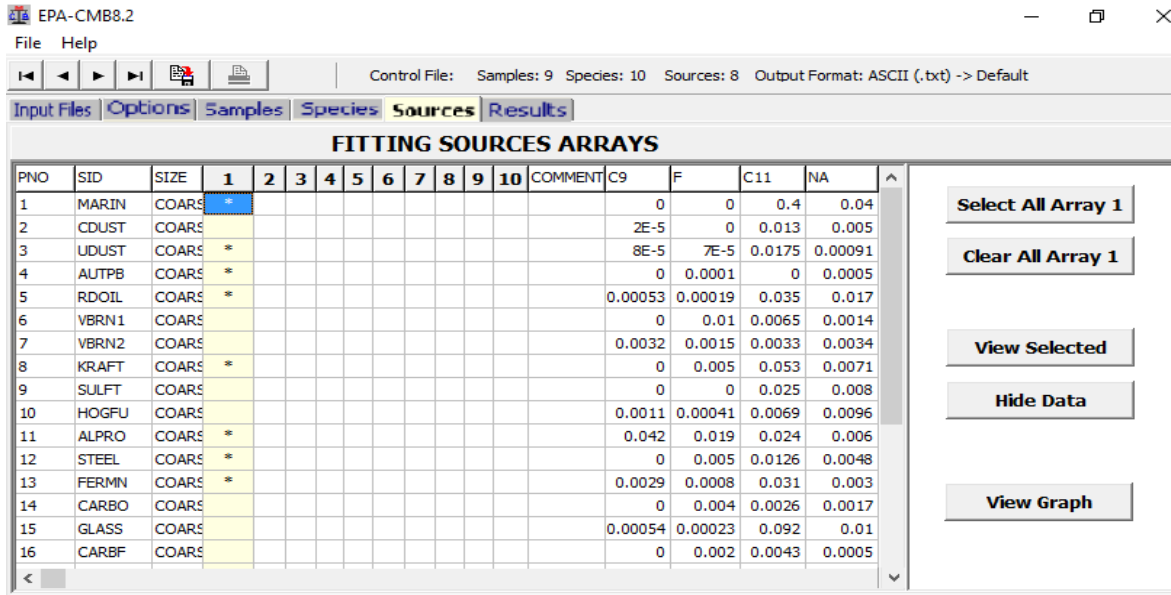


Figura 6.11 Montaje de fuentes a asociar. (Environmental Protection Agency., 2004).

Por último, en resultados al iniciar la corrida “Run” se generaron los reportes iniciales, las contribuciones de las especies y una Matriz Pseudo-Inversa Normalizada Modificada (MPIN) (ver Figura 6.12).

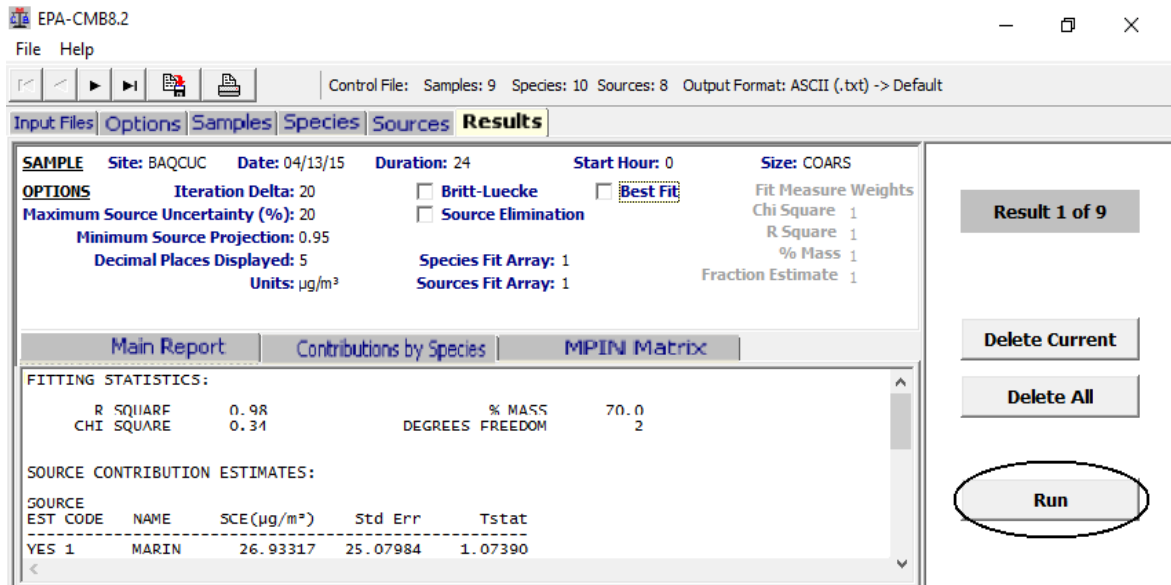


Figura 6.12 Resultados – Informe principal / Contribución de especies / (MPIN) matriz. (Environmental Protection Agency., 2004).

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

6.5.2 modelo receptor pmf 5.0.

El primer paso en la modelación fue dar el formato adecuado a la base de datos para que el modelo PMF pueda leer la información. Al modelo PMF se ingresaron dos archivos de entrada, el primero de ellos correspondió al listado de concentraciones de las especies medidas (*concentration data file*) donde se encuentran organizadas por filas según la fecha de medición los elementos químicos medidos, en formato de Excel o archivos de texto. El segundo archivo, *Uncertainty data file*, contenía las incertidumbres asociadas a cada medición calculadas empleando la ecuación número 5. Un ejemplo de este tipo de archivo se presenta en el Anexo 11.2. El segundo archivo de entrada es muy similar al primero (ver Anexo 11.2).

En la tabla 6.2 se presenta el primer archivo de entrada, el cual contiene datos como, fechas y concentraciones por elementos y compuestos determinados, para este archivo se organiza los datos de la siguiente manera en una hoja de excel.

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

Tabla 6.2 Ejemplo de archivo de entrada “Concentration Data File”

Fecha	PM ₁₀	Na	Cl	SO ₄	Mg	Ca	K	Fe	P	Sr	OC	EC
4/13/2015	59.32	4.53	133.6	15.68	6.28	0.160	2.22	17.63	0.32	0.01	24.11	0.44
4/17/2015	139.8	3.71	84.52	23.59	7.19	0.162	4.21	19.38	0.67	0.01	24.01	0.53
4/21/2015	51.06	33.39	26.52	12.84	8.56	0.157	1.09	0.22	0.32	0.32	0.00	0.00
4/25/2015	72.03	5.81	103.7	23.87	7.53	0.162	3.56	18.44	0.88	0.00	20.16	0.86
4/29/2015	68.38	3.38	101.3	30.24	7.70	0.165	4.62	20.77	1.01	0.01	34.33	0.00
5/2/2015	63.83	36.91	28.85	16.55	9.13	0.178	2.10	0.71	0.36	0.36	12.62	0.00
5/7/2015	119.1	3.74	87.57	22.37	7.84	0.160	4.64	19.17	0.35	0.01	28.00	0.41
5/11/2015	59.57	3.74	114.5	17.41	7.85	0.163	3.94	19.77	2.22	0.01	19.12	0.62
5/21/2015	59.07	3.80	107.3	18.38	6.84	0.160	3.47	18.27	0.21	0.00	18.94	0.84
5/25/2015	84.75	3.49	112.2	16.77	7.59	0.158	3.90	19.55	1.44	0.01	19.05	0.25
5/30/2015	43.48	2.62	136.1	14.35	5.93	0.162	2.11	18.05	0.26	0.01	25.29	0.65
6/4/2015	51.06	27.49	18.50	13.56	4.39	0.157	0.46	0.32	0.32	0.32	12.62	0.00
6/9/2015	72.34	4.19	99.59	18.40	7.49	0.160	4.03	18.91	1.09	0.01	19.94	1.31
6/13/2015	76.58	4.05	132.5	21.82	8.95	0.174	4.64	23.64	3.30	0.03	31.27	0.63
6/22/2015	42.37	3.53	125.5	10.82	7.54	0.158	3.43	19.48	1.69	0.01	23.06	0.66
6/26/2015	59.32	29.73	23.54	9.47	4.53	0.154	0.57	0.31	0.31	0.31	12.62	0.00
7/17/2015	33.90	2.34	128.6	14.36	6.32	0.157	2.70	17.96	0.91	0.01	23.68	0.78
7/28/2015	50.23	33.08	28.19	13.43	6.57	0.177	1.59	0.35	0.35	0.35	12.62	0.00
7/30/2015	46.61	4.91	104.3	15.64	6.79	0.156	3.18	17.79	0.24	0.00	26.05	0.78

Nota. La tabla denota uno de los archivos de entrada introducidos al modelo en el cual se especifican las concentraciones de ciertas especies químicas y las fechas del monitoreo en la cual se obtuvieron esos datos. (Rugeles Ahumada & Silva Tibabija, 2017).

Las incertidumbres fueron calculadas teniendo en consideración los límites de detección de las técnicas analíticas implementadas. Para las especies químicas medidas por FRX y que registraron resultados de concentración superiores al límite de detección (0,02 % m/m), se utilizó la ecuación 6:

$$\Delta con = conc_0 \left(\frac{\Delta(\%^p/p)}{(\%^p/p)} + \frac{(\Delta m)}{(m)} + \frac{(\Delta v)}{(v)} \right) \quad (ec. 6)$$

Donde $\%^p/p$ corresponde a la concentración en masa arrojada por la técnica de FRX, $\Delta\%^p/p$ la incertidumbre de la medición, m_0 es la masa, Δm es la incertidumbre de la balanza analítica (0.0001 gr), v_0 es el volumen de aire muestreado, Δv es la incertidumbre del volumen de aire muestreado por el equipo de medición Partisol (0,1 m³). Mientras que para la determinación

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

de carbono orgánico y carbono elemental que se desarrolló mediante la técnica termogravimétrica se empleó la siguiente ecuación:

$$\Delta con = conc_0 \left(\frac{(\Delta m)}{(m)} + \frac{(\Delta v)}{(v)} \right) \quad (ec. 7)$$

Donde Δm corresponde es límite de detección de la termo-balanza, m es la masa de filtro luego de ser calentado, Δv y v corresponden a las mismas variables reportadas en la ecuación 7. Se ingresaron los archivos organizados de concentración en archivo de datos de concentración (*Concentration Data File*), e incertidumbres en archivo de datos de incertidumbre (*Uncertainty Data File*), se procedió a seleccionar una ruta de carpeta de salida (*Output Folder*) con el propósito de elegir un destino final a donde queramos que se guarde lo trabajado, se le asignó un nombre aleatorio al archivo de salida (*Output File Prefix*) y procedió a interactuar con las demás pestañas donde nos mostró una serie de análisis y/o resultados de interés (ver Figura 6.13).

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

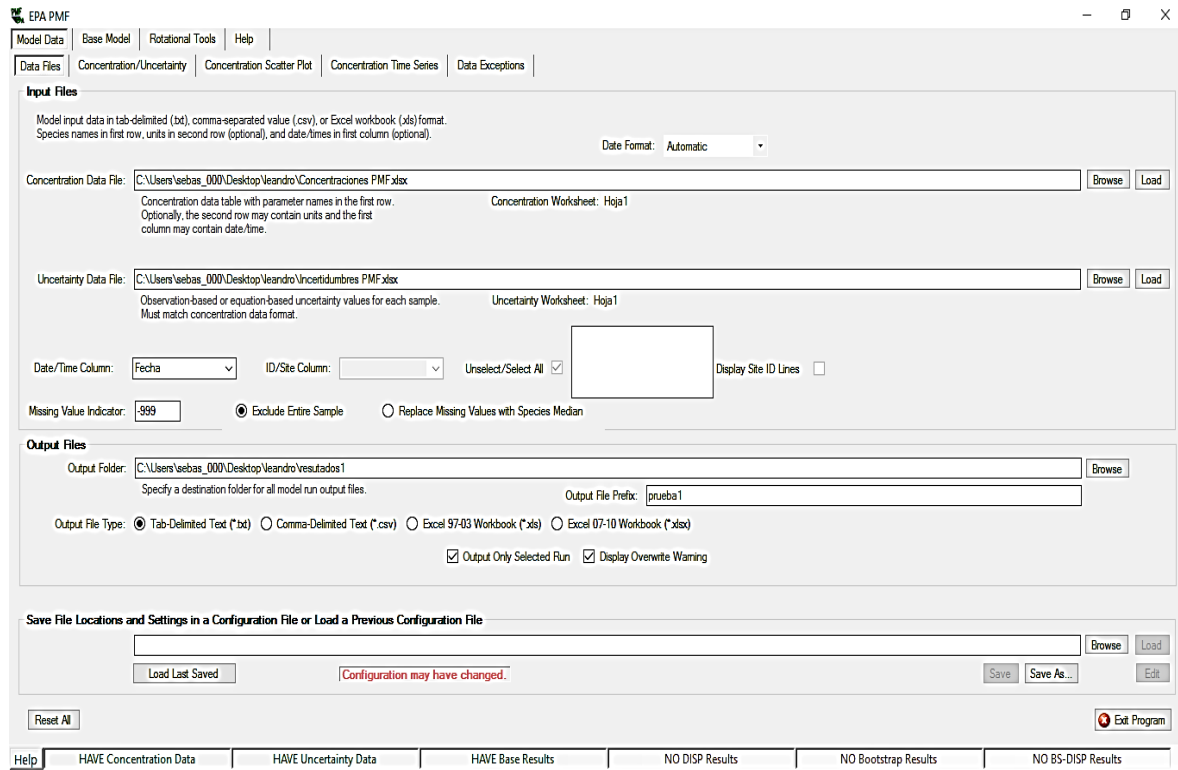


Figura 6.13 Interfaz inicial PMF 5.0 para la entrada de archivos correspondientes. (Environmental Protection Agency., 2004).

Se clasificaron los diferentes elementos como “Strong”, “Weak”, “Bad” teniendo en consideración la “Señal/Ruido” (S/N), las estadísticas de resumen y de concentración frente a las parcelas de incertidumbre, con el propósito de evaluar las variables de entrada e identificar los puntos de resultados aislados, (se debió considerar muestras débiles debido a que en el protocolo establecido en manual para PMF no se recomienda utilizar la masa total como variable). Para la siguiente corrida se consideran los siguientes elementos y/o compuestos como “Strong”; Na, SO₄, Mg, Fe, OC. “Weak”; Cl, K, EC. “Bad”; Ca, P, Sr, como requerimiento adicional se alteró a un 13,7% de modelado adicional Incertidumbre como opción de (0 - 100%) con el propósito de calcular “sigma”, que corresponde a la incertidumbre total (incertidumbre de modelado más incertidumbre de especie / muestra específica), actualizando todos los gráficos de concentración / incertidumbre para reflejar el aumento de la incertidumbre. (Ver Figura 6.14).

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

Species	Cat	S/N	Min	25th	50th	75th	Max	% Modeled Samples	% Raw Samples
PM10	Strong	10.0	33.90000	50.23000	59.32000	72.34000	139.83000	100.00 %	100.00 %
Na	Strong	10.0	2.34075	3.52690	4.04694	27.48557	36.90766	100.00 %	100.00 %
Cl	Weak	10.0	18.50264	28.84860	103.79390	125.49740	136.11000	100.00 %	100.00 %
SO3	Strong	10.0	9.46525	13.56123	16.54604	21.82206	30.23529	100.00 %	100.00 %
Mg	Strong	10.0	4.38885	6.31532	7.49298	7.84000	9.12885	100.00 %	100.00 %
Ca	Bad	0.0	0.15466	0.15787	0.16013	0.16351	0.17830	0.00 %	100.00 %
K	Weak	6.6	0.45783	2.10391	3.43200	4.03468	4.64002	100.00 %	100.00 %
Fe	Strong	10.0	0.22102	0.71319	18.27044	19.48492	23.63620	100.00 %	100.00 %
P	Bad	1.7	0.20816	0.31574	0.35660	1.08872	3.29686	0.00 %	100.00 %
Sr	Bad	0.0	0.00471	0.00650	0.01145	0.30932	0.35660	0.00 %	100.00 %
OC	Strong	9.5	0.00190	12.62000	20.16322	25.28696	34.33470	100.00 %	100.00 %
EC	Weak	6.8	0.00190	0.00190	0.53203	0.78119	1.31183	100.00 %	100.00 %

Species Category Settings: Strong Weak Bad Total Variable (Defaults to Weak)

Figura 6.14 Concentration/Uncertainty, Clasificación a “Strong, Weak, Bad” de los diferentes elementos de manera aleatoria. (Rugeles Ahumada & Silva Tibabija, 2017).

En la Figura 6.15 se observa el comportamiento de los elementos y compuestos seleccionados de acuerdo a la corrida establecida en PMF (PM₁₀, Na, SO₄, Mg, Fe y OC) teniendo en cuenta la selección de los datos como “Strong”, basándonos en el material particulado PM₁₀, siendo el componente principal estudiado, observamos que para los demás elementos y compuesto el comportamiento es tolerable debido a que presentan una tendencia similar en los valores de sus concentraciones de acuerdo al gráfico a excepción del Na (ver Figura 6.15).

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

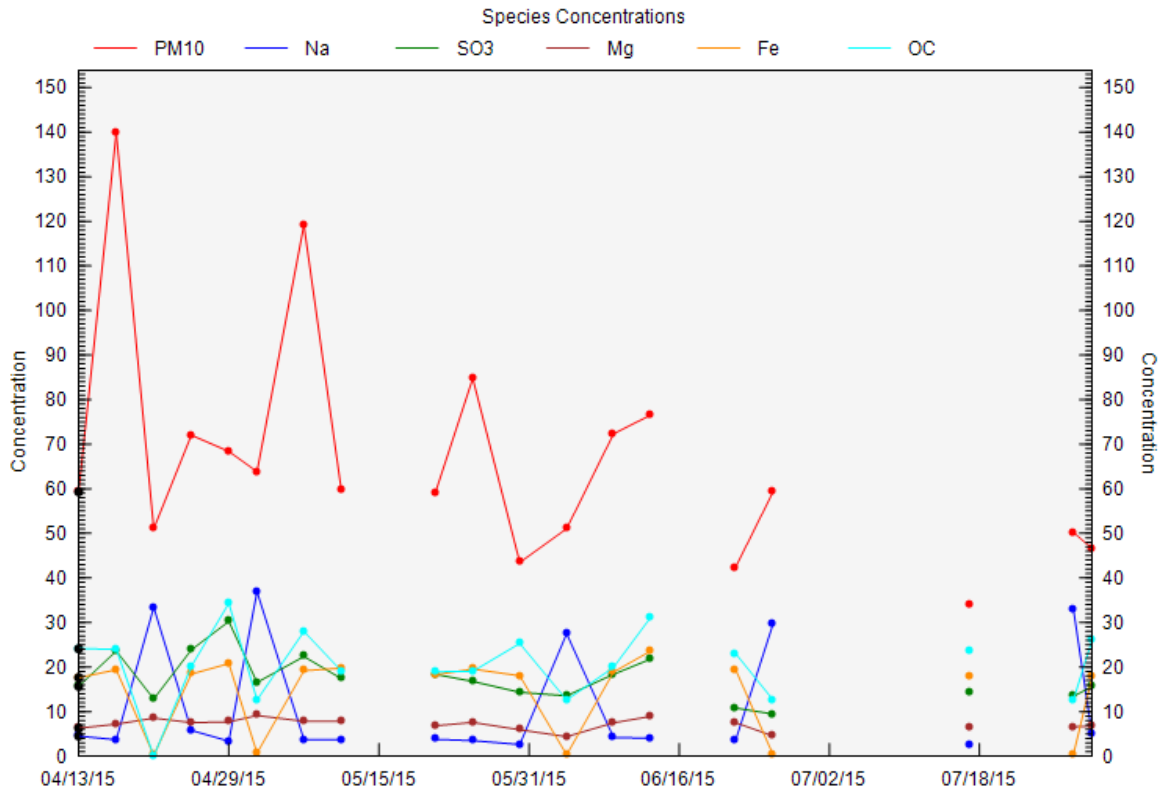


Figura 6.15 Concentraciones de elementos seleccionados con respecto a las fechas analizadas. (Rugeles Ahumada & Silva Tibabija, 2017).

Continuando con el manejo de los datos de entrada, al final de la pestaña “*Model Data*” encontramos “*Data Exceptions*” donde podemos observar los elementos y compuestos que se clasifican ya sea como “*Weak y Bad*” “*User-Excluded Samples*” y “*Samples Excluded Due to Missing Values*” de forma manual, categorizado en el listado principal de forma aleatoria. De acuerdo al proceso de la corrida del modelo, siendo excepcionales tenemos los siguientes; para “*Weak*” Cl, K, EC y “*Bad*” Ca, P, Sr. El programa no tiene en cuenta muestras excluidas por el usuario y/o muestras excluidas debido a valores ausentes (ver Figura 6.16).

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

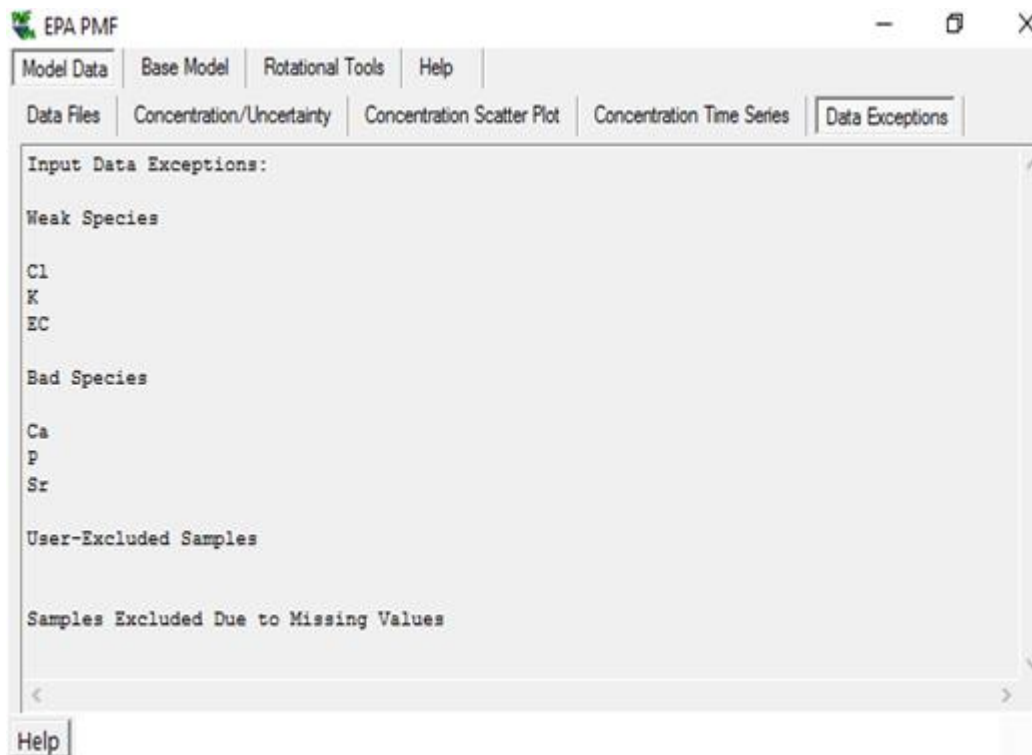


Figura 6.16 Datos Excepcionales de acuerdo a la selección a aleatoria de los elementos y compuestos, (*Strong, Weak and Bad, User- Excluded Samples, Samples Excluded Due to Missing Values*). (Rugeles Ahumada & Silva Tibabija, 2017).

Finalmente para dar inicio a la corrida, pasamos a la siguiente pestaña llamada “*Base Model*”, en “*Base Model Runs*” procedemos a interactuar con la interfaz dando valores arbitrarios, al número de corridas y números de factores al cual queremos que el modelo corra ajustándose al valor más real cercano para realizar los análisis respectivos basándonos a estudios realizados anteriormente, para esta prueba aplicamos un “*Number of Runs*” de 20 y un “*Number of Factors*” de 5, los demás valores quedan ajustados automáticamente por el modelo (ver figura 6.17).

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

Figura 6.17 Base Model / Base Model Runs – Datos a manejar; Number of Runs and Number of Factors. (Rugeles Ahumada & Silva Tibabija, 2017).

Luego de dar “Run” en la interfaz, se arroja un resumen del modelo de base de acuerdo al número de corridas que en este caso fueron 20 con el fin de minimizar el margen de error estadístico tomando de forma automática un valor ajustable al modelo “Run Number 18” con un Q robusto (44,5), Q cierto (44,5) y convergido (YES) siendo esto favorable para interpretar los resultados a continuación (Ver figura 6.18).

Run Number	Q (Robust)	Q (True)	Converged
1	84.1	82.9	No
2	83.4	79.6	No
3	126.7	113.0	No
4	328.2	349.1	No
5	369.2	427.4	No
6	60.2	59.2	No
7	357.7	355.0	No
8	175.6	174.7	No
9	238.8	221.4	No
10	233.5	240.4	No
11	78.5	77.7	No
12	113.6	104.5	No
13	240.7	242.8	No
14	148.5	145.9	No
15	44.5	44.5	Yes
16	198.5	197.9	No
17	79.6	76.4	No
18	44.5	44.5	Yes
19	291.4	310.6	No
20	142.6	139.6	No

Figura 6.18 Resumen de las 20 corridas efectuadas por el modelo PMF 5.0. (Rugeles Ahumada & Silva Tibabija, 2017).

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

Q teórico se considera un buen punto de partida para la interpretación de la solución. El valor teórico (Q_{true}) de Q se calculó usando la siguiente ecuación 8:

$$Q_T = M * N - P(M + N) \quad (ec. 8)$$

Donde M es el número de variables, N es el número de muestras, P es el número de factores seleccionados en el modelo

$$Q_T = 10 * 19 - 5(10 + 19) \quad (ec. 8)$$

$$Q_T = 45$$

Tabla 6.3 Corrida número 18 del modelo PMF

Run Number 18	
Q robusto	Q teórico
44.5	45

Nota. Valores estadísticos arrojados por el modelo para interpretar la certeza de los datos en las diferentes corridas. (Rugeles Ahumada & Silva Tibabija, 2017)

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

7. Resultados

7.1 Resultados monitoreo

De acuerdo a la tabla 7.1 se observa la concentración en masa de PM₁₀ durante la campaña de medición. Los valores más altos fueron 137,5 y 116,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para el 17 de abril y el 07 de mayo del 2015, respectivamente. En estas fechas se evidenciaron episodios de quema ilegal de bosques en zonas cercana al área de estudio, que tuvieron afectaciones evidentes en la ciudad y que parecen generar la superación e incumplimiento del límite diario permitido, el cual es de 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para tiempos de exposición de 24 horas según la resolución no. 610 del año 2010.

Tabla 7.1 Datos de concentración general de acuerdo a las fechas monitoreadas

NUMERO	FECHA	MASA (g)	VOLUMEN	
			MUESTREADO (m^3)	CONCENTRACION ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
1	4/13/2015	0,1517	23,6	58,3
2	4/17/2015	0,1535	23,6	137,5
3	4/21/2015	0,1502	23,5	50
4	4/25/2015	0,1536	23,6	70,8
5	4/29/2015	0,1549	23,4	66,7
6	2/5/2015	0,1549	23,5	62,5
7	7/5/2015	0,1504	23,5	116,6
8	11/5/2015	0,1537	23,5	58,3
9	5/21/2015	0,1518	23,7	58,3
10	5/25/2015	0,1492	23,6	83,3
11	5/30/2015	0,1495	23	41,7
12	4/6/2015	0,1497	23,5	50
13	9/6/2015	0,1505	24,0	70,8
14	6/13/2015	0,1549	23,5	70,8
15	6/18/2015	0,1500	22,2	66,7
16	6/22/2015	0,1493	23,4	41,7
17	6/26/2015	0,1541	23,6	58,3
18	6/30/2015	0,1513	23,6	33,3
19	7/04/2015	0,1501	23,6	50

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

NUMERO	FECHA	MASA (g)	VOLUMEN	
			MUESTREADO (m ³)	CONCENTRACION (µg/m ³)
20	7/08/2015	0,1494	23,6	54,2
22	7/13/2015	0,1483	23,6	33,3
23	7/17/2015	0,1536	23,6	54,2
24	7/24/2015	0,1550	23,5	54,2
25	7/28/2015	0,1481	21,9	45,8
PROMEDIO				63,1

* Medición no tomada en cuenta debido a inconvenientes con la integridad del filtro

Nota. Datos de concentración generales de todas las fechas de monitoreo incluyendo la masa en gramos y el volumen de aire muestreado por el equipo captador. (Rugeles Ahumada & Silva Tibabija, 2017).

De las medidas realizadas el 9,1% superan el nivel máximo de 100 µg/m³, permitido para tiempos de exposición de 24 horas por la normatividad nacional colombiana, la cual es la Resolución 610 del 2010 (Costa, 2010); el 75 % de las mediciones superan el valor de referencia media diaria de 50 µg/m³ presentado por la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2016) y por la Unión Europea (Comisión Europea, 2008). El rango de concentración de material particulado PM₁₀, se encontró entre 53,3 y 137,5 µg/m³ con un valor promedio de 63,1 ±26,00 µg/m³.

De manera general, la comparación con las normativas vigentes a nivel mundial y nacional de nuestro país Colombia, se notó que las concentraciones promedio lograron no ser tolerables de acuerdo con los límites máximos permisibles establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS), en cambio a comparación con la normativa vigente en Colombia 610/2010 son concentraciones consideradas admisibles, dejando abiertas discusiones a los diferentes casos presentados y que se podrían presentar a futuro (ver figura 7.1).

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

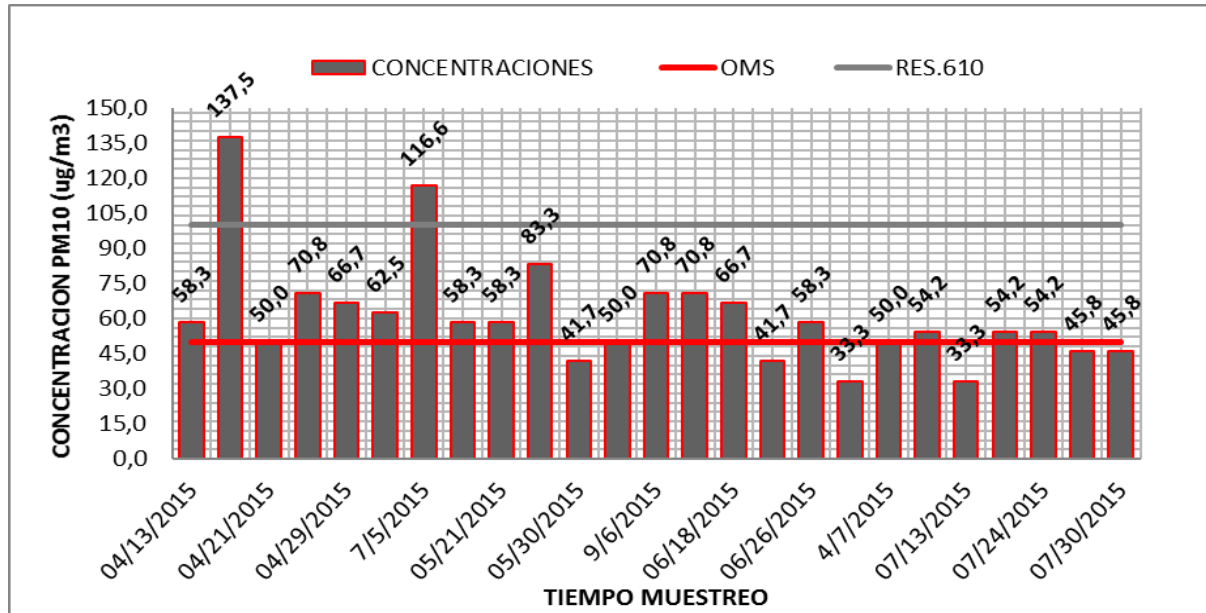


Figura 7.1 Concentraciones de PM₁₀ obtenidas durante el periodo de muestreo. (Rugeles Ahumada & Silva Tibabija, 2017).

Tabla 7.2 Estudios realizados sobre PM₁₀ en Colombia

Ciudad	Concentración de PM ₁₀ (µg/m ³)	Referencia
Riohacha	43,7*	(Colombiano et al., 2013)
Santa Marta	49,0*	(Vergara & Garcia, 2013)
Santiago de Cali	49,7*	(Pablo & Vinasco, 2015)
Manizales	43,0* (para 2011) 45,0* (para 2012)	(Cortes, 2013)
Medellín	61,0**	(Vásquez, 2013)
Bogotá	43,0*	(Valderrama, Rojas, & Gómez, 2006)
	41,4*	(F. A. Vargas, Rojas, Pachon, & Russell, 2012)
Barranquilla	65,94*	Autores

*Época seca

**Dos estaciones de monitoreo

Nota. Recopilación de resultados en otras ciudades de Colombia donde se analizó la concentración de PM₁₀.

En la Tabla 7.2 se muestran estudios llevados a cabo en otras ciudades de Colombia en periodos de tiempo cercanos al del estudio realizado en este trabajo. En esta tabla se evidencia

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

que Medellín es la ciudad más afectada por este contaminante debido a su elevada concentración de $61,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ seguido por Santiago de Cali, Bogotá y Santa Marta con concentraciones similares de $49,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $49,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $49,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. Los estudios llevados a cabo en estas ciudades brindan una idea de diagnóstico en materia de calidad de aire para así poder entender mejor que tan afectados se encuentran otros centros urbanos en relación a la ciudad donde se realizó el estudio, sin embargo se debe tener en cuenta que las características de topografía y relieve de las ciudades, las condiciones climáticas presentadas durante los meses de muestreo y el número de estaciones empleadas para llevar a cabo el monitoreo, pueden influenciar significativamente sobre el comportamiento de este contaminante en particular.

Al comparar la concentración promedio mensual de PM_{10} , se encontró para el mes de abril una concentración promedio de $77 \mu\text{g}/\text{m}^3$, para mayo de $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$, para junio de $56 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y para julio $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de material particulado siendo la de abril la más alta y la de julio la más baja, esto posiblemente debido a las quemadas efectuadas al otro lado del río Magdalena durante el periodo de monitoreo así mismo como a las condiciones meteorológicas de viento y precipitaciones presentadas durante los meses de junio y julio. La figura 7.2 presenta el gráfico de caja y bigote de los resultados de concentración de partículas suspendidas ordenadas por mes. Sin embargo, como se observa en esta figura, no existe diferencia significativa entre las medias, debido a que todas las cajas se solapan. Resultado que se verificó analíticamente.

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

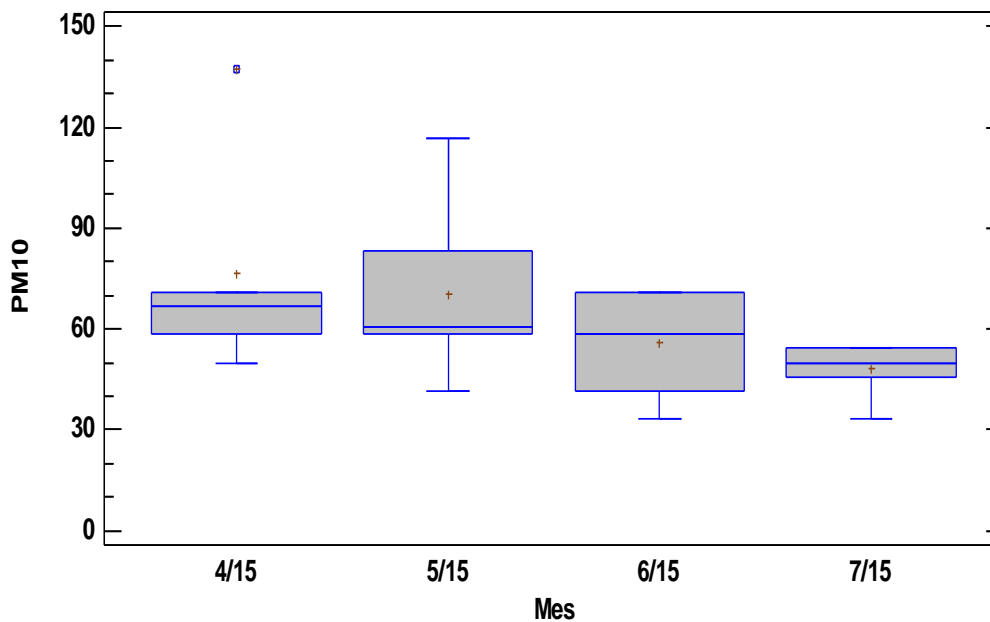


Figura 7.2 Concentración promedio mensual de PM_{10} (ug/m^3). (Rugeles Ahumada & Silva Tibabija, 2017).

7.2 Composición química del PM_{10}

De acuerdo a la caracterización química efectuado en el PM_{10} (concentraciones de todas las muestras evaluadas están presentadas en el Anexo 2), se realizó un análisis estadístico, obteniendo el promedio aritmético del conjunto de valores obtenidos para cada una de las especies, el valor mínimo y máximo de estos valores, y por último la medida de dispersión que se da en los valores con respecto al valor promedio (Desviación Estándar) (ver Tabla 7.3).

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

Tabla 7.3 *Parámetros estadísticos de la concentración de especies químicas medidas en el PM₁₀. (Desviación estándar de la muestra)*

Especie	Promedio (µg/m³)	Mínimo (µg/m³)	Máximo (µg/m³)	Desv. (µg/m³)
PM₁₀	63,1	33,90	139,83	26,00
Na	11,29	2,34	36,91	12,93
SO₄²⁻	17,34	9,47	30,24	5,13
Mg	7,11	4,39	9,13	1,27
Ca	0,16	0,15	0,18	0,01
K	2,97	0,46	4,64	1,36
Fe	14,25	0,22	23,64	8,62
P	0,85	0,21	3,30	0,82
Sr	0,09	<0,16	0,36	0,15
OC	20,39	<0,0019	34,33	7,94
EC	0,46	<0,0019	1,31	0,39

<L.D. indica que el valor se encuentra por debajo del límite de detección.

Nota. La tabla indica los valores estadísticos de las especies químicas analizadas resaltando en negrita cuales fueron los que se encontraron en mayor proporción y especificando cuales se encontraron por debajo del límite de detección del método empleado. (Rugeles Ahumada & Silva Tibabija, 2017).

Se nota que el comportamiento de las especies químicas demuestra un análisis químico efectuado de manera admisible durante el periodo de muestreo, debido a que va acorde con el componente principal estudiado de manera general como lo es masa total de material particulado (PM₁₀) (Ver Figura 7.3).

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

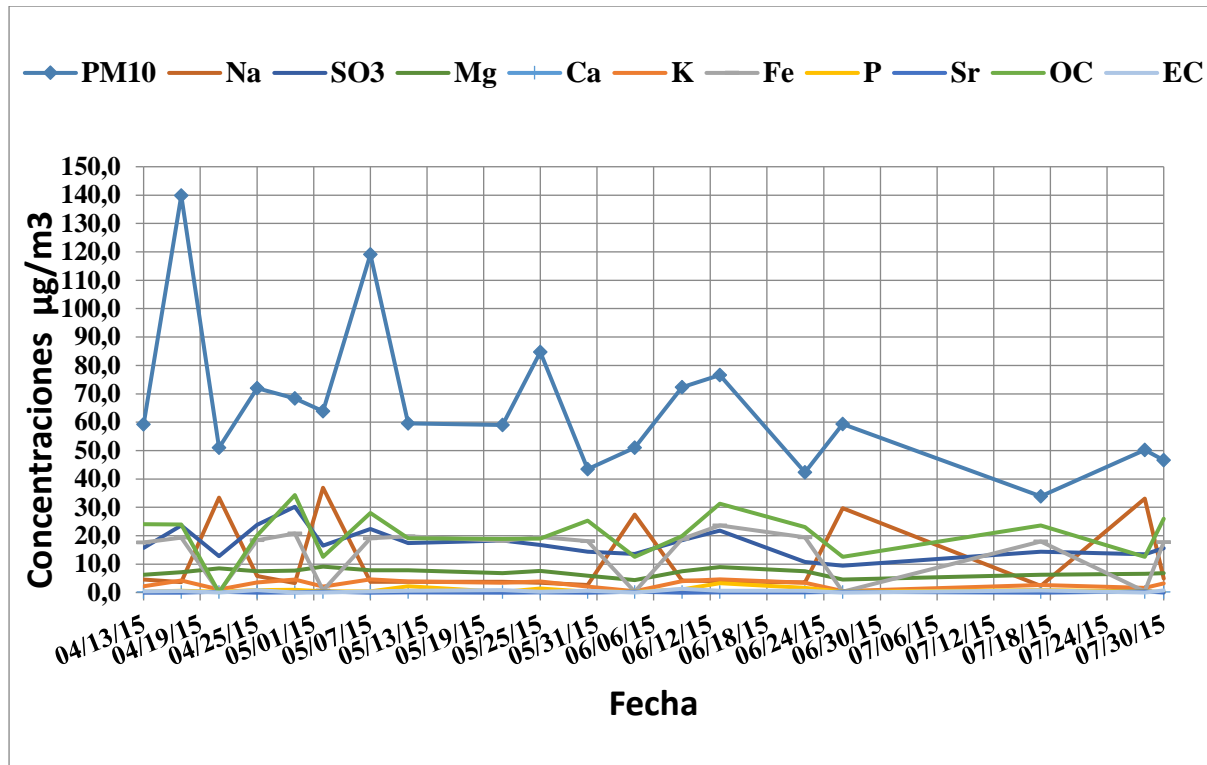


Figura 7.3 Concentración de componentes determinados en el material particulado PM₁₀. (Rugeles Ahumada & Silva Tibabija, 2017)

Las especies más abundantes durante el periodo de muestreo son, Sodio (Na), Carbono Orgánico (OC), Óxido de Azufre (SO₄), y Hierro (Fe), mientras que para los menos abundantes se observa el Magnesio (Mg), Potasio (K), Fósforo (P), Carbono Elemental (EC), Calcio (Ca), Estroncio (Sr).

7.2.1 correlación entre carbono orgánico y carbono elemental.

La Figura 7.4 muestra una línea de tendencia central que incrementa en la mayoría de las muestras dando a entender una relación proporcional entre el carbono orgánico y el carbono elemental en la mayoría de las muestras analizadas como se muestra en los datos de la tabla 7.4. El EC es producto principal de la combustión incompleta, mientras que el OC, es de tipo antropogénico y puede emitirse directamente en el aire o formarse en la atmósfera por medio de

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

reacciones de precursores orgánicos con especies oxidativas (Jones & Harrison, 2005; Samara et al., 2014).

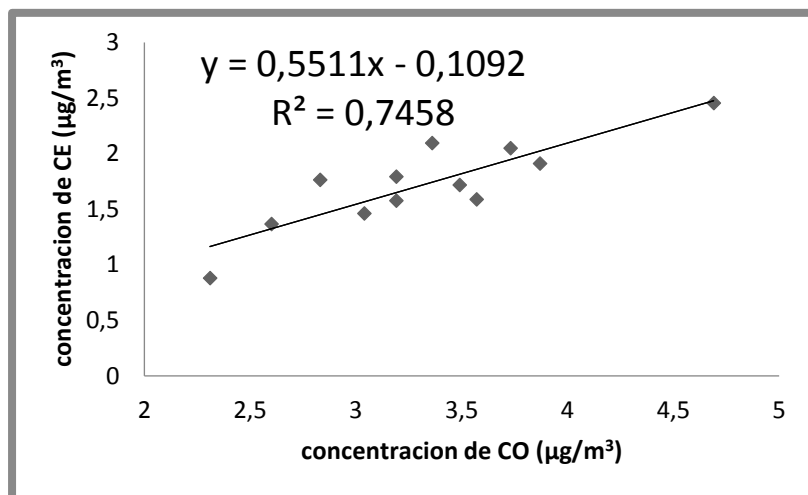


Figura 7.4 Muestra la correlación entre carbono orgánico y carbono elemental. (Rugeles Ahumada & Silva Tibabija, 2017).

La relación directa entre OC y EC demuestra que provienen principalmente de las emisiones por el tráfico. En lo que respecta a los mecanismos de formación, las partículas pueden ser emitidas como tales a la atmósfera (primarias) o bien ser generadas por reacciones químicas (partículas secundarias). Dichas reacciones químicas pueden consistir en la interacción entre gases precursores en la atmósfera para formar una nueva partícula por condensación (Muñoz Prada & García Robayo, 2011). Dentro de las fuentes de emisión de PM_{10} que se pueden hallar en la ciudad se encuentran las correspondidas a fenómenos naturales como el aerosol marino, generado por la vaporización del agua de mar (Querol, Viana, & Moreno, 2009); el polvo o material re-suspendido derivado del soplado del viento; el material emitido en los procesos de combustión y las quemadas a cielo abierto (Amato et al., 2009; Harrison & Yin, 2000). De carácter antrópico son las emisiones de procesos industriales y las emisiones debidas a fuentes móviles

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

(Edvardsson & Magnusson, 2009). Además de las actividades portuarias que se llevan a cabo en esta ciudad (Moreno et al., 2007).

7.3. Reconstrucción másica de PM₁₀

En la Figura 7.5, se observa la reconstrucción másica media del PM₁₀. La caracterización química llevada a cabo permite reconstruir el 91% de la concentración de PM₁₀ medida gravimétricamente.

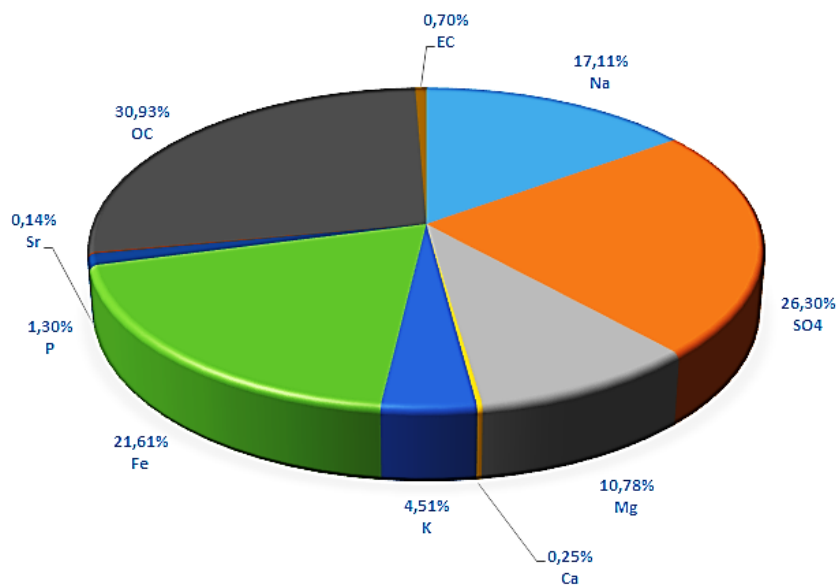


Figura 7.5 Reconstrucción másica de PM₁₀. Carbono orgánico (CO), carbono elemental (CE.), elementos (Na, Mg, K, Fe, P, Ca, Ba, y Sr). (Rugeles Ahumada & Silva Tibabija, 2017).

En esta gráfica se puede evidenciar que el azufre es uno de los componentes mayoritarios con un aporte al PM₁₀ del 26,30%. Este elemento es un trazador de partículas secundarias (Chow et al., 1992), forma sulfatos (SO₄²⁻) y es constituyente de las partículas secundarias más comunes en el PM₁₀ (Calzolari et al., 2015; Chow et al., 1992). Siendo el resultado del dióxido de azufre (SO₂) emitido, aunque sus concentraciones no son necesariamente proporcionales a las

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

cantidades de las emisiones de los gases porque hay muchos factores que afectan la conversión (Eatough, Caka, & Farber, 1994). Este contaminante se puede asociar a la quema de combustibles y el procesamiento de minerales puesto que en la ciudad de Barranquilla las posibles fuentes de emisión de este material son las cementeras, las fábricas de alimentos, de vidrio, de papel, parque automotor y la re-suspensión del suelo.

El Sodio (Na) con un 17,11%, esto indica la presencia de sales marinas procedentes de las masas de aire marítimas tropicales y polares que influyen en el clima de la zona (Teixeira, Meira, de Santana, & Wiegand, 2009). Y de los elementos tenemos los siguientes, Ca (0,25%), Mg (10,78%), Fe (21,61%), K (4,71%) > P (1,30%). La presencia de una elevada concentración de Na, asociados a la sal marina es mayor que la de los elementos de la corteza, Ca y Mg asociados a la re-suspensión del suelo (Calzolari et al., 2015; Fang, Chang, Chu, & Wu, 2003), lo cual expone la influencia marítima en la atmósfera del área. El Ca y Mg a su vez se encuentran en mayor proporción que el Fe aunque las cuatro especies químicas se encuentren relacionadas a re-suspensión de suelo por materiales geológicos. La posible razón de este resultado es que este elemento proviene de las emisiones de los escapes de los vehículos a gasolina y diésel (Forero gonzalez & Delgado Herrera, 2008).

La contribución promedio de OC y EC al total de la masa de PM₁₀ medida es de 5,0 y 2,8 %, respectivamente. Indicando que las fracciones asociadas son minoritarias en el PM₁₀ para esta zona de la ciudad, contrastando con otras ciudades como Bogotá, en las cuales el aporte al material particulado puede ser hasta del 65 % (F. Vargas & Rojas, 2009).

7.4. Contribución de fuentes por medio del modelo CMB 8.2

Teniendo en cuenta el perfil seleccionado (Ver Anexo 11.1.3), se realizaron diferentes pruebas para determinar la combinación de los perfiles de origen que mejor se ajustaran a las

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

condiciones reales de la ciudad de Barranquilla. Estos perfiles son obtenidos desde la página de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, a las que se aplicó para esta investigación, buscando lograr obtener resultados coherentes y/o aceptables de acuerdo a lo discutido teóricamente en la asociación de los elementos analizados con las posibles fuentes aplicables en la ciudad de Barranquilla, alrededor de la Universidad de la Costa C.U.C. Debido a esto, de manera exploratoria se desarrolló una evaluación de diferentes conjuntos de fuentes de acuerdo a las especies seleccionadas, presentamos las pruebas iniciales y finales en la siguientes tablas (ver Tablas 7.5 y 7.6) se seleccionaron de manera aceptable la prueba No. 5 de acuerdo a lo discutido teóricamente:

Tabla 7.4 *Estimación de las fuentes contribuyentes*

SOURCE CONTRIBUTION ESTIMATES												
COD. CORRIDA	MARIN	UDUST	AUTPB	RDOIL	VBRN1	KRAFT	ALPRO	STEEL	FERMN	GLASS	OC	EC
1	YES	NO	NO	NO	-	NO	NO	YES	YES	NO	-	-
2	YES	NO	NO	NO	NO	NO	-	YES	-	-	NO	YES
3	YES	NO	-	NO	-	NO	-	YES	-	-	YES	YES
4	YES	NO	NO	NO	-	NO	-	YES	-	NO	NO	YES
5	YES	NO	NO	NO	-	NO	NO	YES	YES	-	-	-

Nota. Convergencia del modelo en las diferentes corridas y en relación con las diferentes fuentes, estimando la posible contribución de cada una de ellas. (Rugeles Ahumada & Silva Tibabija, 2017).

Según la comparación con los rangos aceptables para el modelo (Teixeira et al., 2015), las cuatros primeras corridas no logran ajustarse, debido a que las especies no logran tener una admisible relación con las fuentes presentadas en el perfil, por lo tanto, se analizó y discutió el último caso No. 5, debido a que logra presentarse una cercanía a lo aceptable de acuerdo a los resultados obtenidos (Ver tabla 7.6).

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

Tabla 7.5 *Análisis de diferentes corridas / rangos aceptables*

FITTING STATISTICS				
COD. CORRIDA	R SQUARE	CHI SQUARE	%MASS	DEGREES FREEDOM
1	1	0.05	-10.5	1
2	0.95	0.05	-2.9	1
3	0.95	0.78	32	3
4	1	0.08	43.3	1
5	0.98	0.34	70	2

RANGOS ACEPTABLES		
R ²	Chi ²	Mass (%)
0.8 - 1.0	< 4.0	80 - 120

Nota. Las estadísticas de ajuste de las diferentes corridas teniendo en cuenta el rango de los parámetros aceptables para poder ajustar el modelo. (Rugeles Ahumada & Silva Tibabija, 2017).

Teniendo en cuenta lo anterior, los siguientes resultados corresponden al modelo según la corrida No. 5.

Contribución de especies

Teniendo en cuenta las características que se mencionaron anteriormente (Tabla 7.5), Se analiza la forma en la que la masa del contaminante se distribuye entre las fuentes por especies, observando en el informe principal arrojado por el modelo, encontrando fuentes al cual son asociadas las especies estudiadas en el PM₁₀. Arrojando como favorable o mayor contribuyente por cada especie, el Marin, Udust, Rdoil, Fermn, y menores contribuyente el Autpb, Kraft, Alpro, Steel (Ver tabla 7.6).

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

Tabla 7.6 Informe principal / CMB – 8.2

ESTADÍSTICAS DE MONTAJE						
R	0.98	%MASA		70		
SQUARE						
CHI	0.34	GRADOS DE		2		
SQUARE		LIBERTAD				
ESTIMACIONES DE FUENTE						
FUENTE						
EST	CODIGO	NOMBRE	SCE($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Std Err	Tstat	
SI	1	MARIN	26,93317	25,07984	1,0739	
SI	3	UDUST	61,99471	25,51076	2,43014	
NO	4	AUTPB	89,02448	51,70362	1,72182	
SI	5	RDOIL	67,21265	40,34078	1,66612	
NO	8	KRAFT	-168,48247	160,99062	-1,04654	
NO	11	ALPRO	-31,73024	130,58646	-0,24298	
NO	12	STEEL	-8,67534	5,26965	-1,64629	
SI	13	FERMN	4,55899	2,49599	1,82652	
			40,83595			
CONCENTRACION MEDIDA PARA EL TAMAÑO: COARS						
			58.3+-	2.7		

Nota. Estructura del informe principal de resultados arrojado por el modelo receptor. (Rugeles Ahumada & Silva Tibabija, 2017).

A continuación se observa las concentraciones en porcentaje para cada especie a la cual está asociado cada fuente, esta gráfica de barras apiladas, nos ayudó a verificar las especies que dominan en cada fuente, determinar la distribución de los factores para cada especie. (Ver figura 7.6).

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

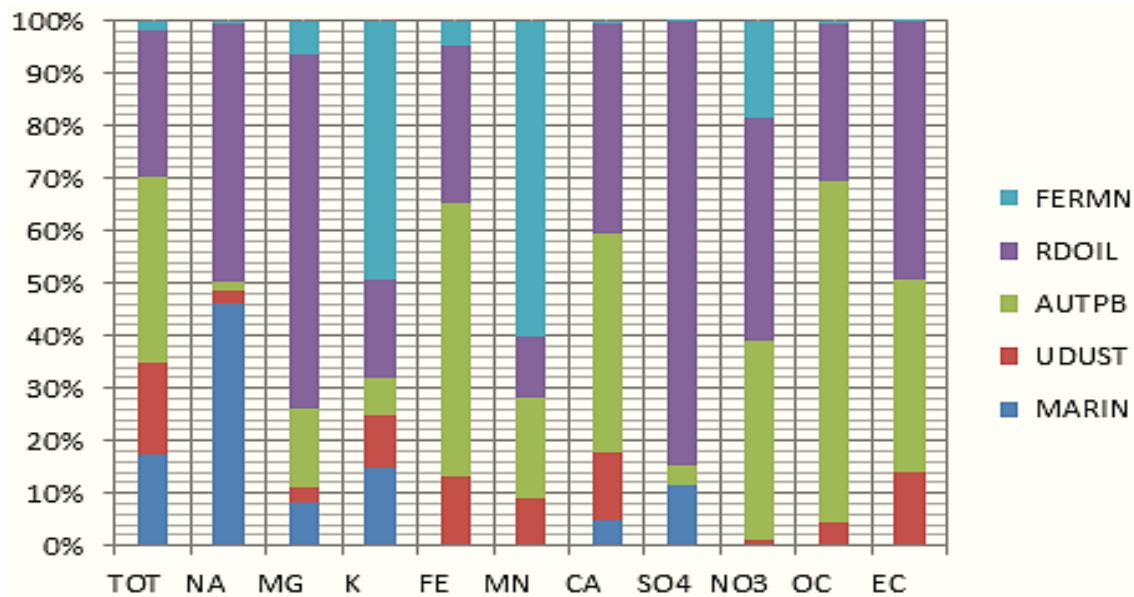


Figura 7.6 Porcentaje de concentración de cada especie estudiada, asociando las 5 fuentes. (Rugeles Ahumada & Silva Tibabija, 2017).

Se observa que; Para la fuente de horno de ferromanganeso (FERMN), el Manganeso (Mn) junto con el Potasio (K) dominan, para la fuente de combustión de aceite residual (RDOIL), el Sulfato (SO₄) junto con el Magnesio (Mg) prevalecen sobre las otras especies químicas, para la fuente de escapes de autos con plomo (AUTPB), el Carbono Orgánico (OC) junto con el hierro (Fe) sobresalen, para la fuente de polvo urbano (UDUST), el Carbono Elemental (EC) imperan sobre las otras especies químicas y para la fuente aerosol marino (MARIN), el Sodio (Na) es el elemento dominante.

Teniendo en cuenta los resultados y datos utilizados en la corrida, se realizó un gráfico con el fin de establecer de manera detallada, el aporte de cada especie a las fuentes arrojadas por el modelo (ver figura 7.7).

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

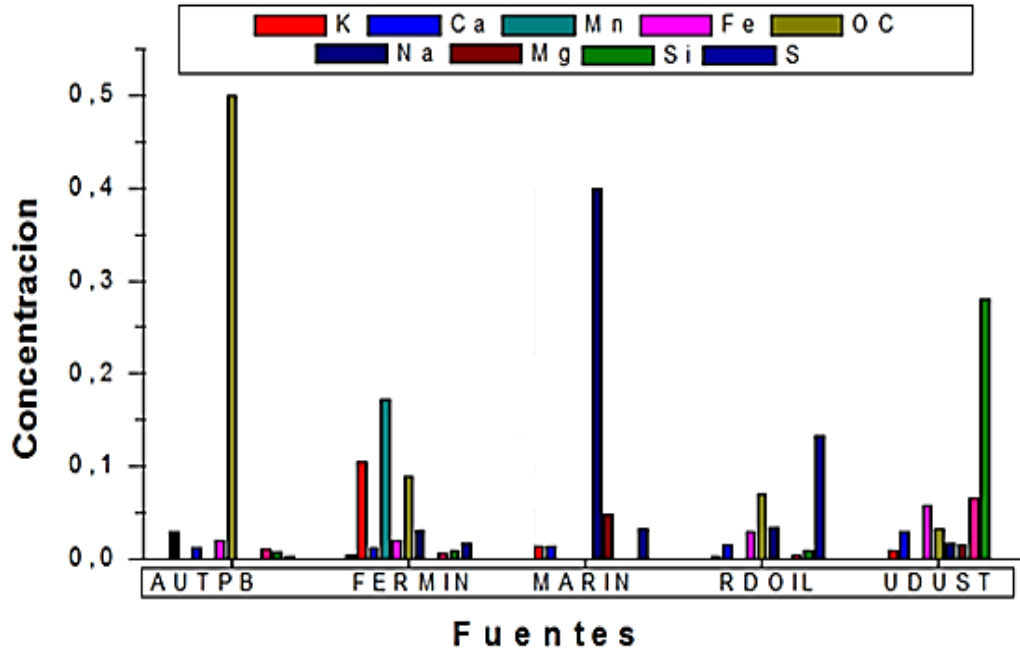


Figura 7.7 Determinación de la contribución de los elementos para cada fuente. (Rugeles Ahumada & Silva Tibabija, 2017).

Observando las anteriores fuentes arrojadas por el modelo como aceptables de acuerdo a las especies analizadas, se detalla las principales especies constituidas para cada fuente tenemos; Marin – Aerosol marino: Na, Mg; Udust – Polvo Urbano: Si, Fe, OC; Autpb – Escape de auto con plomo: OC, Ca; Rdoil – Combustión de aceite residual: S, Na, OC; Fermn – Horno de ferromanganeso: Mn, OC, K, S, Fe.

Factor de contribución

En la figura 7.8 se observa la distribución de la concentración de la masa del PM_{10} entre las fuentes modeladas, arrojadas por el modelo CMB. En ella se observa que es dominante AUTPB (Escape de auto) con un 36% de contribución, seguido se encontró RDOIL (Combustión de aceite residual) con un 28% de contribución, pasando a la fuente MARIN (Aerosol marino) y UDUST (Polvo urbano) con un 17%, y por último con menor dominancia la fuente FERMIN (Horno de ferromanganeso) con 2% de contribución.

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

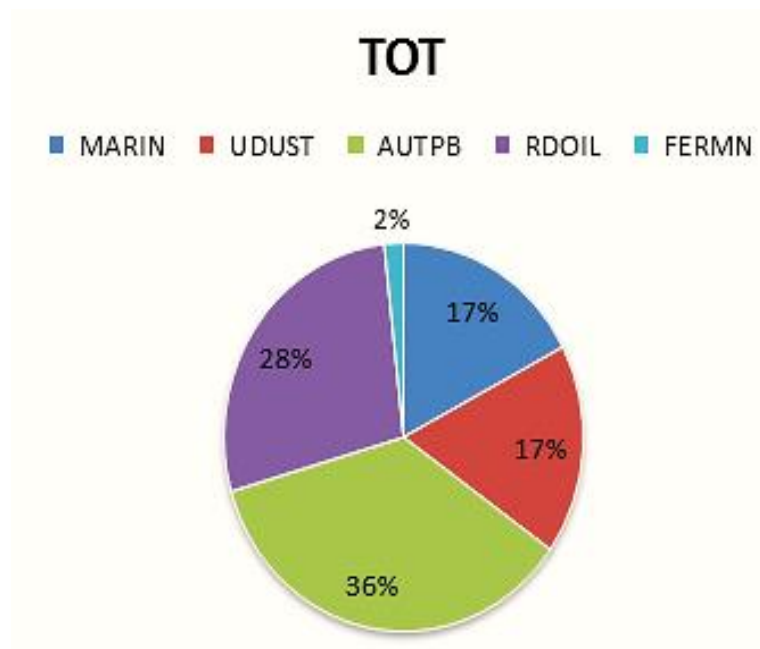


Figura 7.8 Factor de contribución para el TOT (PM_{10}). (Rugeles Ahumada & Silva Tibabija, 2017).

7.5 Contribución de fuentes por medio del modelo PMF 5.0

Al definir un total de 20 iteraciones el modelo PMF, demostró convergencia en la iteración número 18. Con los valores de ajuste mostradas a continuación (Tabla 7.7).

Tabla 7.7 Estadísticas de corrida base.

Species	Category	r^2	Intercept	Intercept	slope	Slope	SE	Normal
				SE		SE		resid
PM_{10}	Strong	0,94406	10,71582	3,43471	0,82367	0,04863	5,36497	YES

Nota. Parámetros de ajuste arrojados por el modelo para la mejor convergencia posible. (Rugeles Ahumada & Silva Tibabija, 2017).

Estos valores y para las demás especies, se podrán observar en la interfaz del modelo al momento de ingresar a la pestaña “Base Model Results”.

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

En la figura 7.9 se observa la comparación entre los valores observados (datos de entrada) y los valores predichos (modelados) para el PM_{10} , esta grafica arrojada por el modelo es útil para establecer la calidad del modelado de la a la especie prioritaria en la modelación, en ella se observa que la relación se ajusta de manera aceptable de acuerdo a los datos obtenidos con los del modelo.

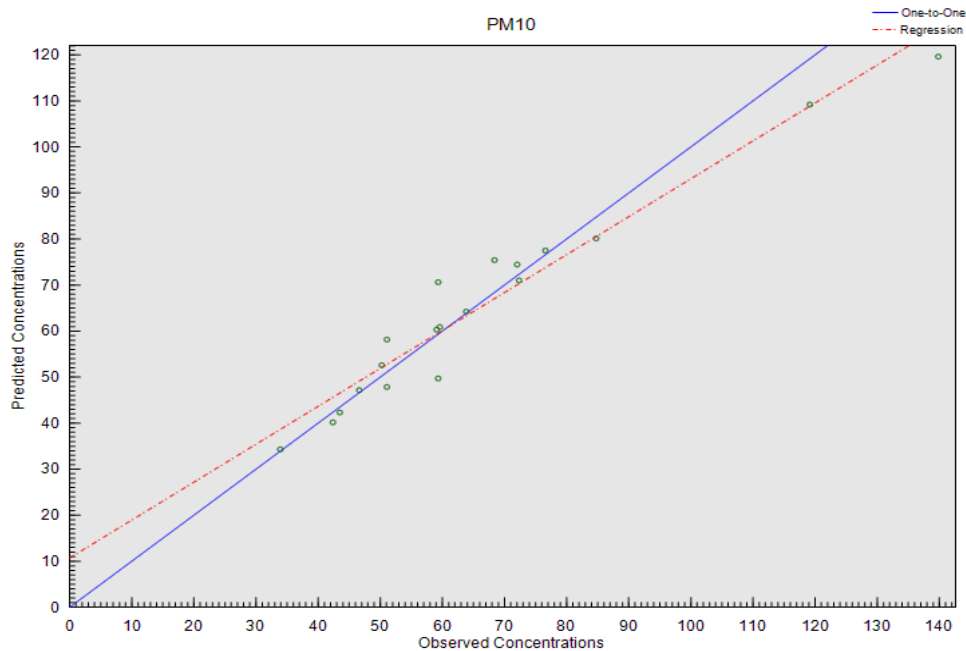


Figura 7.9 *Dispersión del PM_{10} observado / previsto (Concentraciones).* (Rugeles Ahumada & Silva Tibabija, 2017).

Las concentraciones observadas y previstas para la muestra más cercana a la línea de referencia punteada vertical negro. Se muestran en azul las especies seleccionadas, y en rojo se muestran los datos predichos (modelados). Tener en cuenta que, de acuerdo al protocolo, si los valores máximos de una especie no son reproducidos por el modelo, se aconseja excluir dichas especies o cambiar la categoría de la especie a débil para el PM_{10} siendo el principal componente de interés analizado.

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

Perfiles / Contribución

En la figura 7.10 se muestran los gráficos para cada factor. Cada perfil en la parte superior se muestra las concentraciones de cada especie repartida en los factores como una barra de color azul pálido y el porcentaje de cada especie repartido en los factores como un cuadro rojo. La barra de concentración corresponde al eje Y izquierdo, que es una escala logarítmica, y el porcentaje de especies corresponde al eje Y derecho.

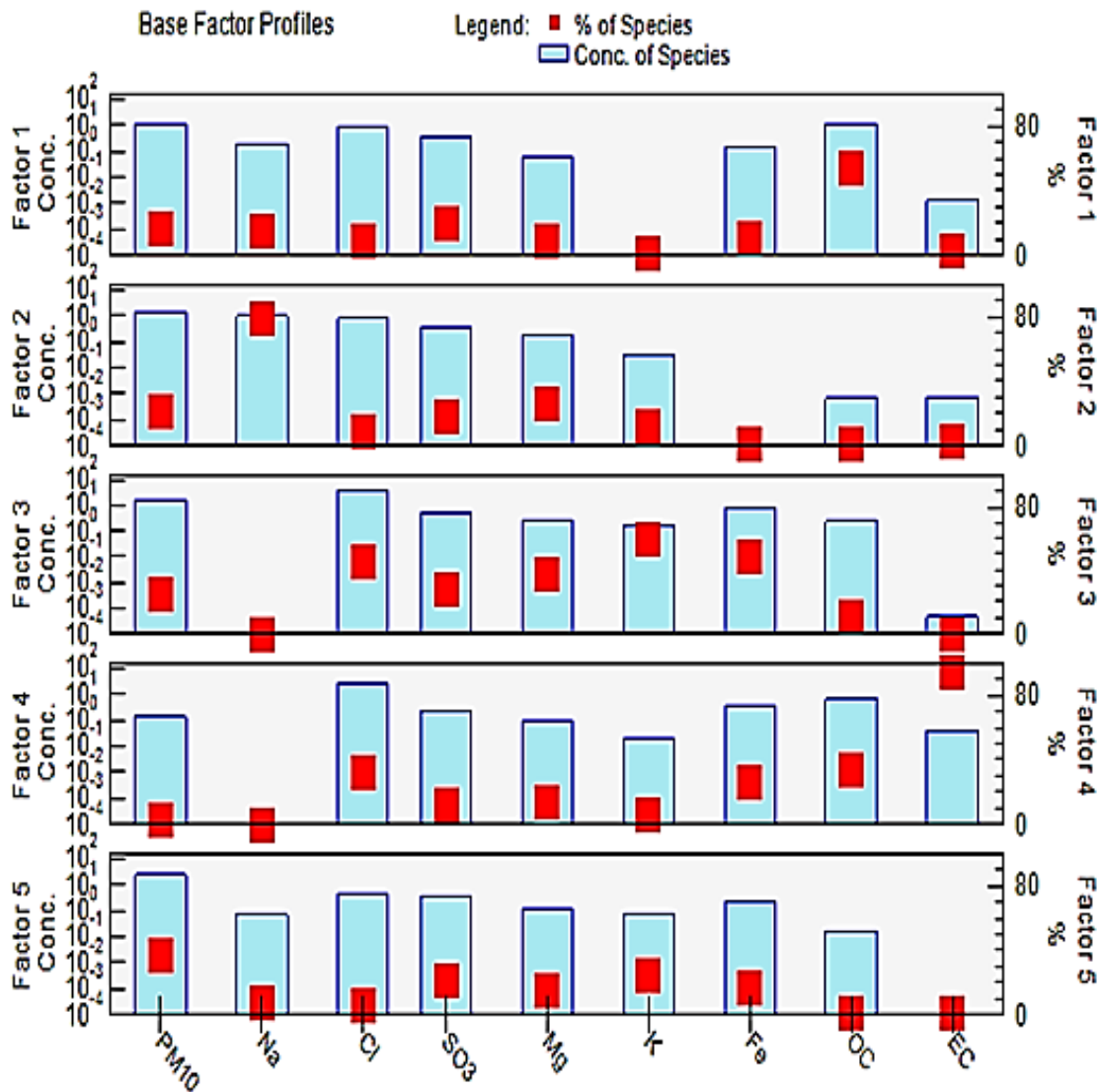


Figura 7.10 Contribución de los perfiles / Concentración de especies - % de especies. (Rugeles Ahumada & Silva Tibabija, 2017).

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

De acuerdo a la figura 7.10 mostrada anteriormente, se puede notar que las concentraciones de material particulado son casi las mismas para los cinco factores pero adicional a esto en el Factor 1 se pudo evidenciar una alta concentración de especies químicas como Na, SO₄, Mg, Fe y CO con un alto porcentaje para SO₄ y CO por lo que se puede relacionar este factor a la combustión incompleta de industrias ya que el carbono orgánico es adsorbido en la partícula debido a que estas actividades están relacionadas a la emisión de dichos contaminantes principalmente (Molina Esquivel et al., 2015).

Para el Factor 2 se pudo evidenciar las altas concentraciones de Na, SO₄, Mg y K con un alto porcentaje para el Na y Mg puesto que se vincular este factor la presencia del aerosol marino proveniente del mar caribe por la razón de que estas fuentes emiten mayormente dichos contaminantes (Argumedo & Castillo, 2016).

Para el Factor 3 se notó la alta concentración de SO₄, Mg, K, Fe y CO con un alto porcentaje especies químicas como K y Fe por lo tanto se puede relacionar este factor a fuentes tales como re-suspensión del suelo, actividades de construcción y demolición debido a su relación directa con los contaminantes emitidos (Argumedo & Castillo, 2016).

Para el Factor 4 se detectó una gran concentración de SO₄, Mg, Fe, CO y CE con un alto porcentaje de especie químicas tales como CO y CE pudiendo relacionar estos a las emisiones provenientes del parque automotor (Forero gonzalez & Delgado Herrera, 2008).

Para el Factor 5 se notaron altas concentraciones de Na, SO₄, Mg, K y Fe con un porcentaje más elevado para las especies químicas tales como el Mg, K y Fe por lo tanto se puede relacionar este factor a actividades mezcla de quema de biomasa por el K; la re-suspensión del suelo y a la industria manufacturera por el Fe (Forero gonzalez & Delgado Herrera, 2008)(Cremades, Allende David, & Puliafito, 2011). Descartando la presencia de Cl aunque que

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

el cloruro sea otro constituyente principal del aerosol marino, no obstante, no fue considerado debido a que su concentración es afectada por las reacción en la atmósfera con los ácidos sulfúrico y nítrico, que produce su eliminación del material particulado en forma de cloruro de hidrógeno gaseoso (Viana Rodríguez, 2003), además de que en el filtro de PM₁₀ se produce un efecto negativo en la captación de cloruros debido a la formación de cloruro de amonio (NH₄Cl) gaseoso por reacción del nitrato de amonio con partículas del aerosol marino (Querol et al., 2009). Las altas temperaturas y la elevada exposición a la radiación solar, que se presentan en Barranquilla pueden favorecer el desarrollarlo de estas reacciones provocando una pérdida de Cl- (Teixeira et al., 2009).

A continuación, se observa las concentraciones en porcentaje para cada especie a la cual está asociado cada factor, esta gráfica de barras apiladas para verificar los nombres de los factores y determinar la distribución de los factores para cada especie, mostrando la ejecución actual seleccionada recordando que, para este caso (ver Figura 7.11).

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

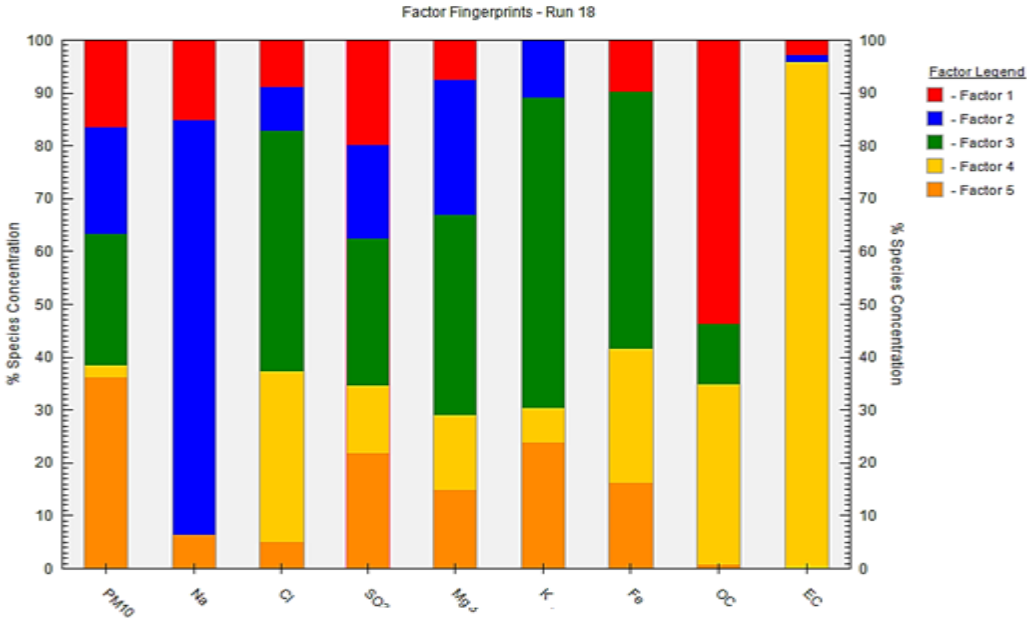


Figura 7.11 Concentración de cada especie estudiada, asociando los 5 Factores. (Rugeles Ahumada & Silva Tibabija, 2017).

Se observa que para el factor 1 (----) el carbono orgánico (OC) es dominante. Para el factor 2 (----) el sodio (Na) es dominante. Para el factor 3 (----) potasio (K) dominante. Para el factor 4 () el carbono elemental (EC) dominante. Para el Factor 5 se incluyen todos los elementos como resultado de la composición química del PM₁₀.

Factor de contribuciones

En la Figura 7.12 se ilustra la distribución de cada especie entre los factores resueltos por el modelo, se selecciona el de interés a analizar “PM₁₀”.

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

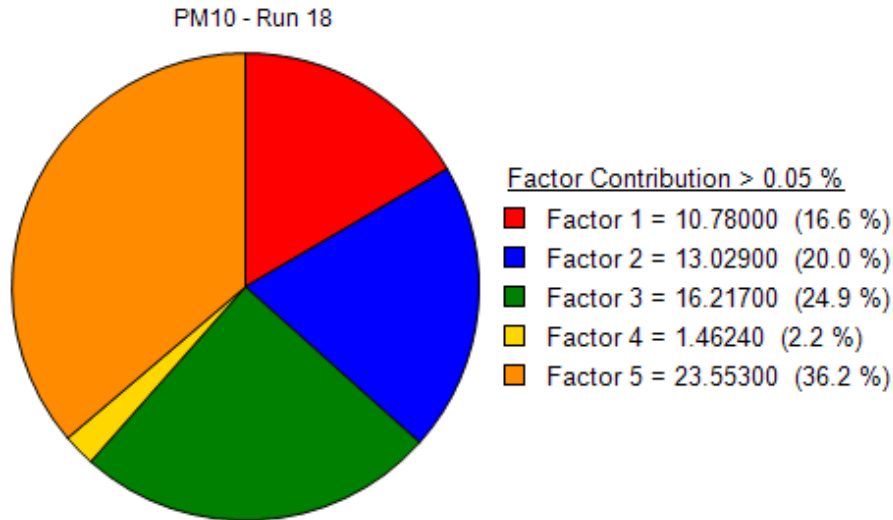


Figura 7.12 Factor de contribución para el PM10 – corrida número 18. (Rugeles Ahumada & Silva Tibabija, 2017).

Se observa que la contribución del material particulado PM₁₀ para cada uno de los factores, siendo dominante para el factor número 5 con un 36,2% de contribución, seguido encontramos el factor 3 con un 24,9% de contribución, pasando al factor 2 con un 20,0%, factor 1 con 16,6% y por último con menor dominancia el factor 4 con un 2,2% de contribución, estos datos tanto para el PM₁₀ como para las demás especies estudiadas, se logra detallar en los análisis de los resultados anteriores descritos.

7.6 Análisis / Discusión

Uno de los objetivos de este trabajo fue evaluar el aporte de las fuentes emisoras de material particulado mediante los modelos receptores balance químico de masa (CMB) y factorización positiva de la matriz (PMF). Como ya se dijo anteriormente, una de las utilidades del uso de modelos receptores es que permiten distinguir y cuantificar las emisiones de diferentes fuentes, es por tal motivo que se evaluaron los resultados obtenidos para la modelación realizada con CMB y PMF, para de este modo estimar el promedio de contribuciones hacia cada posible fuente por medio de ambos modelos. Cabe resaltar que debido a la escasa cantidad de muestras

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

obtenidas durante la etapa de monitoreo, los resultados de los modelos no fueron los más acertados durante los primeros intentos, por tanto se evidencio la necesidad de “correrlos” varias veces buscando el ajuste más adecuado acorde a las variables expuestas en los manuales de usuario de ambos modelos.

Según los resultados obtenidos para CMB se pudieron seleccionar cinco fuentes de acuerdo a las especies químicas encontradas que se relacionan a ellas, por lo tanto, se determinaron fuentes como el aerosol marino, relacionado al Na y Mg, lo mismo para los resultados de PMF relacionando principalmente el Na y el Mg para esta fuente en específico. Para CMB se notó la relación de Si, Fe y OC para el polvo urbano, para el PMF en cuanto a especies químicas como Cl, K y Fe para la re-suspensión del suelo, mientras que para el modelo CMB se detectó la presencia de OC, Ca para escapes de automóviles con plomo, haciendo la aclaración que la gasolina en Colombia no tiene plomo, este solo es el nombre de la fuente que se sale en el manual de usuario del modelo, algo similar a lo encontrado para PMF con esta fuente del parque automotor relacionando especies químicas como el CO, CE. Para el CMB se encontró presencia de S, Na, OC en lo referente a la combustión de aceites, para el PMF se encontró CO, SO₄ y Na producto de la combustión incompleta de las industrias, por último, para el CMB se relacionó la presencia Mn, OC, K, S, Fe para la las actividades de hornos industrial, muy poco parecido a los elementos Mg, K y Fe encontrados para PMF en relacionándolos a las quemadas de biomasa.

Para el CMB la contribución del escape de autos con plomo fue del 36% mientras que para el PMF el parque automotor aportó 2,2%. Para el CMB la combustión de aceites tuvo un aporte del 28% de aporte mientras para el PMF se estimó un 16,6% de aporte por parte de la combustión incompleta de las industrias. Para CMB se obtuvo un aporte del 17% por parte del aerosol marino, mientras que para el PMF un aporte del 20%. Para el CMB se estimó un aporte

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

de 17% por parte del polvo urbano, mientras que para el PMF se obtuvo una cifra de 24,9% para la re-suspensión de suelo, actividades de construcción y demolición. Por último, para el CMB se obtuvo un aporte del 2% para los hornos industriales, y para el PMF se llegó a un valor de 36.2% para las quemas de biomasa, teniendo en cuenta la divergencia entre estos dos tipos de fuentes debido a los diferentes contaminantes emitidos por cada una de ellas, se aclara que, se tomó esta fuente de hornos industriales para CMB de acuerdo al perfil de emisión seleccionado para ejecutar el modelo, de este modo se seleccionaron perfiles de emisión de otras ciudades para trabajar con el CMB debido a que Barranquilla no cuenta con un inventario de fuentes. De esta manera se puede llegar a entender la relación entre las fuentes para los resultados obtenidos con la ejecución de los dos modelos receptores empleados, deduciendo que los resultados mostrados en este trabajo de grado sugieren que ambos modelos son complementarios, puesto que el CMB es adecuado usarlo si se cuenta con el mayor número de perfiles de emisión posibles para el sitio de estudio, mientras que para el PMF se puede ejecutar sin contar con ese tipo de información pero depende de la calidad y cantidad de datos con los que se cuente, puesto que el usuario determina el número de fuentes y otros parámetros iniciales para ajustar la entrada del modelo, siendo uno de los principales problemas que se llegaron a deducir en la corrida de PMF es que necesitaba de una gran cantidad de muestras para que pudiese generar resultados precisos y más confiables, debido a que la variabilidad natural entre las muestras es muy grande, lo que limita la convergencia entre los datos reales y los datos modelados, es por eso que el aporte del parque automotor para PMF arrojó una contribución más baja en relación con la de CMB de igual manera para los demás elementos

8. Conclusiones

De acuerdo con los objetivos planteados, el aporte de las concentraciones estimadas durante el periodo de monitoreo, abril hasta julio de 2015, demuestran que el mes con mayor concentración de PM_{10} fue el mes de abril y el de menor concentración fue el de julio, así mismo los meses de abril, mayo y junio superaron el promedio anual de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ establecido por la Resolución 610 del 2010. A su vez los elementos más encontrados durante la etapa de caracterización química fueron OC - SO₄ - Fe - Na. Por las abundantes actividades en mezcla de quema de biomasa junto con aerosol marino, y escape de automotor. Los valores más altos de concentración de material particulado PM_{10} fueron 137,5 y 116,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para el 17 de abril y el 07 de mayo del 2015, respectivamente, valores que superaron el límite máximo permisible de 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para 24 horas de exposición establecidas por la Resolución 610 del 2010. En base a los datos de estas fechas se pudo indagar que se atribuyeron a episodios de quema ilegal de bosques en zonas cercana al área de estudio. Finalmente, tratando de ajustar los perfiles de emisión y posibles fuentes estimadas en la zona de estudio, la modelación de los datos de concentraciones medidas e incertidumbre, arrojan resultados muy poco conformes de acuerdo a ciertas características presentadas, como la relación de las fuentes para la ejecución de ambos modelos, el rango aceptable para el CMB a presentar, y realizando la comparación con diversos estudios notamos que los valores en concentración son bajos y la diferencia entre los modelos es alta, infiriendo que se necesitaba una cantidad de muestras necesarias tanto para el PMF y CMB para lograr obtener resultados confiables al momento de hacer la comparación con estos modelos para complementar entre ellos, debido a la variabilidad entre las muestras, limitando la convergencia entre los datos analizados.

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

Por último, para estudios posteriores, se recomienda evaluar las concentraciones de PM_{10} por un periodo de monitoreo equivalente a un año, con el fin de que dichos datos sean útiles al momento de implementar medidas de manejo para el control de PM_{10} .

Además de incluir un mayor número de especies químicas posibles a analizar para que de este modo se obtenga una perspectiva más completa de la composición química del PM_{10} presente en el área de estudio.

9. Referencias

- Acevedo Bohórquez, J., Bocarejo, J. P., Juan, S., Velásquez, M., De Investigación, A., María, A., ... Galarza, D. C. (2013). *Caracterización de la contaminación atmosférica en Colombia*.
- Aciniegas Suarez, C. A. (2012). Diagnóstico y control de material particulado: Partículas suspendidas totales y fracción respirable PM10. *Luna Azul*, 34, 195–213.
- Alcaldía de Barranquilla. (2010). Presentación. Retrieved July 9, 2017, from http://www.barranquilla.gov.co/index.php?option=com_content&view=article&id=27&Itemid=118
- Alfaro, M. del R. (1998). *Contaminación del aire: emisiones vehiculares, situación actual y alternativas*. Editorial Universidad Estatal a Distancia.
- Aluanlli Villalobos, P. K. (2008). *Aportes de fuentes al material particulado fino y grueso en Santiago usando factorización de matrices positivas (PMF)*.
- Amato, F., Pandolfi, M., Viana, M., Querol, X., Alastuey, A., & Moreno, T. (2009). Spatial and chemical patterns of PM10 in road dust deposited in urban environment. *Atmospheric Environment*, 43(9), 1650–1659. <http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.12.009>
- Argumedo, C. J. D., & Castillo, J. R. F. (2016). Caracterización Química de material particulado fracción respirable pm 10 en la atmósfera de Rioacha la Guajira Colombia. *Ingeniería Investigación Y Desarrollo*, 17(1), 5–16.
- Bello Silva, Sergio; Oyarzún Gómez, M. (1991). Efectos adversos para la salud de los contaminantes atmosféricos / Air pollutants adverse effect for health. *Rev. Chil. Enferm. Respir*, 7(4), 198–205.
- Calzolari, G., Nava, S., Lucarelli, F., Chiari, M., Giannoni, M., Becagli, S., ... Marconi, M. (2015). Characterization of PM 10 sources in the central Mediterranean, 13939–13955.

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

<http://doi.org/10.5194/acp-15-13939-2015>

Canales-Rodríguez, M. Á., Quintero-Núñez, M., Castro-Romero, T. G., & García-Cuento, R. O.

(2014). Las Partículas respirables PM10 y su composición química en la zona urbana y rural de Mexicali, Baja California en México. *Información Tecnológica*, 25(6), 13–22.

<http://doi.org/10.4067/S0718-07642014000600003>

Casas, S. B., Peña-Cortés, F., & Osses Bustingorry, S. (2004). Efectos de la contaminación atmosférica por material particulado en las enfermedades respiratorias agudas en menores de 5 años. *Ciencia Y Enfermería*, 21–29.

Castro Ortiz, H., Fernando Castro Suarez, R., Luis Chacón Velasco, J., Andrea Rodríguez Villamizar, L., & Berena Herrera López, A. (2009). Caracterización físicoquímica del material particulado y aplicación de modelos receptor-fuente en el área metropolitana de Bucaramanga.

Chow, J. C., John, G., Lowenthal, D. H., Solomon, P. A., Magliano, K. L., Ziman, S. D., ... Li, R. (1992). PM10 source apportionment in California's San Joaquin Valley., 26(18).

Colombiano, C., Rojano, R. E., Angulo, L. C., & Restrepo, G. (2013). Niveles de Partículas Suspendidas Totales (PST), PM10 y PM2.5 y su relación en lugares públicos de la ciudad/Levels of total suspended particles (TSP), PM10 and PM2.5 and their relationship in public places of the city Riohacha, Colombian Caribbean., 24, 37–46.

<http://doi.org/10.4067/S0718-07642013000200006>

Comisión Europea. (2008). Directiva 2008/50/CE. *Diario Oficial de La Unión Europea*, (L 152), 1–44.

Consejería de medio ambiente y ordenación del territorio. (2016). Material particulado atmosférico. Retrieved April 30, 2017, from

<http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/portalweb/menuitem.7e1cf46ddf59bb22>

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

7a9ebe205510e1ca/?vgnextoid=bd9a6b23d642c310VgnVCM2000000624e50aRCRD&vgnextchannel=e339a862d17d4310VgnVCM2000000624e50aRCRD&lr=lang_es&vgnnextrefresh=1&vgnsecondoid=9afb6b

Cooper, J., & Jr, J. W. (1980). Receptor oriented methods of air particulate source apportionment. *Journal of the Air Pollution Control*, 30.

Cooper, J., & Watson, J. (1979). Portland aerosol characterization study (PACS). *Final Report for Portland Air Quality Maintenance Area*.

Cortes, J. (2013). *Air pollution evaluation in ambient air of Manizales by POPS and PM10*. Universidad Nacional de Colombia.

Costa, C. (2010). Resolución número 610 (24 de marzo de 2010)., (610), 1–8.

CRA. (2016). C.R.A inició instalación de Red de Monitoreo de la Calidad del Aire en el Atlántico. Retrieved from <http://www.craautonoma.gov.co/noticiasra/1057>

Cremades, P., Allende David, & Puliafito, E. (2011). Integración de modelos para la estimación del impacto en la calidad de aire de la quema de biomasa en el norte argentino. *Avances En Energías Renovables Y Medio Ambiente*.

D'Amato, G., & Holgate, S. T. (2002). *The impact of air pollution on respiratory health*. European Respiratory Society.

de Bruin, Yuri B., Koistinen, K., Yli-Tuomi, T., Kephelopoulos, S., & Jantunen, M. (2006). Source apportionment techniques and marker substances available for identification of personal exposure, indoor and outdoor sources of chemical.

De la rosa, J. (2011). Niveles y composición química de PM10 en el distrito minero de Riotinto (Faja Piritica Iberica). *Revista de La Sociedad Española de Minerología*, 1–2.

Díaz-Robles, L. A., Ortega, J. C., Fu, J. S., Reed, G. D., Chow, J. C., Watson, J. G., & Moncada-Herrera, J. A. (2008). A hybrid ARIMA and artificial neural networks model to forecast

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

- particulate matter in urban areas: The case of Temuco, Chile. *Atmospheric Environment*, (42), 8331–8340. <http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.07.020>
- Eatough, D. J., Caka, F. M., & Farber, R. J. (1994). The conversion of SO₂ to sulfate in the atmosphere. *Israel Journal of Chemistry*, 34(3- 4), 301–314. JOUR.
- Edvardsson, K., & Magnusson, R. (2009). Monitoring of dust emission on gravel roads: Development of a mobile methodology and examination of horizontal diffusion. *Atmospheric Environment*, 43(4), 889–896.
- Environmental Protection Agency. (2004). EPA-CMB8.2 Users Manual.
- EPA. (2010). *Our nation's air-status and trends through 2008*.
- EPA, U. (2014). EPA Positive Matrix Factorization (PMF) 5.0 User Guide.
- Fang, G., Chang, C., Chu, C., & Wu, Y. (2003). Suspended particulates for incense burning at Tzu Yun Yen temple in central Taiwan., 51, 983–991.
- Forero Gonzalez, D. C., & Delgado Herrera, M. C. (2008). *Análisis comparativo de la concentración de carbono orgánico (OC), carbono elemental (EC) contenido en el material particulado menor a 10 micrómetros (PM10) entre las áreas metropolitana de Cali Y valle de aburrá, el distrito de barranquilla y las ciudades*. UNIVERSIDAD DE LA SALLE.
- Forero gonzalez, D. C., & Delgado Herrera, M. constanza. (2008). *Análisis comparativo de la concentración de carbono orgánico (OC), carbono elemental (EC) contenido en el particulado menor a 10 micrómetros (PM10) entre las áreas metropolitanas de cali y valle de aburrá, del distrito de barranquilla y las ciudades*. *Journal of Chemical Information and Modeling*. Universidad de la salle. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Galvis, L. A. (2009). Geografía económica del Caribe Continental.
- García, G., Pinzón, G., & Cueto, J. (2005). Composición y concentración de material particulado en el aire de un sector del área urbana de Santa Marta (Magdalena, Colombia). *INTROPICA*.

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

- García Lozada, H. M. (2009). Evaluación del riesgo por emisiones de partículas en fuentes estacionarias de combustión. Estudio de caso: Bogotá 2006. *Ingeniería E Investigación*, 29(3), 153–154.
- Gaydos, T. M., Pinder, R., Koo, B., Fahey, K. M., Yarwood, G., & Pandis, S. N. (2007). Development and application of a three-dimensional aerosol chemical transport model, PMCAMx. *Atmospheric Environment*, 41(12), 2594–2611.
<http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.11.034>
- Harrison, R. M., & Yin, J. (2000). Particulate matter in the atmosphere: which particle properties are important for its effects on health? *Science of The Total Environment*, 249(1), 85–101.
[http://doi.org/10.1016/S0048-9697\(99\)00513-6](http://doi.org/10.1016/S0048-9697(99)00513-6)
- Hernández, M. F. (2013). Estudio del impacto en la calidad del aire de las fuentes puntuales en la ciudad de Pinar del río., 281, 1–12.
- Hsu, Y., Strait, R., & Beck, L. (2006). *SPECIATE 4.0 speciation database development documentation final report*.
- Jones, A. M., & Harrison, R. M. (2005). Interpretation of particulate elemental and organic carbon concentrations at rural, urban and kerbside sites. *Atmospheric Environment*, 39(37), 7114–7126. JOUR.
- Lane, T. E., Pinder, R. W., Shrivastava, M., Robinson, A. L., & Pandis, S. N. (2007). Source contributions to primary organic aerosol: Comparison of the results of a source-resolved model and the chemical mass balance approach. *Atmospheric Environment*, 41(18), 3758–3776. <http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.01.006>
- Maring, H., Savioe, D. L., Izaguirre, M. A., Custals, L., & Reid, J. S. (2003). Vertical distributions of dust and sea-salt aerosols over Puerto Rico during pride measured from a light aircraft. *Journal of Geophysical Research*, 108(D19), 8587.

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

<http://doi.org/10.1029/2002JD002544>

MAVDT. Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire. (2010).

MAVDT, Costa Posada, C., Mora Pineda Director de Desarrollo Sectorial Sostenible César Augusto Buitrago Gómez Equipo Técnico Coordinación, C., Valencia Cruz, A., Augusto Buitrago Gómez, C., Mendoza, J., ... Garzón Revisión de Prueba, W. M. Política de prevención y control de la contaminación del aire. (2010).

Mendoza, A., & Garcia, M. R. (2009). Aplicación de un modelo de calidad del aire de segunda generación a la zona metropolitana de Guadalajara, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 25(2), 73–85.

Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, Santos, J. M., Uribe, J. G., De Ambiente, V., Soto, A., Supervisora De Consultoría, C., & Madriñán, M. B. (2012). *Diagnostico nacional de salud ambiental*.

Molina Esquivel, E., Varona, M. M., Carbonell, L. M. T., Ruiz, E. M., García, S., Santos-Alves, D., ... Rivas, S. P. (2015). Carbono elemental y orgánico en PM_{2.5} y PM₁₀ de zonas urbanas de La Habana (Cuba)/ elemental and organic carbon in PM_{2.5} and PM₁₀ at urban zones of Havana (Cuba). *Sanid. Ambient. Higiene Y Sanidad Ambiental*, 15(153), 1343–1349.

Moreno, N., Alastuey, A., Querol, X., Artiñano, B., Guerra, A., Luaces, J. A., ... Basora, J. (2007). Characterisation of dust material emitted during harbour operations (HADA Project). *Atmospheric Environment*, 41(30), 6331–6343.

Muñoz Prada, D. G., & García Robayo, A. M. (2011). Evaluación del incremento en carbono orgánico (OC) y carbono elemental (EC) en el material particulado generado por quema de biomasa en el valle geográfico del río Cauca.

Neelamkavil, F. (1987). *Computer simulation and modelling*. John Wiley & Sons, Inc.

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

OMS. (2016). OMS | Calidad del aire ambiente (exterior) y salud. *WHO*.

Organización mundial de la salud. (2016). *OMS / Calidad del aire ambiente (exterior) y salud*.

WHO. World Health Organization.

Ortiz-Durán, E. Y., & Rojas-Roa, N. Y. (2013). Estimación de los beneficios económicos en salud asociados a la reducción de PM10 en Bogotá. *Rev. Salud Pública*.

Oyarzún, M. (2010). Contaminación aérea y sus efectos en la salud. *Revista Chilena de Enfermedades Respiratorias*, 26(1), 16–25.

Pablo, J., & Vinasco, S. (2015). Variación espacial y temporal de concentraciones de PM10 en el área urbana de Santiago de Cali, Colombia. *Revista Ingeniería de Los Recursos Naturales Y Del Ambiente - EIDEN ARrsos Naturales Y Del Ambiente - EIDEN AR*, 1–23.

Peña-Cortés, F., Henríquez, L. (2002). Evaluación de la aplicabilidad de la Norma ISO 14001 en empresas de la Región de La Araucanía. Chile. *Revista Información Tecnológica*, 13(3), 35–40.

Pey Betrán, J., Alastuey, A., Querol Carceller, X., & Mata i Perelló, J. M. (2007).

Caracterización fisico-química de los aerosoles atmosféricos en el mediterráneo occidental.
Universidad Politécnica de Cataluña.

Puliafíto, E., & Quaranta, N. (2009). Contaminación atmosférica en la Argentina: Contribuciones de la II reunión anual PROIMCA. *Universidad Tecnológica Nacional (UTN)*. ISBN, 950–978.

Querol, X. (2008). Calidad de aire, partículas en suspensión y metales.

Querol, X., Viana, M. del mar, & Moreno, T. (2009). Niveles, composición y fuentes de PM10, PM2.5 Y PM1 en España: Cantabria, Castilla León, Madrid y Melilla.

Romero Placeres, M., Diego Olite, F., & Álvarez Toste, M. (2006). La contaminación del aire: Su repercusión como problema de salud. *Revista Cubana de Higiene Y Epidemiología*, 44(2),

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

0–0.

- Rugeles Ahumada, S. R., & Silva Tibabija, A. S. (2017). *Estimación de la contribución de las fuentes emisoras de material particulado pm10 empleando modelos receptores en la zona atmosférica de la universidad de la costa c.u.c.* Universidad de la Costa c.u.c.
- Saldarriaga Molina, J. C., & Echeverri Londoño, Carlos Alberto; Molina Pérez, F. J. (2004). Partículas suspendidas (PST) y partículas respirables (PM10) en el Valle de Aburrá, Colombia. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (32).
- Samara, C., Voutsas, D., Kouras, A., Eleftheriadis, K., Maggos, T., Saraga, D., & Petrakakis, M. (2014). Organic and elemental carbon associated to PM10 and PM2.5 at urban sites of northern Greece. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(3), 1769–1785. JOUR.
- Sánchez, G., Vega, E., Reyes, E., & Mugica, V. (1997). *Distribución de fuentes de compuestos orgánicos volátiles en la atmósfera de la ciudad de Mexico.* ciudad de Mexico.
- Sbarato, D., Sbarato, V. M., & Ortega, Jose E. (2007). *Predicción y evaluación de impactos ambientales sobre la atmósfera/Prediction and assessment of environmental impacts about atmosphere.*
- Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (1998). *Atmospheric chemistry and physics from air pollution to climate change*, second edition.
- Suárez, V. D., & Pérez, C. P. (2006). Contaminación por material particulado en Quito y caracterización química de las muestras. *Revista Acta Nova, Vol. 3.*
- Teixeira, E. C., Agudelo-Castañeda, D. M., & Mattiuzi, C. D. P. (2015). Contribution of polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) sources to the urban environment: A comparison of receptor models. *Science of the Total Environment*, 538, 212–219.
<http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.072>
- Teixeira, E. C., Meira, L., de Santana, E. R. R., & Wiegand, F. (2009). Chemical composition of

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

- PM10 and PM2.5 and seasonal variation in South Brazil. *Water, Air, and Soil Pollution*, 199(1–4), 261–275. JOUR.
- Universidad Nacional Autónoma de México. Centro de Ciencias de la Atmósfera, A., & GRANIEL, M. (2007). Evaluación exploratoria de la dispersión de contaminantes emitidos por operaciones de quema de gas amargo en la sonda de Campeche. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 23(3), 99–113.
- Valderrama, M. E., Rojas, N. Y., & Gómez, R. (2006). Caracterización del material particulado en dos vías de transporte público colectivo y masivo en Bogotá. *Acta Nova*, 3, 323–335.
- Vargas, F. A., Rojas, N. Y., Pachon, J. E., & Russell, A. G. (2012). Atmospheric Pollution Research PM10 characterization and source apportionment at two residential areas in Bogota. *Atmospheric Pollution Research*, 3(1), 72–80. <http://doi.org/10.5094/APR.2012.006>
- Vargas, F. A., Rojas, N. Y., Vargas, F. A., & Rojas, N. Y. (2010). Composición química y reconstrucción másica del material particulado suspendido en el aire de Bogotá/Chemical composition and mass closure for airborne particulate matter in Bogotá., 30(2), 105–115.
- Vargas, F., & Rojas, N. (2009). Source apportionment of PM10 in Bogotá, Colombia. In *8th Annual CMAS Conference* (pp. 1–4). CONF.
- Vásquez, E. M. (2013). *Informe Final de Calidad del Aire en el Valle*.
- Vergara, E., & Garcia, F. (2013). Simulación de la dispersión del material particulado proveniente de actividades portuarias en Santa Marta. *Épsilon*, 21(2013), 41–55.
- Viana Rodríguez, M. del M. (2003). *Niveles, composición y origen del material particulado atmosférico en los sectores norte y este de la Península Ibérica y Canarias*. Universitat de Barcelona.
- Watson, J., Cooper, J., & Huntzicker, J. (1984). The effective variance weighting for least squares calculations applied to the mass balance receptor model. *Atmospheric Environment*

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

(1967).

WHO. (2016). Ambient (outdoor) air quality and health.

Yepes, M. G., & Oliver, C. (2013). Exposición laboral a material particulado, nanopartículas y su incidencia en la salud del trabajador. *Laborales: 3, 4 Y 5*.

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

10. Anexos

10.1 Anexos CMB

Archivos necesarios para modelar con CMB 8.2

anexo 10.1.2 archivos AD.TXT.

AD.TXT

ID	DATE	DUR	STHOUR	SIZE	C1	TOT	C11	NA
BAQCUC	4/13/2015	24	0	COARS	58.3	2.7	4.4553	0.0699
BAQCUC	4/25/2015	24	0	COARS	70.8	2.2	5.7108	0.0545
BAQCUC	4/29/2015	24	0	COARS	66.6	2.4	3.2909	0.0946
BAQCUC	5/11/2015	24	0	COARS	58.3	2.7	3.6656	0.0849
BAQCUC	5/25/2015	24	0	COARS	83.3	1.9	3.434	0.0906
BAQCUC	6/9/2015	24	0	COARS	70.8	2.2	3.2915	0.0946
BAQCUC	6/13/2015	24	0	COARS	70.8	2.2	3.4796	0.0894
BAQCUC	6/26/2015	24	0	COARS	58.3	2.7	2.8454	0.1094
BAQCUC	7/17/2015	24	0	COARS	54.1	2.9	1.6835	0.1849

C12	MG	C19	K	C26	FE	C25	MN	C20	CA
1.7853	0.174	1.027	0.303	1.5167	0.205	0.0379	0.082	3.0492	0.102
2.9594	0.105	2.3355	0.133	2.1116	0.147	0.0544	0.057	3.4393	0.09
3.0167	0.103	3.3232	0.094	4.0976	0.076	0.1371	0.023	6.9368	0.045
3.2335	0.096	2.6892	0.116	3.3295	0.093	0.0784	0.04	5.0743	0.061
3.1388	0.099	2.7037	0.115	3.6671	0.085	0.0777	0.04	5.1277	0.061
2.116	0.147	1.8025	0.173	2.2414	0.139	0.0658	0.047	7.116	0.044
2.884	0.108	2.7273	0.114	2.6332	0.118	0.0564	0.055	5.1254	0.061
3.001	0.104	2.1613	0.144	3.4052	0.091	0.0762	0.041	3.5762	0.087
1.8225	0.171	1.4518	0.214	2.0078	0.155	0.0525	0.059	4.093	0.076

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

C203	SO4	C204	NO ₃	C201	OC	C202	EC
16.6633	0.093	0.7477	2.081	27.782	0.56	0.47	0.33
2.083	0.747	0.2124	7.324	5.287	2.94	0.15	1.05
12.4975	0.125	0	0	141.692	0.11	1.31	0.12
16.6633	0.093	0.3145	4.948	9.173	1.7	0.31	0.5
6.2487	0.249	1.4122	1.102	13.772	1.13	1.06	0.15
4.1658	0.374	0.1291	12.05	25.563	0.61	0.85	0.18
6.2487	0.249	0.7936	1.961	6.524	2.39	0.51	0.31
2.0829	0.747	0.3312	4.699	11.387	1.37	0.65	0.24
4.1658	0.374	0.7936	1.961	6.371	2.44	0.62	0.23

Incertidumbres / concentraciones de los contaminantes atmosféricos. Fuente: (Rugeles Ahumada & Silva Tibabija, 2017).

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

anexo 10.1.3 archivo PR.TXT.

CODE	NAME	SIZE	C9	F	C11	NA	C12	MG
	COAR	0.00000	0.00000	0.40000	0.04000	0.04800	0.00900	0.00000
1	MARIN S	0	0	0	0	0	0	0
	COAR	0.00002	0.00000	0.01300	0.00500	0.01200	0.00310	0.07200
2	CDUST S	0	0	0	0	0	0	0
	COAR	0.00008	0.00007	0.01750	0.00091	0.01540	0.00140	0.06600
3	UDUST S	0	0	0	0	0	0	0
	COAR	0.00000	0.00010	0.00000	0.00050	0.00000	0.00500	0.01100
4	AUTPB S	0	0	0	0	0	0	0
	COAR	0.00053	0.00019	0.03500	0.01700	0.00000	0.03000	0.00530
5	RDOIL S	0	0	0	0	0	0	0
	COAR	0.00000	0.01000	0.00650	0.00140	0.00000	0.00000	0.01440
6	VBRN1 S	0	0	0	0	0	0	0
	COAR	0.00320	0.00150	0.00330	0.00340	0.00000	0.01000	0.00450
7	VBRN2 S	0	0	0	0	0	0	0
	COAR	0.00000	0.00500	0.05300	0.00710	0.00000	0.01000	0.00280
8	KRAFT S	0	0	0	0	0	0	0
	COAR	0.00000	0.00000	0.02500	0.00800	0.00730	0.00520	0.00000
9	SULFT S	0	0	0	0	0	0	0
1	HOGF COAR	0.00110	0.00041	0.00690	0.00960	0.00460	0.00170	0.00280
0	U S	0	0	0	0	0	0	0
1	COAR	0.04200	0.01900	0.02400	0.00600	0.02700	0.00550	0.31300
1	ALPRO S	0	0	0	0	0	0	0
1	COAR	0.00000	0.00500	0.01260	0.00480	0.06500	0.00710	0.00650
2	STEEL S	0	0	0	0	0	0	0
1	FERM COAR	0.00290	0.00080	0.03100	0.00300	0.00000	0.04000	0.00640
3	N S	0	0	0	0	0	0	0
1	CARB COAR	0.00000	0.00400	0.00260	0.00170	0.00000	0.00400	0.02800
4	O S	0	0	0	0	0	0	0
1	COAR	0.00054	0.00023	0.09200	0.01000	0.00000	0.01000	0.00190
5	GLASS S	0	0	0	0	0	0	0
1	COAR	0.00000	0.00200	0.00430	0.00050	0.01250	0.00350	0.00860
6	CARBF S	0	0	0	0	0	0	0
1	COAR	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
7	SO ₄ S	0	0	0	0	0	0	0
1	COAR	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
8	NO ₃ S	0	0	0	0	0	0	0
1	COAR	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
9	OC S	0	0	0	0	0	0	0
2	COAR	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
0	EC S	0	0	0	0	0	0	0

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

C13	AL	C14	SI	C16	S	C17	CL	C19	K
0.00000	0.00000	0.00000	0.03300	0.01300	0.40000	0.10000	0.01400	0.00200	0.01400
0.01700	0.29700	0.01500	0.00000	0.00000	0.00000	0.00100	0.02200	0.00240	0.01400
0.00700	0.28000	0.01500	0.00000	0.00020	0.00000	0.00020	0.01030	0.00058	0.03000
0.00500	0.00820	0.00300	0.00400	0.00130	0.03000	0.01000	0.00072	0.00029	0.01250
0.00240	0.00960	0.00480	0.13300	0.02400	0.00000	0.00100	0.00280	0.00100	0.01580
0.00830	0.00890	0.01100	0.00480	0.00300	0.05550	0.01470	0.00600	0.00013	0.01070
0.00510	0.00490	0.00780	0.01600	0.01500	0.09900	0.05100	0.06500	0.04500	0.00920
0.00090	0.00130	0.00013	0.03300	0.00500	0.02900	0.01200	0.00400	0.00110	0.00360
0.00000	0.00400	0.00150	0.12000	0.02000	0.00580	0.00100	0.30000	0.10000	0.02000
0.00090	0.00960	0.00140	0.00590	0.00090	0.00830	0.00760	0.01300	0.00210	0.05200
0.04900	0.00097	0.00080	0.00000	0.00300	0.01200	0.00150	0.00000	0.00100	0.00810
0.00160	0.05000	0.00210	0.01960	0.00070	0.01850	0.00780	0.00920	0.00070	0.06200
0.00130	0.00990	0.00300	0.01700	0.00350	0.00420	0.00160	0.10500	0.03900	0.01300
0.04300	0.12000	0.15000	0.00410	0.00310	0.00990	0.00430	0.00720	0.01100	0.00570
0.00014	0.00250	0.00070	0.11300	0.02300	0.00060	0.00006	0.01370	0.00280	0.00300
0.00130	0.02900	0.01300	0.00540	0.00570	0.00960	0.00630	0.00480	0.00300	0.25800
0.00000	0.00000	0.00000	0.33000	0.03300	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

C20	CA	C22	TI	C23	V	C24	CR	C25	MN
0.00200	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
0.00670	0.00820	0.00150	0.00017	0.00006	0.00010	0.00006	0.00085	0.00028	0.04760
0.00220	0.01010	0.00180	0.00027	0.00005	0.00045	0.00017	0.00100	0.00011	0.05730
0.00500	0.00000	0.00100	0.00000	0.00005	0.00000	0.00010	0.00000	0.00016	0.02100
0.00640	0.00110	0.00038	0.03440	0.00750	0.00047	0.00015	0.00046	0.00013	0.02970
0.00380	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00120	0.00120	0.00190
0.00980	0.00070	0.00070	0.00000	0.00000	0.00012	0.00007	0.00047	0.00042	0.00054
0.00070	0.00000	0.00200	0.00000	0.00001	0.00480	0.00180	0.00052	0.00011	0.01840
0.00200	0.00010	0.00001	0.00000	0.00001	0.00000	0.00001	0.00054	0.00070	0.00066
0.00520	0.00097	0.00080	0.00006	0.00004	0.00007	0.00001	0.00290	0.00040	0.00920
0.00340	0.00076	0.00041	0.00040	0.00011	0.00016	0.00018	0.00000	0.00020	0.00380

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

C82	PB	C201	OC	C202	EC	C203	SO4	C204
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.10000	0.04000	0.00000	0.00000
0.00011	0.04320	0.01700	0.00590	0.00380	0.00004	0.00001	0.00009	0.00005
0.00150	0.03340	0.00980	0.01550	0.00780	0.00074	0.00045	0.00020	0.00010
0.03000	0.50000	0.10000	0.03800	0.01400	0.01300	0.00400	0.00910	0.00300
0.00064	0.07000	0.06200	0.03100	0.02500	0.48100	0.11900	0.00650	0.00440
0.00000	0.59000	0.10000	0.03500	0.03200	0.01600	0.00880	0.05100	0.02500
0.00000	0.47000	0.37000	0.04400	0.08200	0.05000	0.05400	0.02000	0.02500
0.00020	0.15800	0.05300	0.01800	0.01800	0.11800	0.01500	0.00000	0.01400
0.00030	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.56000	0.05600	0.00300	0.00100
0.00003	0.11100	0.05400	0.04300	0.01400	0.01500	0.00370	0.00200	0.00130
0.00100	0.00000	0.02000	0.01600	0.01500	0.01700	0.01100	0.00000	0.02000
0.00070	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.02500	0.01300	0.00000	0.01400
0.00016	0.09000	0.00900	0.01500	0.00150	0.04200	0.00400	0.05700	0.02800
0.00010	0.04600	0.02300	0.24000	0.15000	0.01600	0.01830	0.00830	0.00480
0.00060	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.65000	0.09900	0.00620	0.00350
0.00020	0.04500	0.00780	0.03600	0.01800	0.00930	0.01100	0.00000	0.00500
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	1.00000	0.10000	0.00000	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	1.00000	0.10000
0.00000	1.00000	0.10000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	1.00000	0.10000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

Datos de las fracciones de las concentraciones e incertidumbres emitidos por los perfiles. Fuente: speciate (Cooper & Watson, 1979).

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

anexo 10.1.4: archivos opcionales.

AD.SEL

COD.SITIO	FECHA		TAMAÑO
BAQCUC	4/13/2015	24	0 COARS
BAQCUC	4/25/2015	24	0 COARS
BAQCUC	4/29/2015	24	0 COARS
BAQCUC	5/11/2015	24	0 COARS
BAQCUC	5/25/2015	24	0 COARS
BAQCUC	6/9/2015	24	0 COARS
BAQCUC	6/13/2015	24	0 COARS
BAQCUC	6/26/2015	24	0 COARS
BAQCUC	7/17/2015	24	0 COARS

PR.SEL

PUNTO	NOMENCLATURA	OBSERVACION
1	MARIN	* Marine aerosol
2	CDUST	* continental dust
3	UDUST	* urban dust -- better than cdust in urban cases.
4	AUTPB	* leaded auto exhaust
5	RDOIL	* residual oil combustion
6	VBRN1	* vegetative burning profile 1
7	VBRN2	* vegetative burning profile 2
8	KRAFT	* kraft paper mill
9	SULFT	* sulfite paper mill
10	HOGFU	* hogged fuel boiler
11	ALPRO	* aluminum production
12	STEEL	* steel blast furnace
13	FERMN	* ferromanganese furnace
14	CARBO	* carborundum furnace
15	GLASS	* glass furnace
16	CARBF	* carborundum furnace
17	SO ₄	* single constituent sulfate
18	NO ₃	* single constituent nitrate
19	OC	* single constituent organic carbon
20	EC	* single constituent elemental carbon

Sistematización y descripción de los perfiles empleados. Fuente: (Cooper & Watson, 1979).

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

SP.SEL

CODIGO	NOMBRE	METODO ANALITICO
C1	TOT	Total Mass by Gravimetry
C11	NA	* Sodium by Short-lived Neutron Activation
C12	MG	* Magnesium by Short-lived Neutron Activation
C19	K	* Potassium by X-ray Fluorescence
C20	CA	* Calcium by X-ray Fluorescence
C25	MN	* Manganese by X-ray Fluorescence
C26	FE	* Iron by X-ray Fluorescence
C201	OC	* Organic Carbon by Thermal/Optical Reflectance
C202	EC	* Elemental Carbon by Thermal/Optical Reflectance
C203	SO ₄	* Sulfate by Anion Chromatography

Sistematización de las especies contaminantes y definición de los métodos analíticos empleado

para cada una de ellas. Fuente: (Rugeles Ahumada & Silva Tibabija, 2017).

anexo 10.1.5 resultados cmb.

SPECIE	SOURCE NAME										
	CALCULATE	MEASURE	MARI	UDUS	AUTP	RDOI	KRAF	ALPR	STEE	FERM	
S	D	D	N	T	B	L	T	O	L	N	
C1	40.835	58.3	0.462	1.063	1.527	1.153	-2.89	-0.544	-0.149	0.078	
C11	4.551	4.4553	2.418	0.244	0	0.528	-2.004	-0.171	-0.025	0.032	
C12	0.826	1.7853	0.724	0.535	0	0	0	-0.48	-0.316	0	
C19	0.992	1.027	0.367	0.622	0.062	0.183	-0.656	0	-0.078	0.466	
C26	1.517	1.5167	0	2.342	1.233	1.316	-2.044	-0.079	-1.83	0.063	
C25	0.039	0.0379	0	1.636	0	0.816	-2.312	0	***** *	20.81	
C20	3.069	3.0492	0.124	0.61	0.365	0.348	-0.199	-0.084	-0.176	0.019	
C203	15.78	16.6633	0.162	0.003	0.069	1.94	-1.193	-0.032	-0.013	0.011	
C204	1.519	0.7477	0	0.017	1.083	0.584	0	0	0	0.348	
C201	25.077	27.782	0	0.075	1.602	0.169	-0.958	0	0	0.015	
C202	2.955	0.47	0	2.045	7.198	4.433	-6.453	-1.08	0	0.145	

Contribución de las Especies para cada fuente. Fuente: (Rugeles Ahumada & Silva Tibabija, 2017).

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

10.2. Anexos PMF-5.0

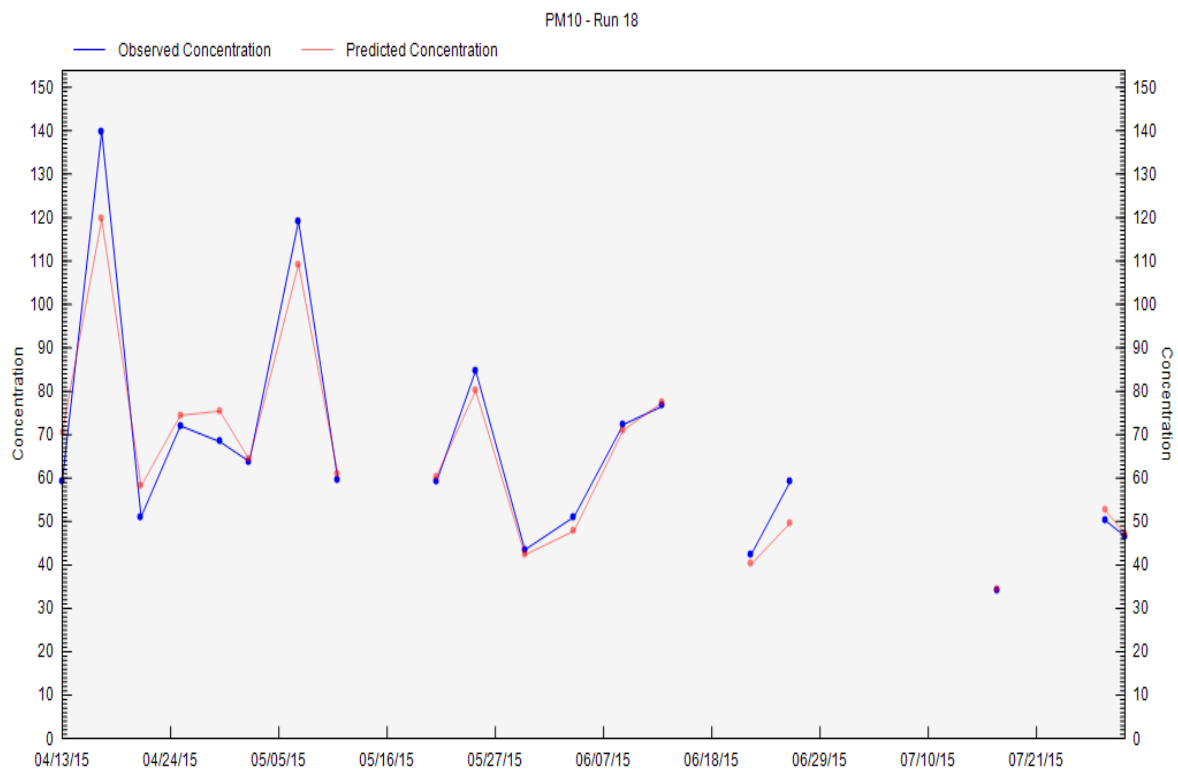
Fecha	PM10	Na	SO ₄	Mg	Ca	K	Fe	P	Sr	OC	EC
4/13/2015	0.3321	0.2364	0.6401	0.4273	0.3249	0.2909	0.7834	0.3214	0.3214	0.1036	0.0019
4/17/2015	0.7829	0.1934	0.9630	0.4887	0.3288	0.5525	0.8614	0.3252	0.3252	0.1032	0.0023
4/21/2015	0.2859	1.7417	0.5239	0.5818	0.3192	0.1429	0.0098	0.3157	0.3157	0.0019	0.0019
4/25/2015	0.4033	0.3030	0.9742	0.5123	0.3290	0.4675	0.8193	0.3254	0.3254	0.0866	0.0037
4/29/2015	0.3828	0.1761	1.2340	0.5233	0.3346	0.6057	0.9230	0.3310	0.3310	0.1475	0.0019
5/2/2015	0.3574	1.9252	0.6753	0.6208	0.3605	0.2760	0.0317	0.3566	0.3566	0.0019	0.0019
5/7/2015	0.6671	0.1953	0.9129	0.5331	0.3235	0.6087	0.8518	0.3200	0.3200	0.1203	0.0018
5/11/2015	0.3336	0.1953	0.7107	0.5337	0.3306	0.5170	0.8785	0.3270	0.3270	0.0821	0.0027
5/21/2015	0.3307	0.1980	0.7503	0.4649	0.3238	0.4559	0.8120	0.3203	0.3203	0.0814	0.0036
5/25/2015	0.4745	0.1822	0.6844	0.5159	0.3196	0.5121	0.8689	0.3161	0.3161	0.0818	0.0011
5/30/2015	0.2434	0.1365	0.5856	0.4033	0.3286	0.2771	0.8023	0.3250	0.3250	0.1086	0.0028
6/4/2015	0.2859	1.4337	0.5535	0.2984	0.3192	0.0601	0.0140	0.3157	0.3157	0.0019	0.0019
6/9/2015	0.4050	0.2188	0.7508	0.5095	0.3237	0.5293	0.8403	0.3202	0.3202	0.0857	0.0056
6/13/2015	0.4287	0.2111	0.8907	0.6085	0.3527	0.6087	1.0504	0.3489	0.3489	0.1344	0.0027
6/22/2015	0.2372	0.1840	0.4415	0.5130	0.3198	0.4502	0.8659	0.3163	0.3163	0.0991	0.0028
6/26/2015	0.3321	1.5506	0.3863	0.3081	0.3127	0.0751	0.0137	0.3093	0.3093	0.0019	0.0019
7/17/2015	0.1898	0.1221	0.5860	0.4294	0.3177	0.3545	0.7980	0.3142	0.3142	0.1017	0.0034
7/28/2015	0.2812	1.7254	0.5481	0.4470	0.3582	0.2092	0.0157	0.3543	0.3543	0.0019	0.0019
7/30/2015	0.2610	0.2561	0.6384	0.4619	0.3172	0.4178	0.7906	0.3138	0.3138	0.1119	0.0034

Archivo de entrada 2 “*uncertainty data file*”. Fuente: (Rugeles Ahumada & Silva Tibabija, 2017).

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

anexo 10.2.1. obs/pred time series.

Teniendo en cuenta lo discutido anteriormente en la sección de “Serie de tiempo observada / prevista”, a continuación se adjunta información complementaria con respecto a los demás elementos y compuestos analizados en el modelo, adicionalmente se recuerda que la finalidad de ilustrar las gráficas que a continuación se podrán observar, es determinar los componentes y elementos que se ajustan de manera aceptable. Se muestra la fecha y las concentraciones observadas y previstas para la muestra más cercana a la línea de referencia punteada vertical negra. Se muestran en azul las especies seleccionadas, y en rojo se muestran los datos predichos por el modelo.



Concentración observada/predicha para el PM_{10} . Fuente: (Rugeles Ahumada & Silva Tibabija, 2017).

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

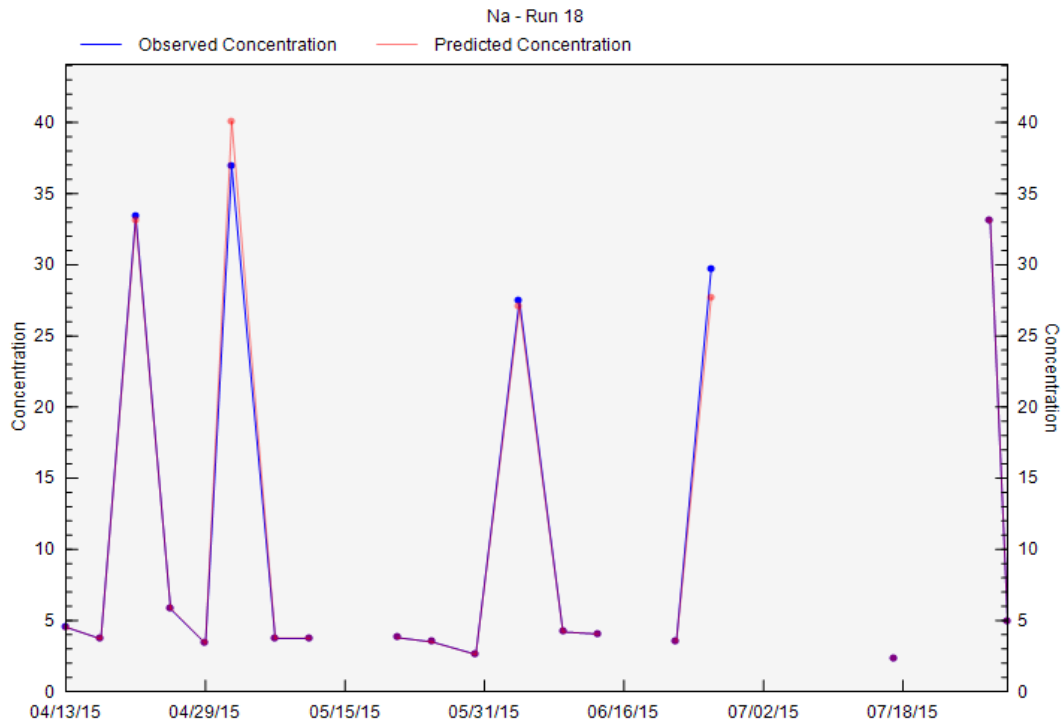


Gráfico de Concentración observada / predicha para el Na. Fuente: (Rugeles Ahumada & Silva Tibabija, 2017).

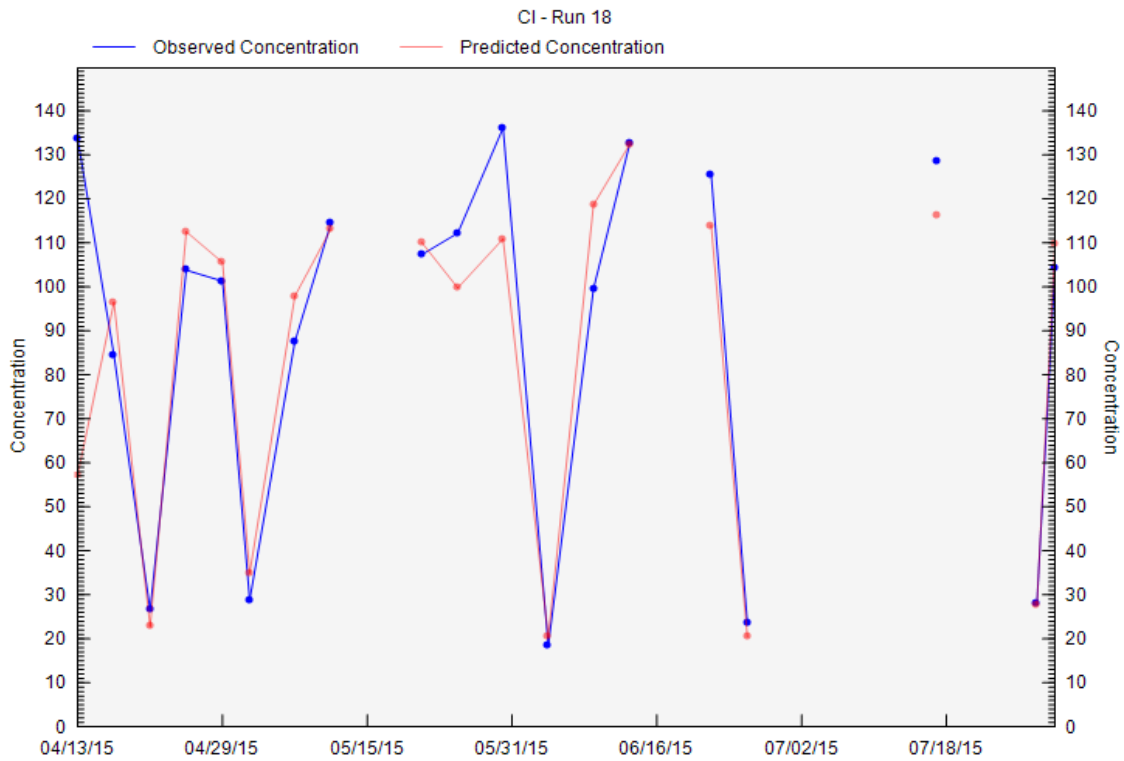


Gráfico de concentración observada / predicha para el Cl. Fuente: (Rugeles Ahumada & Silva Tibabija, 2017).

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

Tibabija, 2017)

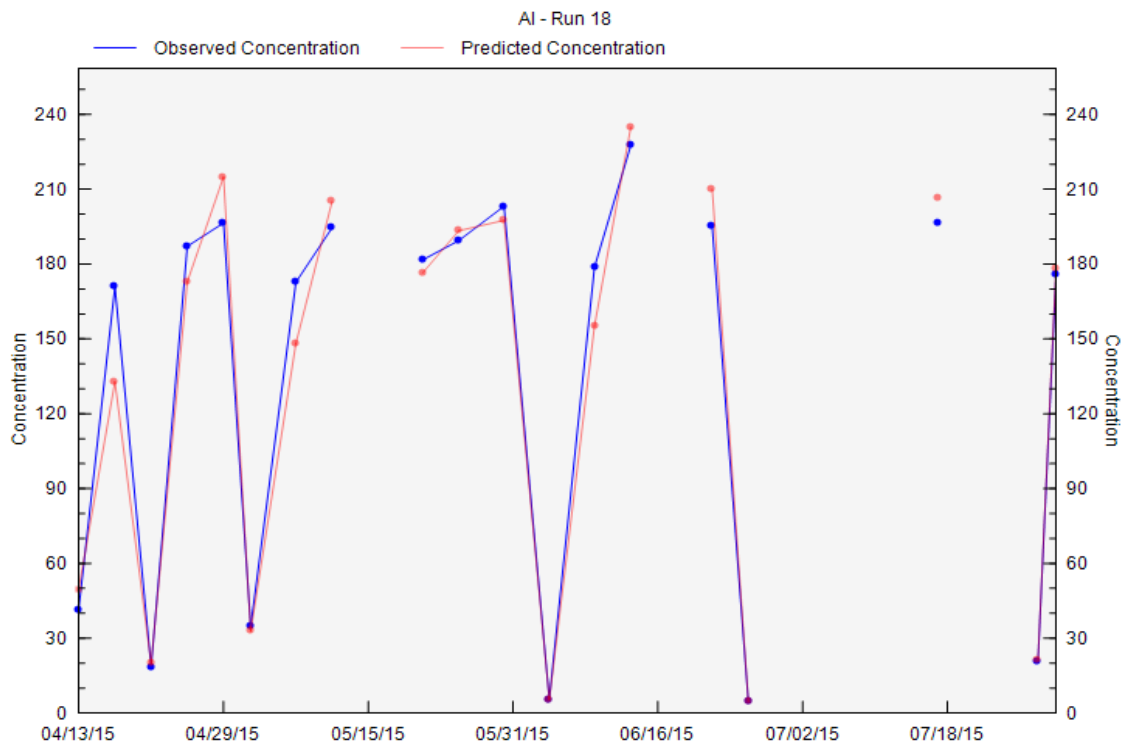


Gráfico de concentración observada / predicha para el Al. Fuente: (Rugeles Ahumada & Silva Tibabija, 2017).

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

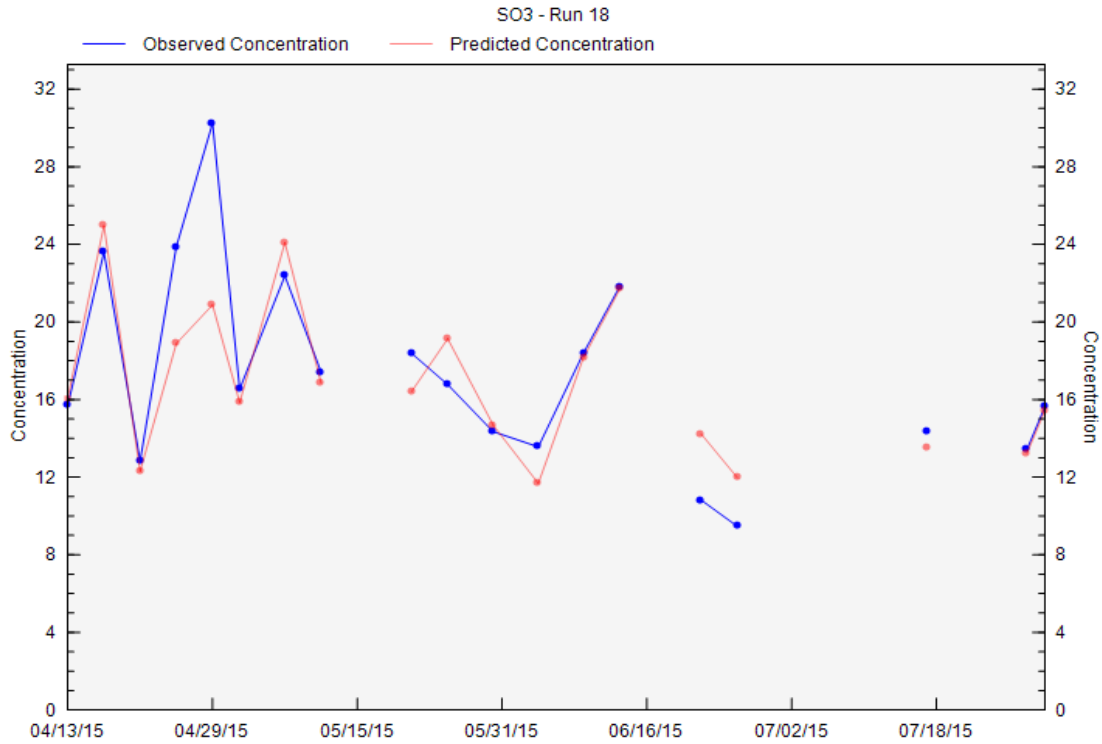
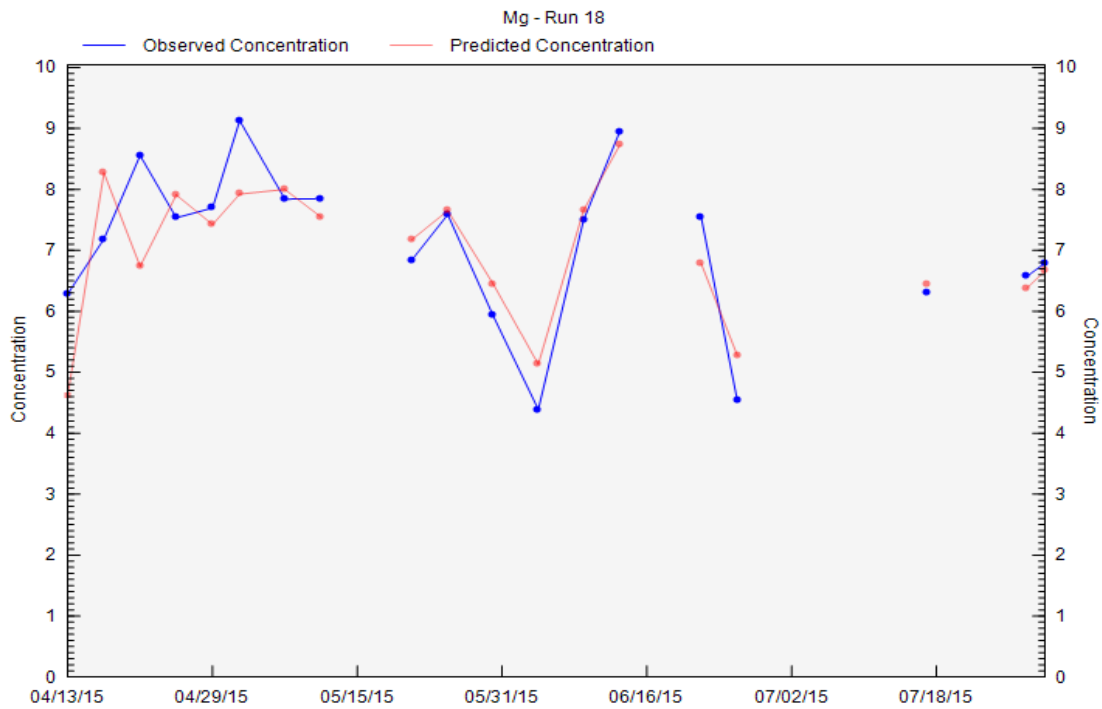


Gráfico de concentración observada / predicha para el SO_4 . Fuente: (Rugeles Ahumada & Silva Tibabija, 2017).



ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

Gráfico de concentración observada / predicha para el Mg. Fuente: (Rugeles Ahumada & Silva Tibabija, 2017).

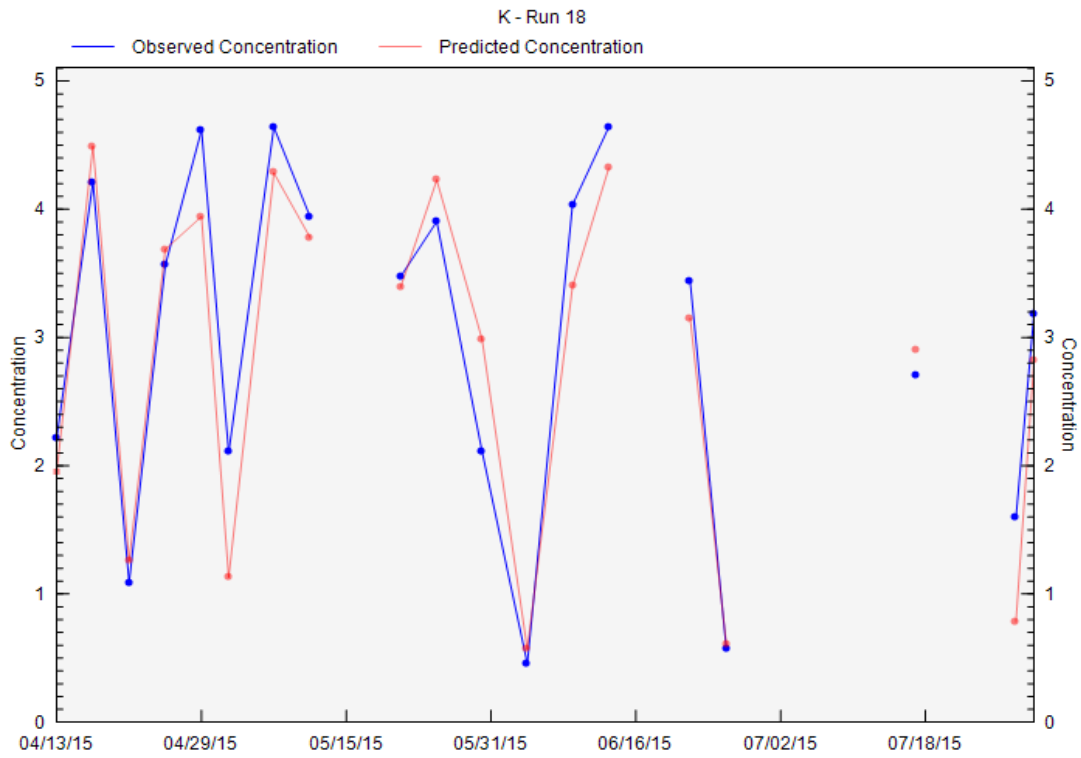


Gráfico de concentración observada / predicha para el K. Fuente: (Rugeles Ahumada & Silva Tibabija, 2017).

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

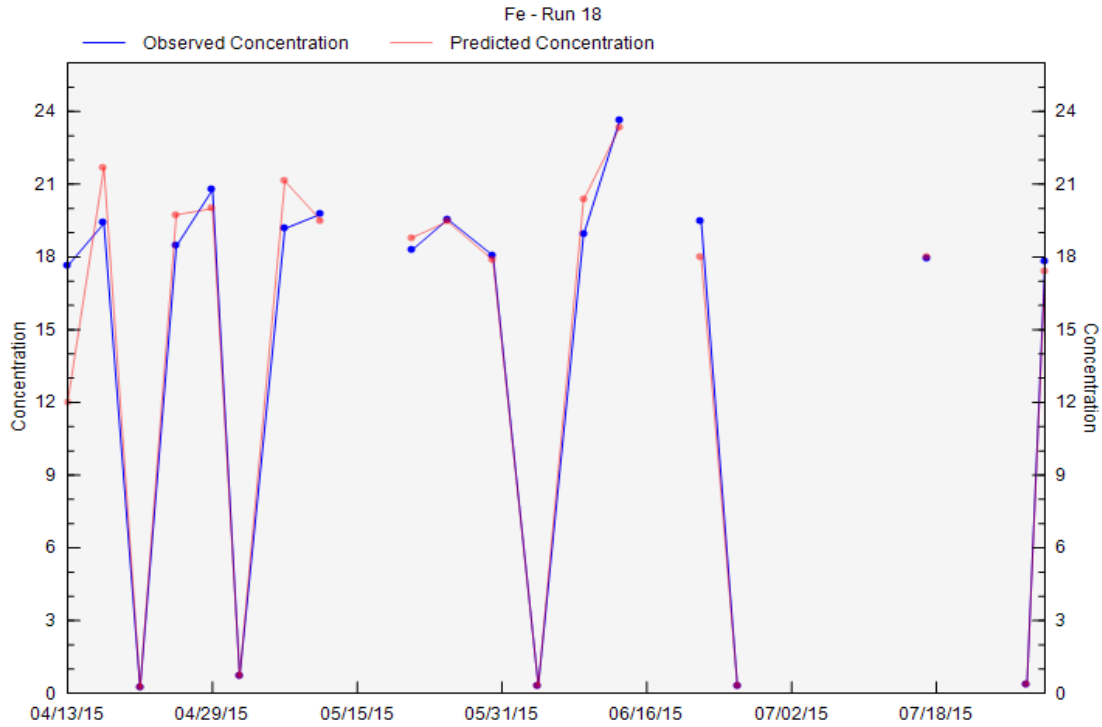


Gráfico de concentración observada / predicha para el Fe. Fuente: (Rugeles Ahumada & Silva Tibabija, 2017).

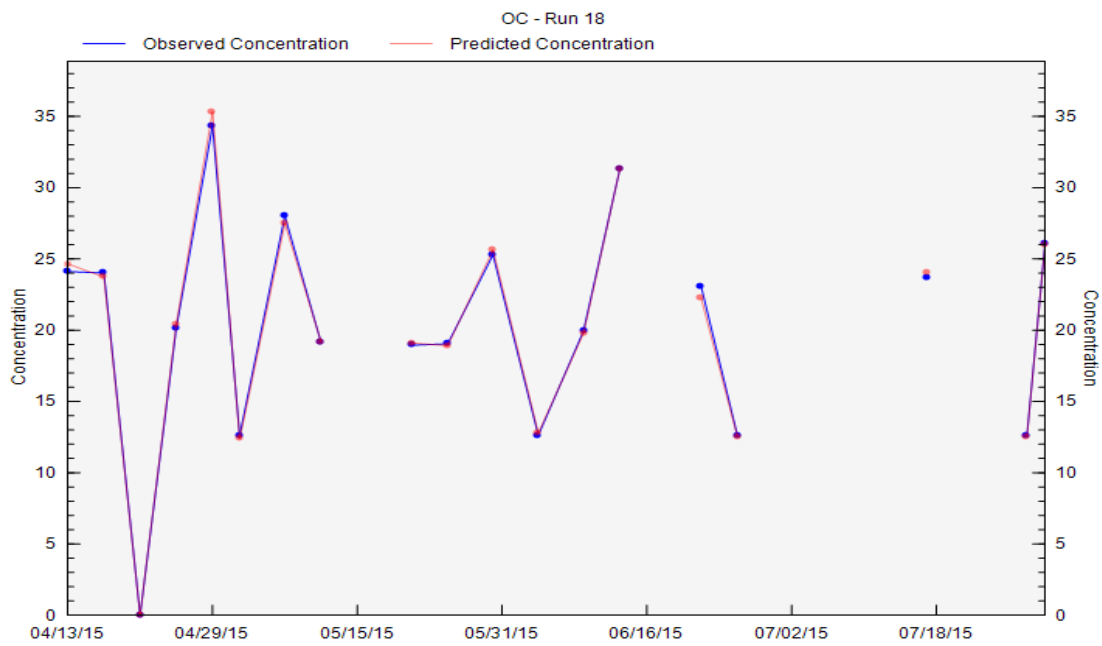


Gráfico de concentración observada / predicha para el OC. Fuente: (Rugeles Ahumada & Silva Tibabija, 2017).

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS

Tibabija, 2017).

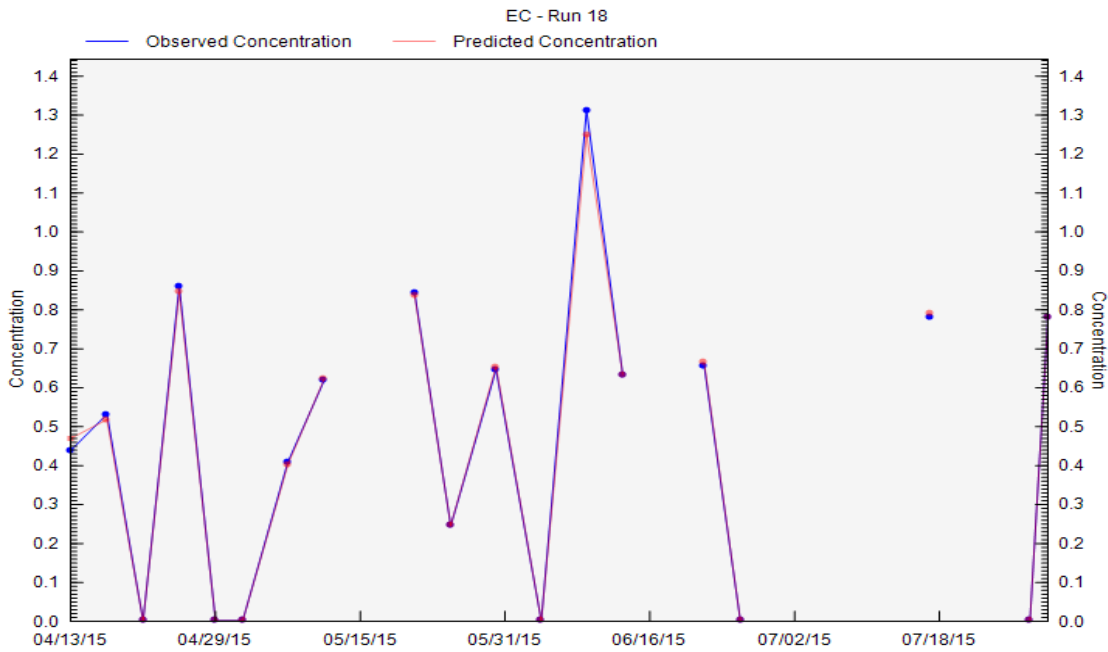
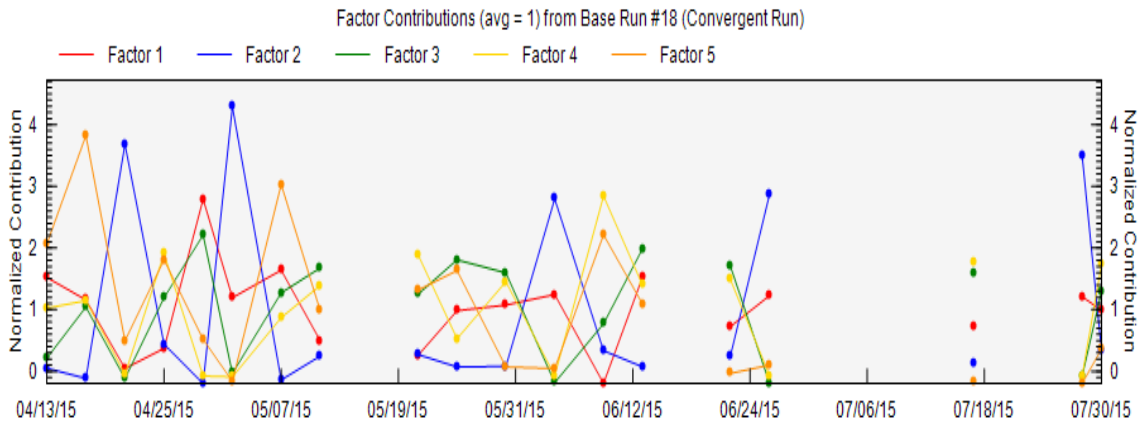


Gráfico de concentración observada / predicha para el EC. Fuente: (Rugeles Ahumada & Silva Tibabija, 2017).

anexo 10.2.2. contribución.

De todos los factores a la masa total por muestra, como se expone en la figura, el gráfico se normaliza de modo que el promedio de todas las contribuciones para cada factor es 1, permitiendo una comparación del patrón temporal de las contribuciones de la fuente.

ESTIMACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES EMISORAS



Contribución de cada factor evaluado – corrida 18. Fuente: (Rugeles Ahumada & Silva Tibabija, 2017).