

**Identificación de trazadores orgánicos en la composición química del material particulado
en tres zonas de la ciudad de Bogotá**

María Fernanda Muñoz Buenahora

Jeraldine Vargas Ayala

Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga

Escuela de Ingenierías

Facultad de Ingeniería Ambiental

Bucaramanga

2019

Identificación de trazadores orgánicos en la composición química del material particulado en tres
zonas de la ciudad de Bogotá

María Fernanda Muñoz Buenahora

Jeraldine Vargas Ayala

Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de:

Ingeniera Ambiental

Director del Proyecto

Kento Taro Magara Gómez, PhD  91.289.494 de Bucaramanga

Profesor Facultad de Ingeniería Ambiental

Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga

Escuela de Ingenierías

Facultad de Ingeniería Ambiental

Bucaramanga

2019

NOTA DE ACEPTACIÓN

FIRMA DEL JURADO

FIRMA DEL JURADO

Dedicatorias

Este título como Ingeniera Ambiental ha sido construido gracias a mi familia por su apoyo y confianza incondicional. Por eso mi trabajo y dedicación durante toda mi carrera va dedicado especialmente a mi madre. En mi formación durante estos años recibí y compartí muchas experiencias positivas que aportaron a mi vida. Por esto y por su compañía incondicional y enseñanzas, también quiero dedicarles este logro a mis amigos y profesores.

Jeraldin.

El camino a la excelencia es la suma constante de los esfuerzos propios y también del sacrificio de otros que los hicieron suyos. En este triunfo colectivo, dedico a mis acompañantes de siempre: los que me inspiran, los que me educan, los que me ilustran, los que me guían, los que me corrigen, los que me hacen mejor ser humano. Pero sobre todos ellos, a los que siempre harán de mis éxitos motivo de su felicidad: a ustedes mis amados Padres; porque este título de Ingeniera Ambiental es nuestro.

María Fernanda.

Agradecimientos

En primer lugar, le agradezco a Dios, por permitirme vivir esta experiencia y por poner las herramientas para mi formación como ingeniera Ambiental, al igual que darme la oportunidad de conocer excelentes personas que aportaron a mi formación como profesional y ser humano. A mi madre y hermanos por su apoyo incondicional, a mis compañeros y maestros por su ayuda durante este proceso de formación. A mi director de proyecto de grado Kento Taro Magara Gómez, PhD, por su valiosa contribución en la realización de este trabajo.

Jeraldin Vargas Ayala.

En primer lugar doy infinitas gracias a Dios por darme fuerza y valor para culminar esta etapa de mi vida profesional, agradezco la confianza y el apoyo brindado por parte de mi madre que sin duda alguna en el trayecto de mi formación me ha demostrado su amor corrigiendo mis faltas y celebrando mis triunfos, a mi padre que siempre lo he sentido presente y que está orgulloso de la persona que me he convertido, a mi hermana y mi sobrina que con sus consejos me ayudan a afrontar los retos presentados a lo largo del camino. A mi director de proyecto de grado Kento Taro Magara Gómez, PhD, por su paciencia y entrega durante estos meses en la realización de este trabajo.

María Fernanda Muñoz.

Tabla de Contenido

Introducción	14
1. Planteamiento del Problema	16
1.1 Formulación pregunta de investigación.....	16
2. Antecedentes	17
3. Justificación	20
4. Objetivos	21
4.1 Objetivo General.....	21
4.2 Objetivos Específicos.....	21
5. Marco Teórico.....	22
5.1 Material particulado	22
5.2 Tamaño de material particulado	22
5.2.1 Fracción gruesa (PM10).	22
5.2.2 Fracción fina (PM2.5).....	22
5.3 Composición Química del Material Particulado.....	22
5.3.1 Especies carbonácea.....	23
5.3.2 Carbono Elemental.....	23
5.4 Efectos en la salud del material particulado.	23
5.5 Efectos en el medio ambiente del material particulado.	24
5.6 Norma de calidad de aire ambiente	25
6. Metodología	27

6.1 Caracterización de los sitios de muestreo seleccionados.....	27
6.2 Determinación de las concentraciones de material particulado colectado en los puntos de muestreo:	27
6.3 Caracterización química del material particulado	27
6.3.1 Carbono orgánico y carbono elemental (OCEC).....	28
6.3.2 Especies iónicas.....	28
6.3.3 Elementos en trazas.....	28
6.3.4 Especies orgánicas.	28
6.4 Implementación metodológica	28
6.4.1 Distribución espacial y temporal.	31
6.4.2 Relación entre los trazadores orgánicos hallados.	31
6.4.3 Elaboración del informe final.	31
7. Resultados y Análisis de los resultados	32
7.1 Alcanos	32
7.1.1 Distribución Temporal PM10 Colegio La Salle, Estación de Bomberos, Sec. Movilidad. .	32
7.1.2 Distribución de Tamaño Colegio La Salle PM2.5/PM10.	35
7.1.3 Distribución Espacial PM10 Colegio La Salle, Estación de Bomberos, Sec. Movilidad. ...	39
7.2 Esteranos.....	42
7.2.1 Distribución Temporal PM10 Colegio La Salle, Estación de Bomberos, Sec. Movilidad. .	42
7.2.2 Distribución de Tamaño Colegio La Salle PM2.5y PM10	45
7.2.3 Distribución Espacial PM10 Colegio La Salle, Estación de Bomberos, Sec. Movilidad. ...	46
7.3 Hópanos	47
7.3.1 Distribución Temporal PM10 Colegio La Salle, Estación de Bomberos, Sec. Movilidad. .	47
7.3.2 Distribución de Tamaño Colegio La Salle PM2.5/PM10	49

7.3.3 Distribución Espacial PM10 Colegio La Salle, Estación de Bomberos, Sec. Movilidad. ...	50
7.4 HAPS	52
7.4.1 Distribución Temporal PM10 Colegio La Salle, Estación de Bomberos, Sec. Movilidad. .	52
7.4.2 Distribución de Tamaño Colegio La Salle PM2.5/PM10	55
7.4.3 Distribución Espacial PM10 Colegio La Salle, Estación de Bomberos, Sec. Movilidad. ...	58
8. Conclusiones	62
9. Recomendaciones	65

Lista de tablas

Tabla 1	24
Tabla 2	26
Tabla 3	26
Tabla 4	30

Lista de figuras

Figura 1. Distribución temporal Colegio La Salle PM10	32
Figura 2. Distribución temporal Estación de Bomberos PM10	32
Figura 3. Distribución temporal Sec. Movilidad PM10.....	33
Figura 4. Distribución de Tamaño n-C21	35
Figura 5. Distribución de Tamaño n-C22	36
Figura 6. Distribución de Tamaño n-C23	36
Figura 7. Distribución de Tamaño n-C24	37
Figura 8. Distribución de Tamaño n-C25	37
Figura 9. Distribución de Tamaño n-C27	38
Figura 10. Distribución Espacial n-C21.....	39
Figura 11. Distribución Espacial n-C22.....	39
Figura 12. Distribución Espacial n-C23.....	40
Figura 13. Distribución Espacial n-C24.....	40
Figura 14. Distribución Espacial n-C25.....	41
Figura 15. Distribución Espacial n-C27.....	41
Figura 16. Distribución temporal Colegio La Salle PM10	42
Figura 17. Distribución temporal Estación de Bomberos PM10.	43
Figura 18. Distribución temporal Sec. Movilidad PM10.....	43
Figura 19. Distribución de Tamaño CHO 29.....	45
Figura 20. Distribución Espacial CHO 29	46
Figura 21. Distribución Temporal Colegio La Salle.....	47

Figura 22. Distribución Temporal Estación de Bomberos.....	47
Figura 23. Distribución Temporal Sec. Movilidad	48
Figura 24. Distribución de Tamaño HP-30.....	49
Figura 25. Distribución de Tamaño HP-31R	50
Figura 26. Distribución Espacial HP-30	51
Figura 27. Distribución Espacial HP-31R	51
Figura 28. Distribución Temporal Colegio La Salle.....	52
Figura 29. Distribución Temporal Estación de Bomberos.....	53
Figura 30. Distribución Temporal Sec. Movilidad	53
Figura 31. Distribución de Tamaño Fluoranteno	55
Figura 32. Distribución de Tamaño Pireno.....	55
Figura 33. Distribución de Tamaño BeP.....	56
Figura 34. Distribución de Tamaño BghiP	56
Figura 35. Distribución de Tamaño Piceno	57
Figura 36. Distribución de Tamaño Coroneno	57
Figura 37. Distribución Espacial Fluoranteno	58
Figura 38. Distribución Espacial Pireno	59
Figura 39. Distribución Espacial BghiP.....	59
Figura 40. Distribución Espacial Piceno.....	60
Figura 41. Distribución Espacial Coroneno.....	60

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO:	Identificación de trazadores orgánicos en la composición química del material particulado en tres zonas de la ciudad de Bogotá
AUTOR(ES):	María Fernanda Muñoz Buenahora y Jeraldine Vargas Ayala
PROGRAMA:	Facultad de Ingeniería Ambiental
DIRECTOR(A):	Kento Taro Magara Gómez

RESUMEN

Se determinó la concentración de varios compuestos orgánicos que se consideran como trazadores de fuentes de emisión de material particulado (PM). Las familias de especies orgánicas analizadas fueron alcanos, hopanos y esteranos, e hidrocarburos aromáticos policíclicos, en extractos de material particulado PM10 y PM2.5, por medio de la técnica de cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC/MS). Las muestras de material particulado fueron colectadas en tres sitios estratégicos de la ciudad de Bogotá por sus condiciones ambientales; el sitio de muestreo de alta influencia de tráfico vehicular operado con motores de gasolina y diésel se denomina Estación Movilidad; el sitio de muestreo con mayor influencia de tráfico pesado operado con motores diésel, así como por fuentes industriales se denominó Estación Bomberos, y el sitio de muestreo considerado como blanco o de fondo se denomina La Salle. En los dos puntos nombrados inicialmente se colectaron muestras de PM10, mientras en la estación La Salle se colectaron muestras de PM10 y PM2.5, con el fin de conocer la distribución por tamaños de las especies mencionadas en el inicio. Dentro de la familia de alcanos alifáticos de cadenas de más de 20 carbonos, se encontraron como especies predominantes los alcanos con 24, 25, 26 y 27 carbonos en el PM10, de los cuáles son trazadores de combustión de fósiles (gasolina y diésel, 24 y 25), y de quema de biomasa (C26 y C27). De las familias hopanos y esteranos, predominaron las especies HP29-RS y HP30 de hopanos, y CH26 y CHOR de esteranos, trazadores de combustión de diésel, gasolina y carbón (HP30 y CHOR). En cuanto a los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs), predominaron las especies fluoranteno, pireno, Benzo(a)antraeno, criseno, Benzo(a)pireno, Benzo(ghi)pireno, I123CdP y coroneno, todos trazadores de combustión de fósiles.

PALABRAS CLAVE:

Hidrocarburos aromáticos policíclicos, esteranos, Hopanos, PM10 y PM2.5

Vº Bº DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

*Trabajo de grado modalidad proyecto de investigación.

**Facultad de Ingeniería Ambiental, Escuela de Ingenierías, Director PhD MAGARA GÓMEZ, Kento Taro.

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: Identification of organic tracers in the chemical composition of the particulate material in three zones of the city of Bogotá

AUTHOR(S): María Fernanda Muñoz Buenahora and Jeraldine Vargas Ayala

FACULTY: Facultad de Ingeniería Ambiental

DIRECTOR: Kento Taro Magara Gómez

ABSTRACT

The concentration of several organic compounds that are considered as tracers of particulate matter (PM) emission sources was determined. The families of organic species analyzed were alkanes, hopanos and esteranos, and polycyclic aromatic hydrocarbons, in PM10 and PM2.5 particulate material extracts, by means of the gas chromatography technique coupled to mass spectrometry (GC / MS). The samples of particulate material were collected in three strategic sites of the city of Bogotá due to their environmental conditions; the sampling site of high influence of vehicular traffic operated with gasoline and diesel engines is called Mobility Station; The sampling site with the greatest influence of heavy traffic operated with diesel engines, as well as by industrial sources, was named Bomberos Station, and the sampling site considered as white or background is called La Salle. In the two points named initially, samples of PM10 were collected, while in the La Salle station samples of PM10 and PM2.5 were collected, in order to know the size distribution of the species mentioned in the beginning. Within the family of aliphatic alkanes of chains of more than 20 carbons, alkanes with 24, 25, 26 and 27 carbons in PM10 were found as predominant species, of which they are tracers of fossil combustion (gasoline and diesel, 24 and 25), and biomass burning (C26 and C27). Of the families hopanos and esteranos, the species HP29-RS and HP30 of hopanos predominated, and CH26 and CHOR of esteranos, tracers of combustion of diesel, gasoline and coal (HP30 and CHOR). As regards polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), the fluoranthene, pyrene, Benzo (a) anthracene, chrysene, Benzo (a) pyrene, Benzo (ghi) pyrene, 1123CdP and coronen species predominated, all fossil combustion tracers.

KEYWORDS:

Polycyclic aromatic hydrocarbons, Esteranos, Hopanos, PM10 and PM2.5

Vº Bº DIRECTOR OF GRADUATE WORK

*Work of degree modality research project.

** Faculty of Environmental Engineering, School of Engineering, PhD Director MAGARA GÓMEZ, Kento Taro.

Introducción

La contaminación atmosférica a nivel mundial es un riesgo ambiental para la salud ya que se encuentra atado a la quema de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas), procesos industriales y el acelerado desarrollo urbano. La Organización Mundial de la Salud (OMS) estimó que de cada nueve muertes en todo el mundo es el resultado de condiciones relacionadas con la contaminación atmosférica. El material particulado (PM) son partículas de diámetro $< 10 \mu\text{m}$, que contiene sólidos microscópicos y gotas de líquido de pequeño tamaño que pueden inhalarse y penetrar profundamente en los pulmones y en el sistema cardiovascular, causando enfermedades mortales como ataques al corazón, derrames cerebrales, obstrucciones pulmonares e infecciones respiratorias, incluyendo neumonía, siendo una de las principales causas de muerte de los menores de cinco años (ONU, 2019). Los contaminantes por material particulado pueden ser de origen natural y antropogénico (actividad humana), estas partículas vienen de diferente tamaño y forma, están conformadas por químicos. Algunas se emiten directamente de la fuente, como obras en construcción, actividades industriales. Los niveles de contaminación por partículas en suspensión pueden ser elevados en cualquier mes del año. La mayoría de las partículas se forman en la atmósfera como producto de reacciones químicas, como el óxido de nitrógeno y el dióxido de azufre los cuales son contaminantes emitidos por industrias, centrales eléctricas y automóviles (USEPA, 2019). El viento transporta partículas en diferentes direcciones y largas distancias, donde estas se incorporan al suelo o fuentes hídricas. Según la composición química del material particulado estas ocasionan algunos efectos de sedimentación.

Se ha logrado identificar los mayores emisores de contaminantes del aire, según La Secretaría Distrital de Ambiente SDA, los cuales han sido actualizados en varias ocasiones. Se ha determinado que las fuentes móviles e industrias tienen un gran valor significativo en cuanto a

las emisiones de contaminantes. Siendo el material particulado el contaminante con mayor contribución en las industrias el cual aportan aproximadamente el 60 % de las emisiones y las fuentes móviles el 40 %. Sin embargo, las fuentes móviles tienen más impacto debido a la cercanía de la población a las fuentes de emisión de contaminantes.

Considerando únicamente as fuentes móviles se ha demostrado que los vehículos con motor Diésel contribuyen al 90 % de las emisiones de material particulado, quedando un restante del 10 % el cual es emitido por motocicletas con motores de dos tiempos (SEMANA SOSTENIBLE, 2018). Según la Universidad del Rosario la ciudad de Bogotá fue declarada en alerta por contaminación en el ambiente. Debido al aumento del material particulado en el aire en algunos sectores de la ciudad, se determinó decretar alerta Amarilla. Y el Suroccidente de la ciudad fue declarado alerta Naranja. Bogotá y Medellín registran las mayores concentraciones de material particulado en la atmosfera. Según los resultados arrojados por algunas estaciones de monitoreo indica que en Bogotá se concentra la mayor cantidad de PM10 en Colombia, esto significa que los habitantes están expuestos a pequeñas partículas sólidas o líquidas. Mientras las estaciones del municipio de Sabaneta (Antioquia) y el centro de Medellín reportan grandes cantidades de PM2.5, partículas suspendidas de tamaño menor a 2,5 micras, estas pueden afectar la salubridad de las personas debido a que proviene de emisiones vehiculares (Diésel).

1. Planteamiento del Problema

El problema de la contaminación del aire es un asunto aún sin resolver a pesar de los esfuerzos realizados desde hace décadas por las autoridades ambientales a nivel mundial, por esto es común que aún se desarrollen investigaciones al respecto con el fin de reunir la mayor cantidad de información y desarrollar las técnicas necesarias para poder cumplir con el propósito de mejorar la calidad del aire que respiramos.

La ciudad de Bogotá, por ser la capital de nuestro país, posee varias características como superpoblación, alta producción industrial, y uso masificado de vehículos impulsados por motores de combustión interna, lo que ocasiona una pobre calidad de aire, especialmente a causa de altas concentraciones de material particulado (PM). Para comenzar a resolver el problema de la contaminación del aire por material particulado en esta ciudad se hace necesario buscar su origen, para lo cual se aplican herramientas como modelos de receptor-fuente, que requieren información detallada de la composición química del PM. Entre mayor sea el nivel de detalle de la caracterización química de este contaminante, más acertados serán los resultados de la aplicación de los modelos. La caracterización de compuestos orgánicos es siempre la más complicada y costosa, pero a su vez muy útil a la hora de identificar fuentes de emisión. Varias de las principales fuentes de emisión de PM respirable como combustión de carbón, diésel o gasolina, emiten especies específicas, que pueden utilizarse como trazadores de estas fuentes.

1.1 Formulación pregunta de investigación

En este contexto aparece la siguiente cuestión: ¿Qué trazadores orgánicos aparecen en la composición química del material particulado del aire de la ciudad de Bogotá?

Para dar respuesta a esta pregunta primero es necesario plantearse las siguientes: ¿cuál es la composición química del material particulado del aire en la ciudad de Bogotá? Y, ¿qué trazadores orgánicos son adecuados para relacionar el material particulado con sus fuentes.

2. Antecedentes

Dos de los países que tienen ciudades con altos niveles de contaminantes en el aire son China y Estados Unidos, por esto es interesante conocer estudios sobre este tema que hayan sido desarrollados en estos países.

Un estudio de DeMinter, Mieritz y Shelton (2009) tuvo como objetivo entender como las fuentes primarias de PM_{2.5} carbono orgánico (OC) contribuyen a la contaminación por partículas finas en las ciudades de Cleveland, Cincinnati y Mingo Junction del estado de Ohio y Detroit del estado de Michigan de los Estados Unidos. Éste estudio fue realizado en función de la ubicación y de diferentes escalas de tiempo (días, semanas, meses y estaciones); incluso, en los casos en los que fue posible, se hizo la distinción entre la contribución local y la regional de OC. También evaluaron que tan importante era la contribución de las fuentes puntuales de OC y carbono elemental (EC) sobre la concentración de PM_{2.5} en los lugares de recolección de las muestras y en el caso de encontrar relevancia, determinaron donde estaban ubicados estas fuentes de OC y CE. También evaluaron si el carbono orgánico soluble en agua (WSOC) y los ácidos orgánicos de bajo peso molecular pueden ser utilizados para medir las contribuciones de PM_{2.5} debidas a carbono orgánico secundario (SOC) y si el potasio soluble en agua (WSK) puede ser utilizado para medir las contribuciones de PM_{2.5} debidas a la combustión de biomasa. Del análisis de las fuentes primarias de PM_{2.5} OC, se encontró un posible componente regional a nivel estatal sobre el cual las fuentes urbanas en Cincinnati, Cleveland y Mingo Junction fueron superpuestas y las

comparaciones de las concentraciones totales de OC entre sitios y la composición general reveló que la mayoría de OC en Cleveland y Detroit se debió a OC de toda la ciudad y regional. Se encontró también que las variaciones espacial y temporal de las contribuciones de las fuentes de OC dependen en gran medida de la resolución temporal del muestreo. Estudios intensivos de medición encontraron muchas veces diferencias similares entre las contribuciones entre un día respecto a otro que entre una estación del año y otra.

Ahora, el estudio de Bei-Bing et al. (2017) nos dice que la gran concentración de $PM_{2.5}$ en el aire ha sido un gran reto para el control de la contaminación atmosférica en China; además, afirma que muchos estudios chinos sobre la distribución de las fuentes de aerosol se concentraron solo en una parte de $PM_{2.5}$ o carecen de la contribución de las fuentes identificadas con la necesaria variación espacio-temporal, lo cual las hacía poco convincentes para la formulación de políticas gubernamentales. En cambio, este estudio seleccionó cinco sitios distintos para realizar en ellos una observación simultánea de $PM_{2.5}$ en una ciudad industrial en el delta del río Perle del sur de China durante las cuatro estaciones del año 2014 aplicando un modelo de factorización matricial positiva a los conjuntos de datos de las especies químicas medidas para realizar una distribución de fuentes la cual tuvo los siguientes resultados: el promedio anual de la concentración de $PM_{2.5}$ fue de 53 mg/m^3 con las siguientes fuentes con mayor contribución: emisiones de vehículos de combustión interna 21 %, sulfatos secundarios 20 %, combustión de biomasa 11% y aerosol orgánico secundario (SOA) 10%; otras fuentes: emisiones de barcos, polvo fugitivo, nitrato secundario, emisiones industriales y combustión del carbón, cada una con contribuciones entre 5 % y 8 %. Además, las variaciones espaciotemporales de las fuentes revelaron que el sulfato secundario, la combustión de biomasa, el SOA y las emisiones de barcos poseen características obvias de fuentes de contaminación

regional; en cambio, las emisiones de vehículos, el nitrato secundario, la combustión de carbón, el polvo fugitivo y las emisiones industriales muestran características evidentes de emisiones locales. También se encontró en este estudio que en los días en que excedieron el estándar ($PM_{2.5} > 75 \text{ mg/m}^3$) se presentó un aumento en la concentración en el aire de nitrato secundario, SOA y la combustión de biomasa, lo cual indica que las fuentes primarias relevantes o las emisiones de precursores deben controlarse más estrictamente.

Otros estudios previos identificaron trazadores orgánicos como ciertos congéneres de hidrocarburos aromáticos policíclicos, levoglucosan, y congéneres de hópános y esteranos en muestras ambientales de $PM_{2.5}$, en ciudades como Lahore, Pakistán, y ciudad de México. Entre las especies encontradas en Lahore, están: Benzo(a) pireno y piceno, trazadores de combustión de fósiles como carbón mineral, levoglucosan, trazador de la quema de biomasa, y hópános como el trisnorhopano y norhopano, trazadores de la quema de aceite lubricante, carbón y emisiones de motores de combustión interna (Elizabeth Stone et al. 2010). En ciudad de México, se llevó a cabo parte del estudio Megacity Initiative: Local and Global Research Observations (MILAGRO), enfocado a la caracterización química y transformaciones de contaminantes atmosféricos generados y transportados desde áreas urbanas. La contaminación generada en megaciudades como México DF presenta altos riesgos para la salud humana no solo en esa ciudad, si no en lugares a los que puedan ser transportados. Además de verse desfavorecida por las condiciones meteorológicas y topográficas, la cantidad de fuentes fijas y móviles en esta ciudad empobrecen la calidad del aire ambiente constantemente. Como en otras grandes ciudades del mundo, uno de los principales contaminantes es el material particulado fino ($PM_{2.5}$), por lo tanto, identificar sus principales fuentes de emisión es imperativo a la hora de redactar e implementar planes de descontaminación. Los resultados de este estudio mostraron que dentro de

la composición química del PM2.5 de México DF se encuentran trazadores orgánicos como levoglucosan, producto de la pirolisis de la celulosa (trazador de la quema de biomasa, como se mencionó anteriormente), piceno, trazador de combustión de carbón, y por consiguiente de fuente fijas, y hopanos y esteranos, indicadores de la presencia de emisiones de motores de combustión interna, ya sea de gasolina o diésel, problema identificado previamente en esta ciudad, con una cantidad significativa de vehículos, varios de ellos con varios años de uso, y en mal estado (E. a. Stone et al. 2007).

A pesar de que en Colombia se han hecho algunos esfuerzos de identificar estos trazadores en el PM2.5 en ciudades como Medellín, Bogotá y Bucaramanga (Rodriguez V. et al. 2010; Vargas et al. 2012), debido a limitaciones presupuestales y técnicas (por la baja capacidad analítica), es poco lo que se ha podido lograr en términos de caracterización de especies orgánicas. El propósito final de esta caracterización es lograr una aplicación satisfactoria de modelos de receptor-fuente, de manera que se identifiquen las principales fuentes de emisión del PM2.5. Esto ha motivado intentos de implementar las técnicas de cromatografía de gases requeridas con este propósito.

3. Justificación

El material particulado es un contaminante del aire que afecta a todo el ecosistema de forma directa al dificultar el proceso de respiración de los organismos, como también otras funciones, al distribuirse a los diferentes órganos a través del sistema circulatorio y la piel; además, el flujo del aire puede transportar los contaminantes al agua y a la tierra. Según la investigación de Gaitán, Cancino y Behrentz (2007), aunque los niveles de concentración de contaminantes como el monóxido de carbono, óxido de nitrógeno y óxido de azufre del aire en la ciudad de Bogotá no son significativos comparados con los valores máximos permisibles por las normas de calidad

del aire, las concentraciones de material particulado en dicha ciudad superan constantemente los niveles sugeridos por las normas mencionadas. (Gaitán et al. 2007) hablan sobre el deterioro de la calidad del aire en la ciudad y su relación directa con problemas de salud, mencionando que el problema aumenta a pesar de los esfuerzos de las autoridades en años anteriores. Esto se explica porque los mecanismos utilizados por la autoridad ambiental de la ciudad están encaminados al análisis de la información de la red de monitoreo de la calidad del aire, y al diseño de políticas públicas ambientales con base en esta información, sin tener claro el origen de los contaminantes. Por esta razón, es de gran interés identificar los trazadores orgánicos del material particulado presente en el aire, y así identificar sus principales fuentes y enfocar el desarrollo de políticas al control de estas fuentes específicas.

4. Objetivos

4.1 Objetivo General

Identificar trazadores orgánicos en la composición química del material particulado en tres zonas de la ciudad de Bogotá.

4.2 Objetivos Específicos

Determinar la composición química del material particulado colectado en tres zonas de la ciudad de Bogotá.

Evaluar la distribución espacial y temporal de la fracción orgánica del material particulado.

Relacionar los trazadores orgánicos encontrados en el material particulado con las principales fuentes de emisión de este contaminante.

5. Marco Teórico

5.1 Material particulado

El material particulado (MP) es un conjunto de partículas sólidas y líquidas (a excepción del agua) que se encuentran suspendidas en la atmósfera como (polvo, hollín, cenizas, polen y partículas metálicas). El material particulado atmosférico (MPA) es un término que engloba las partículas sedimentables y en suspensión (diámetro $> 20 \mu\text{m}$).

5.2 Tamaño de material particulado

El tamaño de partícula es uno de los principales factores que inciden en la peligrosidad de las partículas atmosféricas en suspensión como contaminante del aire. Las partículas asociadas a cada fuente de emisión tienden a tener una composición química y tamaño determinados; y se dividen en fracción fina y fracción gruesa (Inza Agirre, 2004).

5.2.1 Fracción gruesa (PM10). Las partículas inhalables gruesas ($> 2,5 \mu\text{m}$) son básicamente primarias, en su mayoría de pH básico que se generan por procesos mecánicos, agrícolas, transporte, evaporación y combustión no controlada. Hace parte de la fracción gruesa, las esporas de plantas y granos de polen.

5.2.2 Fracción fina (PM2.5). Agrupación de partículas generalmente ácidas con tamaños menores a $2.5 \mu\text{m}$, formadas principalmente por partículas secundarias, que contienen hollín y otros derivados de las emisiones industriales y vehiculares. Estas partículas son generadas por procesos de condensación y nucleación.

5.3 Composición Química del Material Particulado

La composición química del material particulado, PM2.5 tiene relevancia no solo desde el punto de vista de la química de la atmósfera, sino también del aire que respiramos. La contaminación

de estas partículas es causada por diferentes fuentes de origen natural o antropogénico como, por ejemplo, polvo (proveniente de la erosión de los suelos o de la actividad volcánica), polen, residuos de combustión incompleta, procesos industriales, tala de árboles, incineradores de residuos tanto sólidos como hospitalarios y la combustión vehicular. (Molina M, Molina L, 2004). El Material Particulado Atmosférico (MPA) es un conjunto de compuestos de origen orgánico e inorgánico con diferentes composiciones químicas. Las unidades de material particulado se expresan en concentración de masa o por unidad de volumen de aire.

5.3.1 Especies carbonácea. El material particulado carbonoso es de tipo primario su principal fuente de generación son los procesos de combustión, de origen orgánicos y otros que son producto de las industrias, así como las emisiones vehiculares. Los aerosoles orgánicos son de tipo secundario provienen de la evaporación de la gasolina y otras especies que no son emitidas por fuentes de tipo primario. Esta especie es caracterizada por la presencia de carbono y se divide en: Carbono Elemental (CE) y Carbono Orgánico (CO), la suma de CE + CO es igual a la masa de Carbono Total (TC).

5.3.2 Carbono Elemental. Conocido como Carbono Negro u hollín es generado por la combustión incompleta y otros derivados como las emisiones vehiculares e industriales, combustibles fósiles y biomasa, estos corresponden a la fracción más pequeña y peligrosa para la salud ya que éstas son 100 % respirables. El hollín es de gran importancia al ser el portador de gases, junto a la humedad atmosférica producen acidez al material particulado.

5.4 Efectos en la salud del material particulado.

EL PM_{2.5} corresponde a la fracción más pequeña y agresiva debido a que éstas son respirables en un 100% y tienen mayor efecto en la salud, ya que pueden ingresar al sistema respiratorio depositándose en los alveolos pulmonares y llegar al torrente sanguíneo produciendo efectos

nocivos en la misma, tales como aumento en las enfermedades respiratorias y cardíacas, asma, bronquitis, enfisema, cáncer pulmonar, y disminución del funcionamiento pulmonar. (Samet, J. M. et al, 2000). Diversos estudios de origen científico dan cuenta que la contaminación por material particulado es generadora de muerte prematura en personas con enfermedades cardíacas, asma agravada, síntomas respiratorios aumentados, como irritación en las vías respiratorias, tos o dificultad para respirar. La contaminación atmosférica afecta por lo general a niños, adultos mayores y personas con enfermedades cardíacas.

5.5 Efectos en el medio ambiente del material particulado.

El viento puede transportar las partículas a través de largas distancias y luego, estas pueden instalarse en el suelo o el agua. Según la composición química, los efectos de esta sedimentación pueden provocar: que los lagos y arroyos se vuelvan ácidos, cambio en el balance nutricional de las aguas costeras y de las grandes cuencas fluviales, reducción de los nutrientes del suelo, daño en los bosques sensibles y cultivos agrícolas, efectos perjudiciales sobre la diversidad de ecosistemas y contribución a los efectos de la lluvia ácida.

Tabla 1
Material particulado y su fuente

Fuente	Clase de compuestos	Ejemplos de marcadores específicos	Referencia
Escape de diésel y gasolina	Hópanos Esteranos	17 α (H),21 β (H)-hópanos 17 α (H)-diastigmastano	Simoneit, Rogge et al., Schauer et al., Barakat, Zielinska et al.
Escape del motor Diésel	Ácidos dicarboxílicos n-alcanos	C ₂ -C ₁₀ ácido oxálico, succínico, malónico, maleico, glutárico, adípico, y ácido ftálico heneicosano, docosane, tricosane, tetracosane, pentacosane.	Kawamura et al. Chellam et al.

Humo de madera	Carbonilos Productos de descomposición de celulosa.	Alto-molecular-peso de hidroxycarbonilos. Galactosan y mannosan, levoglucosan	Rao et al. Mabilia Nolte et al., Hawthorne et al.
Madera dura	Productos de descomposición de lignina. Productos de volatilización de fitosterol. Fenoles-syringols. Producto de oxidación de lignina.	Guaiacol (2-metoxifenol). β -sitosterol. Propionylsringol and butyrylsyringo	Schauer. Fine et al. Schauer et al.
Madera blanda	Productos de oxidación de lignina.	Siringaldehido.	Marbach et al.
Cocinar carne	Producto de descomposición de resina.	Ácido deshidroabiético. Colesterol y lactonas.	Simoneit et al. Nolte et al., Schauer et al.
Humo de cigarro	Nitrógeno- contiene iso heterocíclico-y anteisoalcanos, alcohol trisesquiterpenoide.	Nicotina 3-vinilpiridina, C ₂₉ -C ₃₄ , iso-nonacosane, anteiso-triacontan, y iso-hentriacontane, solanesol.	Eatough et al. Rogge et al., Daisey Zheng et al., Tang et al., Baek et al.
Detritus vegetativo	n- alcanos	C ₂₇ -C ₃₄	Simoneit et al., Rogge et al., Rogge et al.
Polvo de llanta	Polímeros. Compuestos policíclicos.	Estireno/ butadieno. Benzotiazol.	Pierson et al. Rogge et al., Kim et al., Fishman et al.

Nota. Fuente: Atmospheric Environment, Elsevier, 2014.

5.6 Norma de calidad de aire ambiente

El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, expidió el primero de diciembre de 2017, la Resolución número 2254, por la cual se adopta la norma de calidad aire y se dictan otras disposiciones. Dicha reglamentación, establece los rangos de calidad para el territorio colombiano, de cuyo contenido se extrae principalmente los siguientes elementos contenidos en la Tabla 2 y Tabla 3.

Tabla 2

Niveles máximo permisibles de contaminantes criterio en el aire.

Contaminante	Nivel Máximo Permisible ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Tiempo de exposición
PM10	50	Anual
	75*	24 horas
PM2.5	25	Anual
	37*	24 horas
SO2	50	24 horas
	100	1 hora
NO2	60	Anual
	200	1 hora
O3	100	8 horas
C	5.000	8 horas
	35.000	1 hora

Nota. Fuente: Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017.

Tabla 3

Concentraciones ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) para los niveles de Prevención, Alerta o Emergencia

Contaminante	Tiempo de exposición	Prevención	Alerta	Emergencia
PM10	24 horas	155 - 254	255 - 354	≥ 355
PM2.5	24 horas	38 - 55	56 - 150	≥ 151
SO2	8 horas	139 - 167	168 - 207	≥ 208
NO2	1 hora	198 - 486	487 - 797	≥ 798
O3	1 hora	190 - 677	678 - 1221	≥ 1222
CO	8 hora	10820 - 14254	14255 - 17688	≥ 17689

Nota. Fuente: Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017.

6. Metodología

6.1 Caracterización de los sitios de muestreo seleccionados

Las tres zonas de muestreo se seleccionaron con base en criterios como: tipo de fuentes de emisión, población, topografía, entre otras. En el Colegio la Salle se tomaron 9 muestras de PM2.5 y PM10, en la estación de bomberos de Fontibón y en la secretaría de movilidad 9 muestras de PM10 y en Sevillana 1 muestra de PM2.5 y PM10. En esta sección se realizó la caracterización detallada de los puntos de muestreo, de manera que se tenga una idea previa sobre los componentes químicos del material particulado de acuerdo con las características de estos. Los sitios se seleccionaron de acuerdo a: la presencia de fuentes fijas, de fuentes móviles, y la ausencia de ambas, para el sitio de fondo o referencia.

6.2 Determinación de las concentraciones de material particulado colectado en los puntos de muestreo:

Las concentraciones de material particulado se determinaron por medio de análisis gravimétrico en el laboratorio de servicios ambientales de la Universidad de La Salle. La selección de los equipos de muestreo y tipo de medio de colección se hizo previamente con base en disponibilidad de recursos y requerimientos analíticos (cantidad de muestra mínima necesaria para los diferentes análisis químicos). A partir de las concentraciones calculadas se analizó la distribución espacial y temporal.

6.3 Caracterización química del material particulado

Las muestras de material particulado se analizaron por medio de diferentes técnicas analíticas de acuerdo a las especies a identificar de la siguiente manera:

6.3.1 Carbono orgánico y carbono elemental (OCEC). El contenido total de carbono en sustancias orgánicas, y el carbono elemental u hollín, se determinó por medio del método térmico/óptico en un analizador TOT, en el laboratorio de servicios ambientales de la Universidad de La Salle.

6.3.2 Especies iónicas. Especies iónicas como sulfatos, nitratos, cloruros, cationes metálicos, entre otros, se analizaron por medio de la técnica de cromatografía iónica (IC) en el Laboratorio de Higiene del Estado de Wisconsin.

6.3.3 Elementos en trazas. Especies metálicas y no metálicas solubles en agua se cuantificaron por medio de la técnica de espectrometría de masas acoplada a cromatografía de plasma inducido (ICP/MS), en el Laboratorio de Higiene del Estado de Wisconsin.

6.3.4 Especies orgánicas. Las especies orgánicas de las familias: hópanos y estéranos, hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), y alcanos, y adicionalmente las especies individuales Levoglucosan y Colesterol fueron analizadas en extractos del material particulado colectado en Bogotá, por medio de la técnica de cromatografía de gases/espectrometría de masas, en el laboratorio de cromatografía del Instituto Colombiano del Petróleo (ICP).

6.4 Implementación metodológica

Dentro de estas especies se encuentran varios trazadores de fuentes de emisión específicas como: vehículos con motor de gasolina, vehículos de motor diésel, combustión de biomasa, preparación de alimentos, entre otras. Este proyecto hizo parte de un macroproyecto realizado en convenio entre Ecopetrol-ICP y la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga el cuál se implementó las técnicas analíticas requeridas para la identificación de trazadores orgánicos de diferentes fuentes de emisión de PM. Las muestras colectadas en la ciudad de

Bogotá fueron analizadas por medio de estas técnicas, que se basan específicamente en cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC/MS).

El proyecto incluye la elaboración de un protocolo de manejo, transporte, almacenamiento, extracción y análisis de muestras de material particulado utilizando las técnicas ya mencionadas. Por medio de este análisis se logró identificar moléculas orgánicas que sirven como trazadores de fuentes específicas de emisión de PM, en los grupos funcionales de hidrocarburos, hidrocarburos aromáticos policíclicos, hópános y estéranos, ácidos grasos, metil ésteres y especies individuales como levoglucosan y colesterol.

Con base en estos resultados es posible tener una idea sobre las principales fuentes que aportan al PM en los tres sitios de muestreo, análisis que se puede complementar con el resto de los componentes inorgánicos encontrados dentro de la composición del PM. El proceso de extracción de las muestras se realizó con un equipo DIONEX ASE™ 350 *Accelerated Solvent Extractor*. Se utilizó como solvente de extracción diclorometano y luego acetona. La extracción se realizó a 100°C y 1500 psi. Antes de la extracción, a cada filtro de cuarzo se le adiciono una cantidad conocida de una solución de compuestos marcados isotópicamente.

La concentración del extracto se realizó en dos etapas. Primero, se concentró hasta un volumen de aproximadamente 800 µL mediante el equipo TurboVap II Concentration Workstation a una temperatura de 40°C. El extracto obtenido se filtró a través de un filtro de membrana PTFE de 0.22 µm. Después, el extracto se concentró con flujo suave de un nitrógeno gaseoso hasta un volumen de 200 µL.

Los extractos obtenidos fueron analizados por cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC/MSD) empleando un equipo Agilent GC/MSD (cromatógrafo de gases 7890A

acoplado a un detector de masas 5975C). Los extractos se analizaron en una columna ZB5MSi (30m*0.25mm*0.25µm) tanto en modo SCAN como en modo SIM.

La mayoría de los compuestos orgánicos en los extractos fueron identificados por comparación de los espectros obtenidos durante el análisis de las muestras con los espectros suministrados por la biblioteca de espectros NIST 98 y confirmación adicional por comparación de un estándar auténtico de cada uno de los compuestos identificados.

Tabla 4

Trazadores de fuentes de emisión

Fuente	Clase de componentes	Trazadores específicos
Diésel y gasolina	Hopanos	17 α (H),21 β (H)-Hopano (HP30)
	Esteranos	20R-5 α (H),14 β (H)-17 β (H)Colestano (ChoR)
	n-alcanos	Diésel: n-heneicosano (n-C21), n-docosano(n-C22), n-tricosano (n-C23), n-tetracosano (n-C24), n-pentacosano (n-C25)
	HAP	Diésel: fluoranteno y pireno Gasolina: indeno[1,2,3-cd]pireno, benzo[ghi]perileno y coroneno
Quema de biomasa	Productos de combustión de celulosa	Levoglucosan
Residuos vegetales	n-alcanos	n-heptacosano (n-C27), n-nonacosano (n-C29), n-hentriacontano (n-C31), Tritriacontano(n-C33)
Preparación de comida	Esteroles	Colesterol
Combustión de carbón	Hopanos	17 α (H),21 β (H)-Hopano (HP30), 22R-17 α (H),21 β (H)-Homohopano (HP31R)
	HAP	Piceno

Nota. Fuente: Journal of the Air Pollution Control Association, 1986.

6.4.1 Distribución espacial y temporal. La distribución espacial y temporal de la fracción orgánica e inorgánica del material particulado, se efectuó teniendo como base las características de cada zona de muestreo, la ocurrencia de eventos meteorológicos severos, incendios, u otras anomalías que puedan influenciar el comportamiento del material particulado suspendido en el aire, así como la duración del muestreo, se analizó la distribución espacial y temporal de los componentes químicos analizados en la sección anterior, con el fin de conocer los factores significativos en la composición del PM. Para la realización de este análisis se construirán series de tiempo y espacio para cada componente del PM, una vez se haga un análisis estadístico de validez de los datos obtenidos, así como de la información meteorológica de los sitios de muestreo.

6.4.2 Relación entre los trazadores orgánicos hallados. A partir de la composición química orgánica de los trazadores encontrados se relacionó con las principales fuentes de emisión que puedan afectar los puntos de muestreo donde las muestras fueron colectadas. Los perfiles de composición del PM emitido por las diferentes fuentes fueron obtenidos de una revisión bibliográfica exhaustiva, con base en estudios recientes realizados en lugares con condiciones similares a las de Bogotá. La asignación a las diferentes fuentes se realizó por medio de un análisis de regresión multivariable aplicado a la composición química del PM de las muestras reales y los perfiles de composición encontrados en la literatura.

6.4.3 Elaboración del informe final. Una vez completado el análisis de los resultados, se elaboró el informe final del proyecto, que será entregado a los evaluadores asignados por el comité de trabajos de grado de la facultad de ingeniería ambiental.

7. Resultados y Análisis de los resultados

7.1 Alcanos

7.1.1 Distribución Temporal PM10 Colegio La Salle, Estación de Bomberos, Sec. Movilidad.

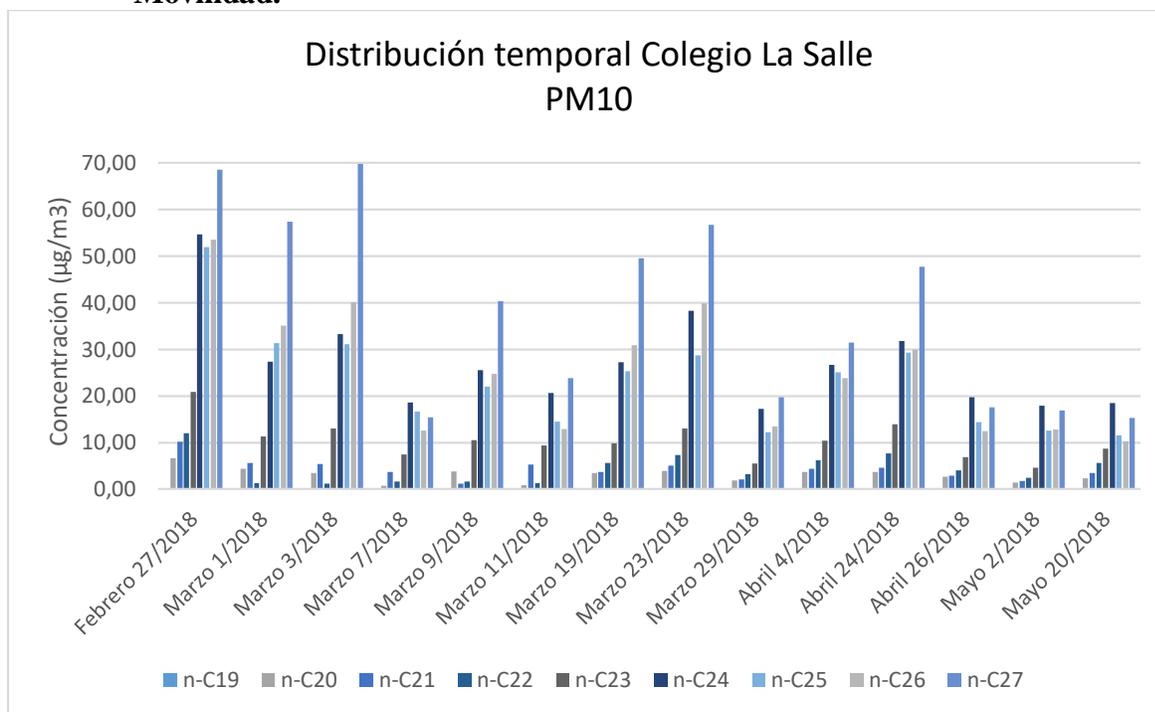


Figura 1. Distribución temporal Colegio La Salle PM10

Fuente: Autoras.

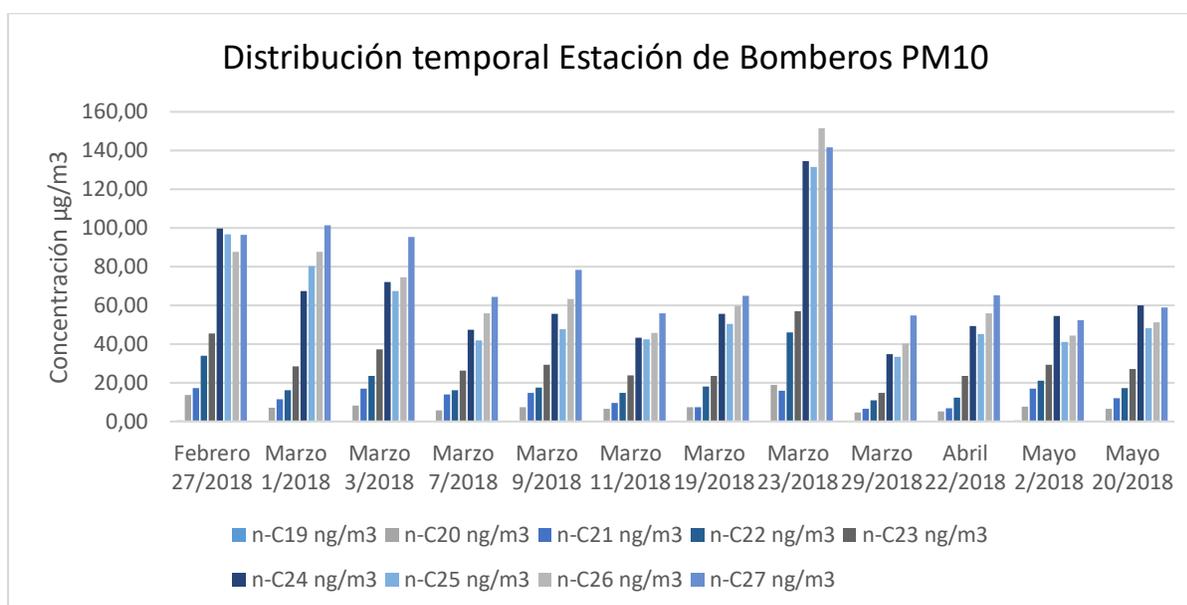


Figura 2. Distribución temporal Estación de Bomberos PM10

Fuente: Autoras.

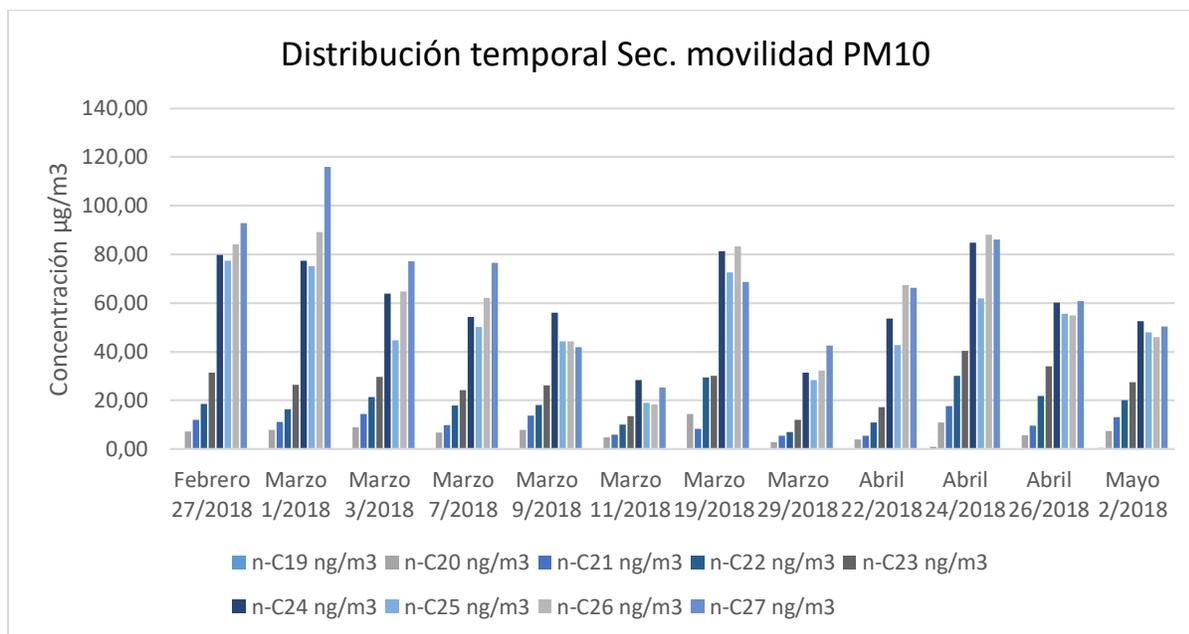


Figura 3. Distribución temporal Sec. Movilidad PM10

Fuente: Autoras.

Para la distribución temporal PM10 de las Estaciones de Colegio La Salle, Bomberos y Movilidad, las concentraciones evidenciaron, en primer lugar, un patrón ya esperado para la Estación Colegio La Salle, como estación de fondo, presentando $70,00 \mu\text{g}/\text{m}^3$, representando así la máxima concentración de hidrocarburos. Para este caso, específicamente, los compuestos predominantes fueron C-24, C-25 y C-27 como trazadores de Diésel, lo cual indica que Diésel es la mayor fuente de producción de hidrocarburos en ese sector. No obstante esto, se tuvo en cuenta que la concentración es más baja que en las otras dos estaciones, situación que se debe a que el sector presenta características de poca movilidad automotriz y escasa urbanización en los alrededores.

Se tiene, además, que existieron factores específicos que influyeron de forma irregular en el comportamiento ambiental de los lugares en cuestión. Ejemplo de esto son los registros de

variación en el monitoreo de los días miércoles y jueves. Como limitación del presente estudio se tiene, respecto a estas variaciones, que no existió una bitácora específica para el registro de esas variaciones, por lo que no se puede determinar propiamente algún análisis de causa de dichas variaciones dado que los valores no fueron tomados los mismos días durante todo el periodo de muestreo, lo que no permitió al estudio identificar otras posibles fuentes específicas de Diésel representados en la Figura. Sin embargo, se maneja como su puesto que, si estas variaciones de los días miércoles y jueves se presentan en las estaciones los mismos días, significa que las fuentes de producción son las mismas, y que, probablemente el PM se dirige hacia la Estación La Salle por acción del movimiento del viento.

De otro lado, la investigación logra analizar que las Estaciones Bomberos y Movilidad presentaron claramente concentraciones más altas con valor máximo de 150,00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, los compuestos que mayor predominan son C-24, C-25 y C-27 los cuales son trazadores de Diésel, esto quiere decir que la combustión de automóviles tipo Diésel en este sector es mayor, esto tiene una coherencia clara al estar estos sectores ubicados más al centro de la ciudad.

Luego de analizar los días en los cuales las concentraciones fueron más altas, se obtuvo que no hay relación proporcional entre los días semana a semana, para determinar el comportamiento o distribución de las partículas PM10, ejemplo visto en las 3 estaciones durante los días jueves 1 de marzo y jueves 29 de marzo, presentándose valores diferentes en las concentraciones de los compuestos trazadores de Diésel para cada sector.

Se tienen también los resultados del día lunes 19 de marzo puestos en comparación con los picos de valor en las 3 estaciones. Aquí se destacó un rango de 35,00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de concentración del compuesto C-27 trazador de Diésel entre las estaciones Colegio La Salle y Bomberos, siendo la primera la de menor concentración y la segunda de la mayor concentración respectivamente.

Paralelo al análisis anterior el estudio presenta como las concentraciones de los compuestos trazadores de Diésel tales como C-25, C-26, C-27 están presentes en concentraciones altas en el sector Bomberos y Movilidad con unos picos que destacan los días 1 y 23 de marzo, que son días lunes y viernes respectivamente, de los compuesto que no predominan como C-21, C-22, C-23, se debe a que estas sustancias son más volátiles y livianas, dado la diferencia en cantidad de carbonos que poseen estos compuestos los cuales también son trazadores de Diésel.

El caso especial presentado el 11 de marzo, el cual fue día de elecciones de senado y cámara se ve reflejado en las concentraciones para las 3 Figuras disminuyendo de manera evidente en las 3 estaciones, esto refleja el comportamiento del flujo vehicular ese día, denotando la baja presencia del flujo vehicular y por ende la escasa combustión de Diésel y Gasolina, mejorando de esta forma las condiciones atmosféricas de la ciudad.

7.1.2 Distribución de Tamaño Colegio La Salle PM2.5/PM10.

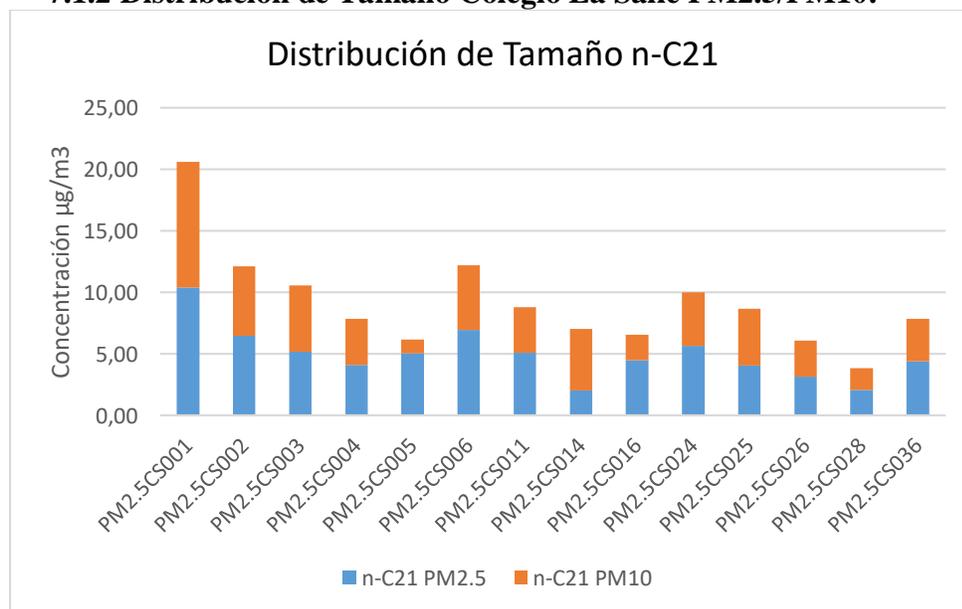


Figura 4. Distribución de Tamaño n-C21

Fuente: Autoras.

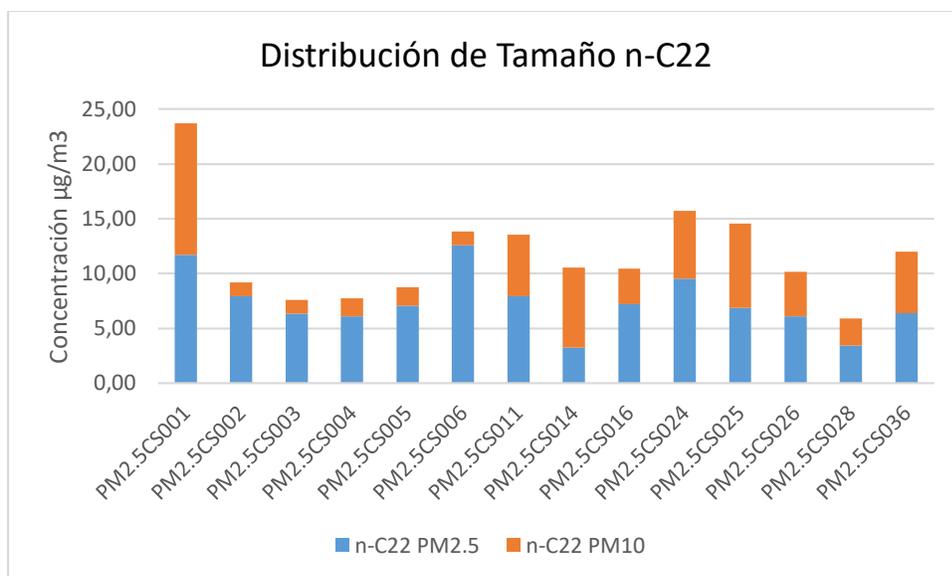


Figura 5. Distribución de Tamaño n-C22

Fuente: Autoras.

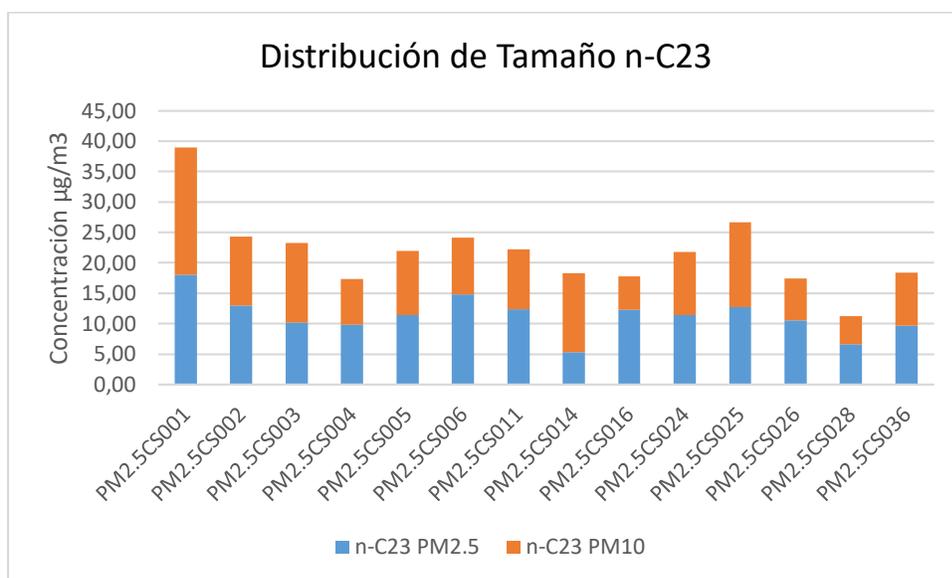


Figura 6. Distribución de Tamaño n-C23

Fuente: Autoras.

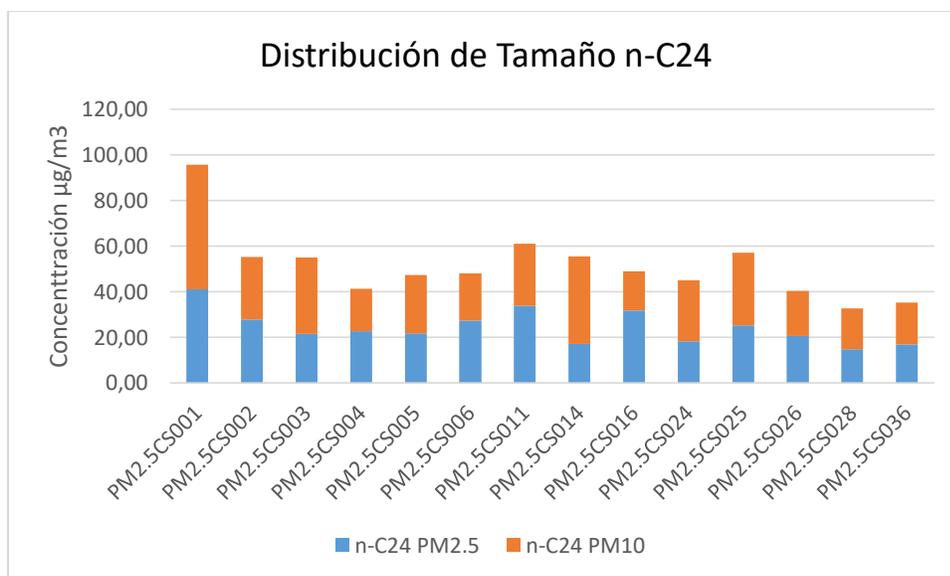


Figura 7. Distribución de Tamaño n-C24

Fuente: Autoras.

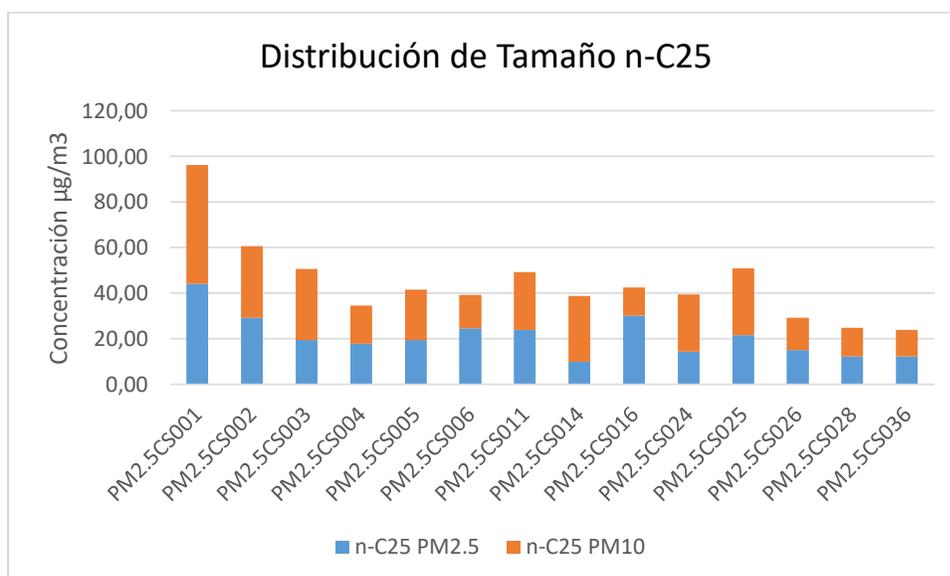


Figura 8. Distribución de Tamaño n-C25

Fuente: Autoras.

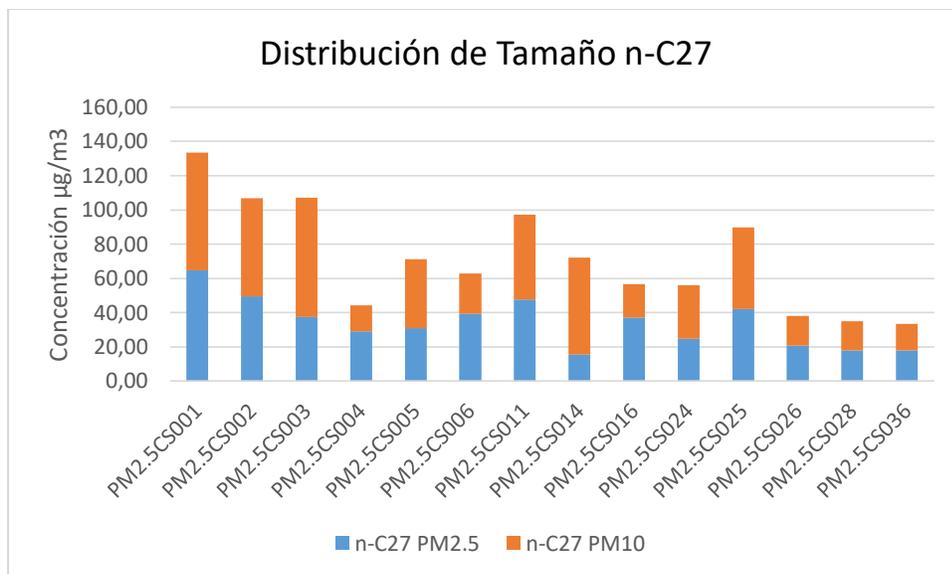


Figura 9. Distribución de Tamaño n-C27

Fuente: Autoras.

En este punto es evidente cómo el material particulado para el compuesto C-21, C-22, C-23 monitoreado y registrado en partículas finas (PM2.5) y gruesas (PM10), ofrece resultados de la distribución de tamaño que describen cómo estos compuestos son livianos al tener en su composición menos cadenas de carbono, siendo más volátiles y por consiguiente registrados con valores casi iguales en la PM10 y la PM 2.5, aunque incluso más elevados en la fracción PM2.5. Las Figuras también permiten determinar la distribución de compuestos más pesados y densos como son los trazadores C-24, C-25 y C-27 que por su mayor cantidad de cadenas de carbono predominan en la fase gruesa PM10.

El análisis evidencia cómo las fuentes cercanas al colegio pueden estar influyendo por la emisión de partículas diminutas proporcionadas por combustión de hidrocarburos proveniente de los combustibles fósiles. La distribución que registra la Figura para el tamaño de las partículas puede ser debido a que los trazadores C-24, C-25 y C-27 tienen características químicas más estables que permiten que su tamaño sea más compacto.

7.1.3 Distribución Espacial PM10 Colegio La Salle, Estación de Bomberos, Sec. Movilidad.

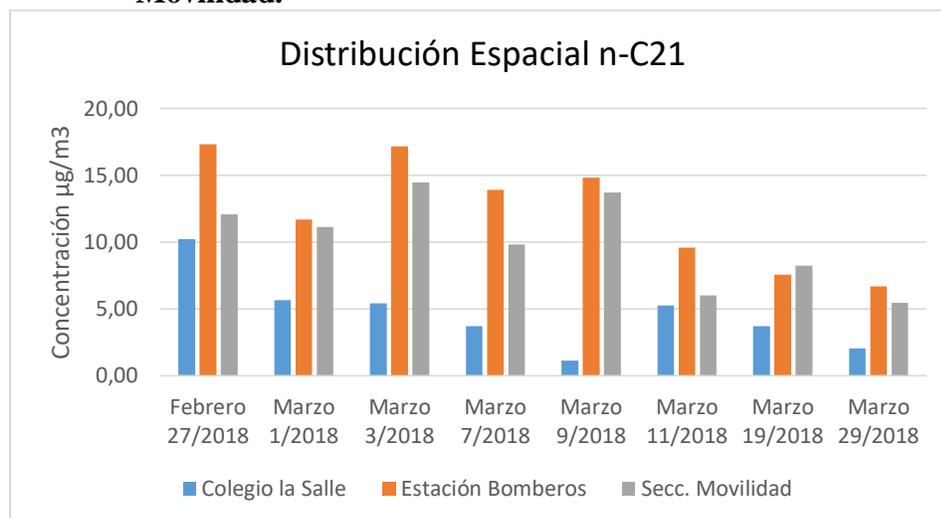


Figura 10. Distribución Espacial n-C21

Fuente: Autoras.

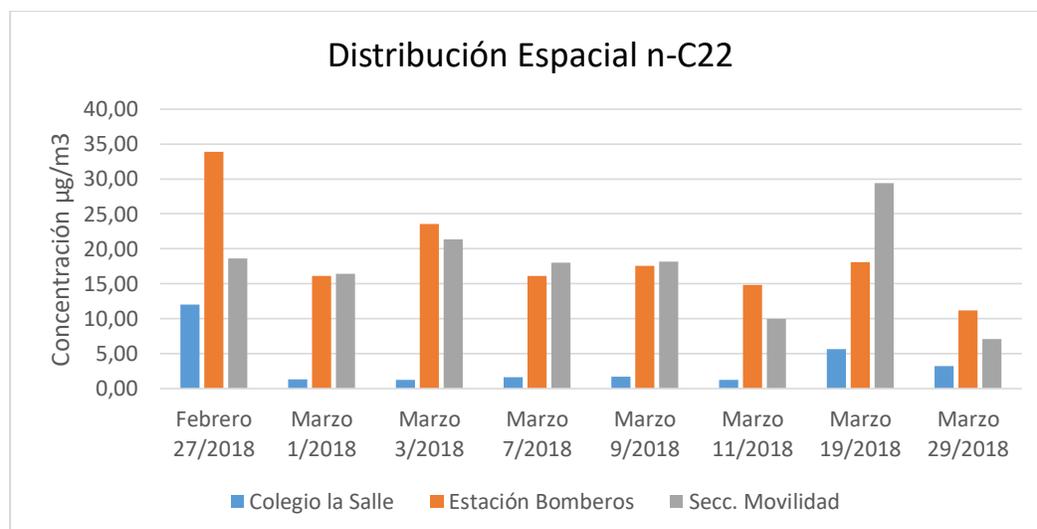


Figura 11. Distribución Espacial n-C22

Fuente: Autoras.

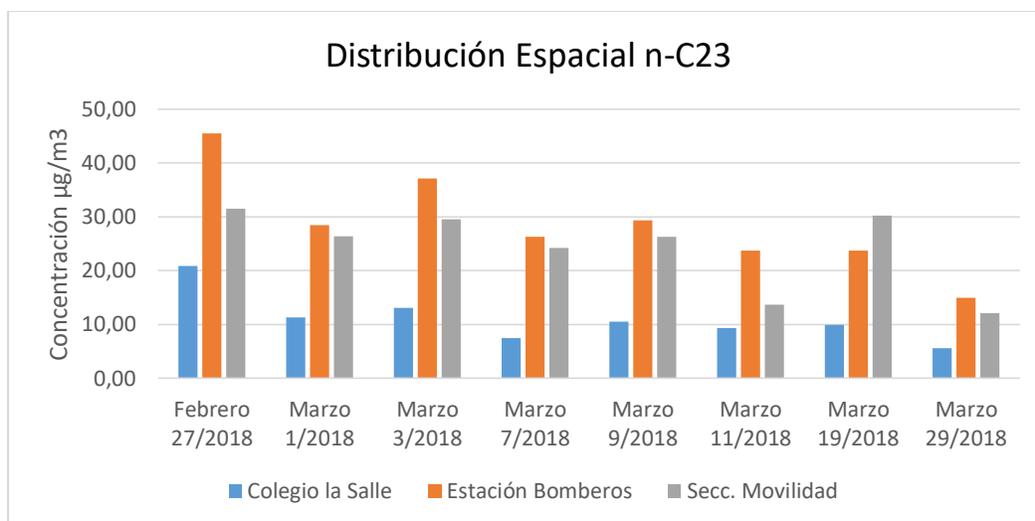


Figura 12. Distribución Espacial n-C23

Fuente: Autoras.

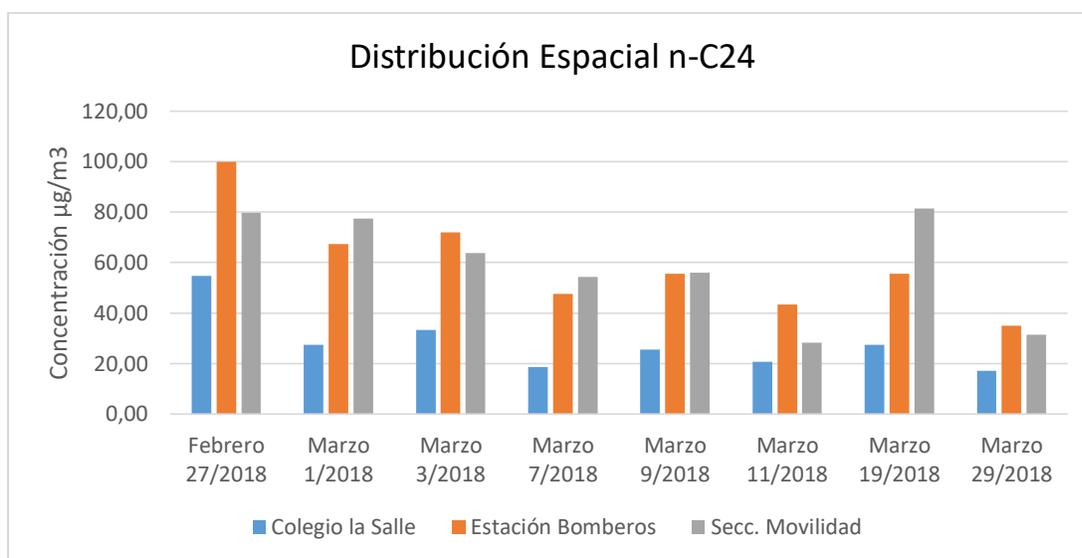


Figura 13. Distribución Espacial n-C24

Fuente: Autoras.

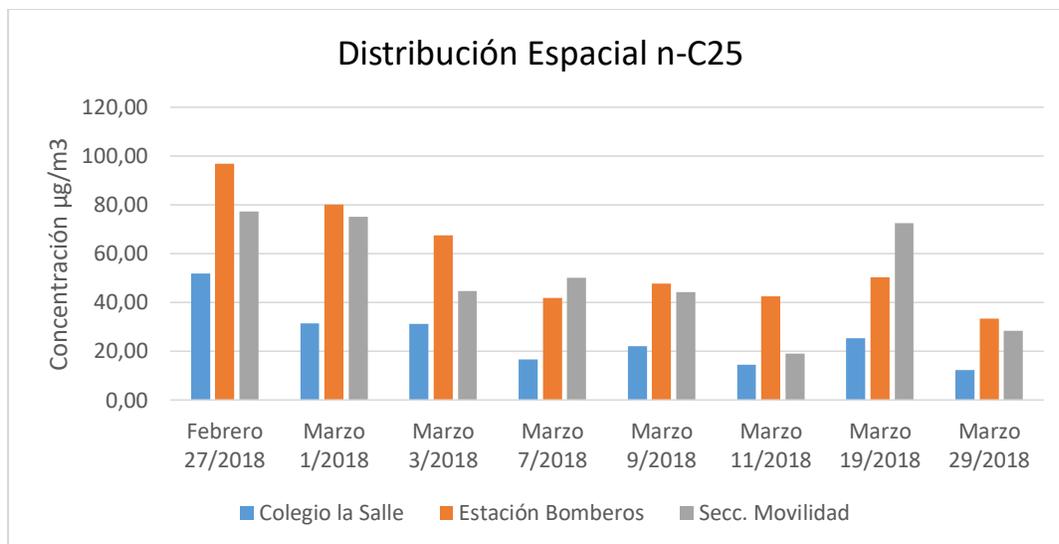


Figura 14. Distribución Espacial n-C25

Fuente: Autoras.

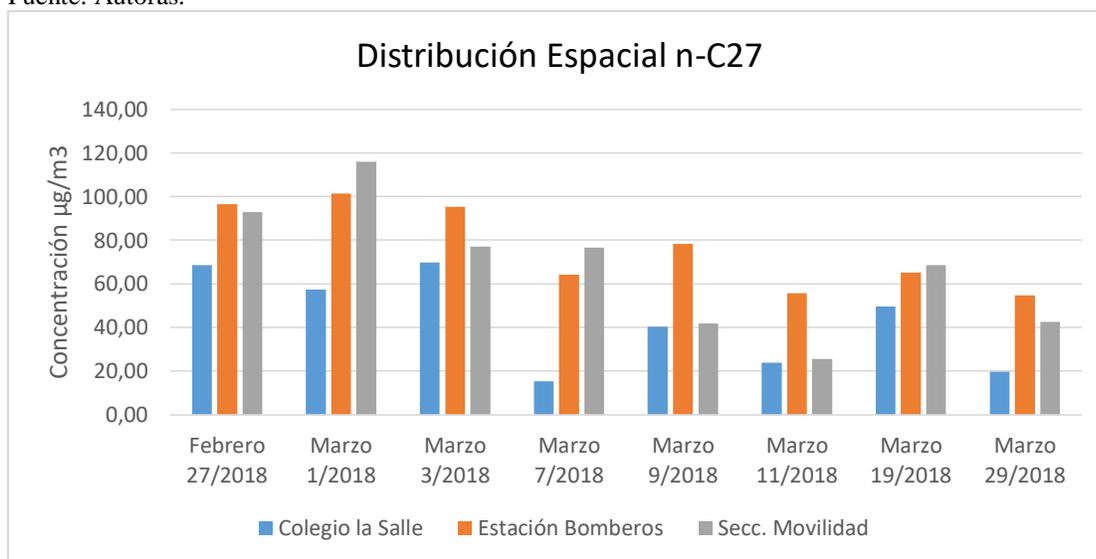


Figura 15. Distribución Espacial n-C27

Fuente: Autoras.

El análisis de los resultados de la distribución espacial en la Estación del Colegio La Salle, La Estación de Bomberos y El Sector Movilidad de las Figuras de la 10 a la 15, se observó que los componentes trazadores de Diésel y Gasolina tiene una influencia similar que permitió determinar un comportamiento uniforme para las estaciones Bomberos y Movilidad,

Esto quiere decir que, la presencia de combustión de derivados de Gasolina y Diésel, junto con otros compuestos derivados del petróleo influyen en la atmosfera de manera similar para las estaciones Bomberos y Movilidad. Por último en el marco del análisis la Estación Colegio La Salle es la de menor concentración y por ende menos contaminación atmosférica por combustión de Gasolina, Diésel, lo que indica que este sector presenta características atmosféricas especiales dadas, entre otras cosas por un flujo vehicular escaso o de vehículos en mejor estado, condiciones que disminuyen los niveles de emisión de gases y contaminantes producidos por fuentes de combustión de hidrocarburos, siendo para este caso los insumos Diésel y Gasolina, que se convierten, entonces, en trazadores importantes para los factores contaminantes del ambiente.

7.2 Esteranos

7.2.1 Distribución Temporal PM10 Colegio La Salle, Estación de Bomberos, Sec. Movilidad.

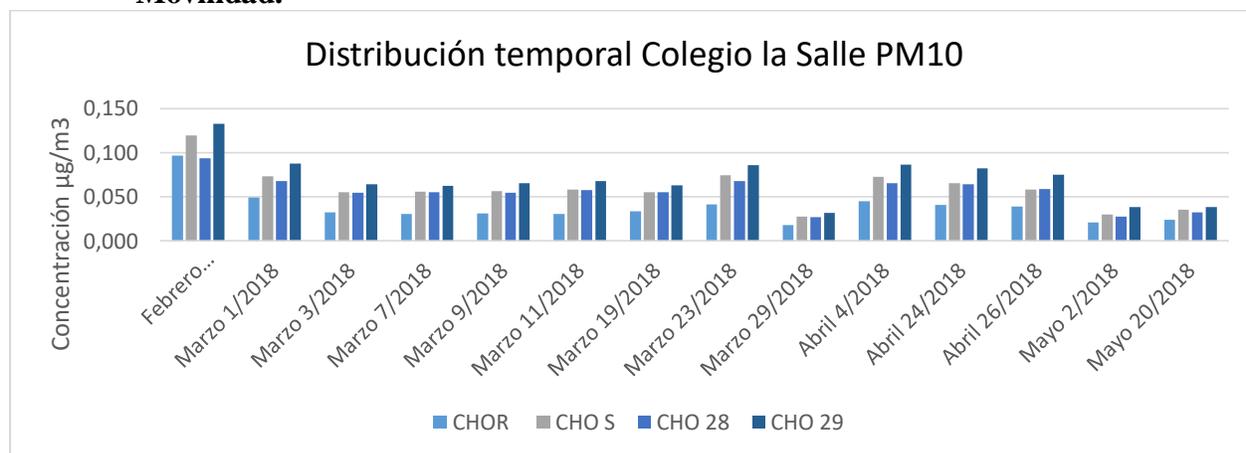


Figura 16. Distribución temporal Colegio La Salle PM10

Fuente: Autoras

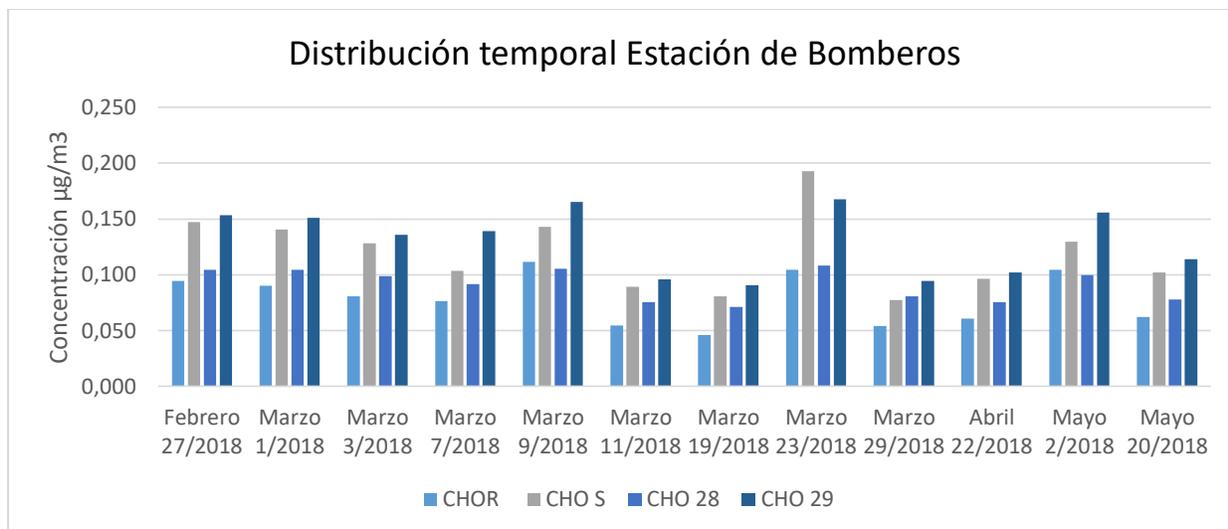


Figura 17. Distribución temporal Estación de Bomberos PM10.

Fuente: Autoras.

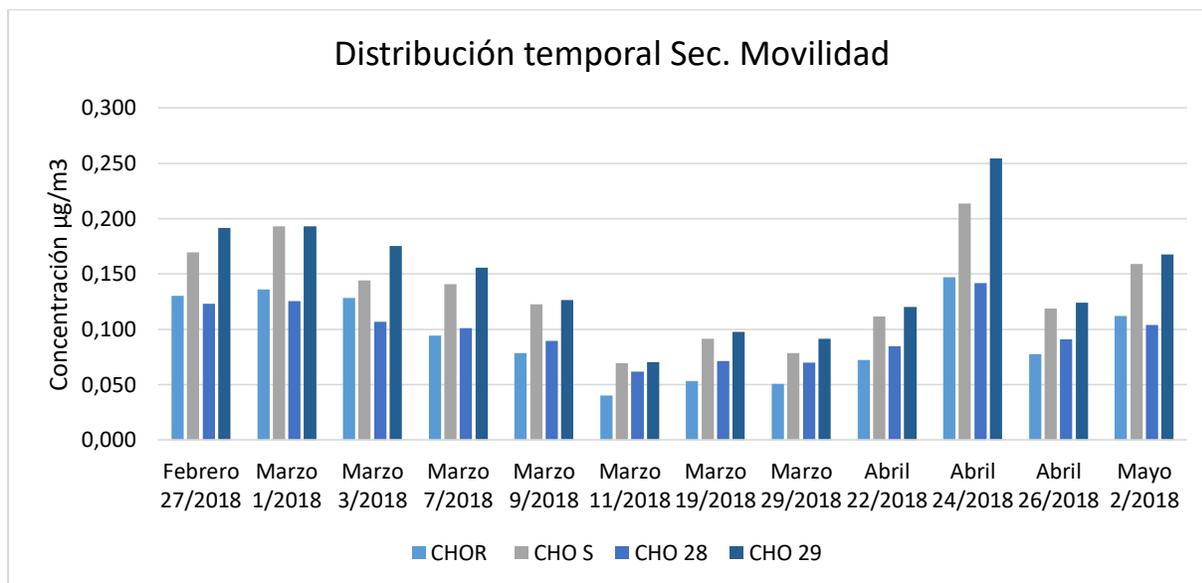


Figura 18. Distribución temporal Sec. Movilidad PM10.

Fuente: Autoras.

Para la muestra PM10 de componentes Esteranos y su distribución temporal en la zona del Colegio La Salle, en la zona Estación de Bomberos y del PM10 en la zona Sector Movilidad se registran valores de concentración diferentes en comparación con las concentraciones de

Hidrocarburos, esto es visible al mirar las escalas de concentración que llegan a un valor máximo de 0,254 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ siendo estos valores mínimos en las concentraciones de los Hidrocarburos.

La investigación reveló claramente que las concentraciones son mayores a 0,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en la estación de Movilidad, seguido de la estación de Bomberos. Los resultados con las emisiones y fuentes que predominan en estas estaciones evidencian un mayor flujo de vehículos, dado que estos compuestos son trazadores de aceites y lubricantes de motor, lo que significa que los vehículos que transitan en este sector no están en un buen estado.

Se encontró también un patrón con cifras de concentración bajas en la fecha del domingo 11 de marzo, este día acontecieron las elecciones de senado y cámara para todo el país, razón por la que el flujo vehicular para ese día bajó considerablemente, influyendo en la disminución de las cantidades por volumen de compuestos químicos como CHO S, y CHO 29, Estos trazadores indican presencia de fuentes grasas o aceites que pueden ser derivados directo de petróleo como los aceites lubricantes, por ejemplo. Fuentes que, en adelante volvieron a su índice normal de presencia en el ambiente.

Los resultados del PM10 en la zona Sector Colegio la Salle indican que el patrón de temporal en la distribución no se modifica demasiado en razón de los meses. Se tiene, entonces, que la concentración es menor que en otras estaciones debido al escaso flujo vehicular y/o a la disminución en la combustión de compuestos de aceites lubricantes para autos. Alcanzan, entonces, un valor máximo de 0.133 ng/m^3 y 0.119 ng/m^3 de CHO 29 y CHO S respectivamente, siendo esto valores mínimos en comparación con las otras estaciones.

7.2.2 Distribución de Tamaño Colegio La Salle PM2.5y PM10

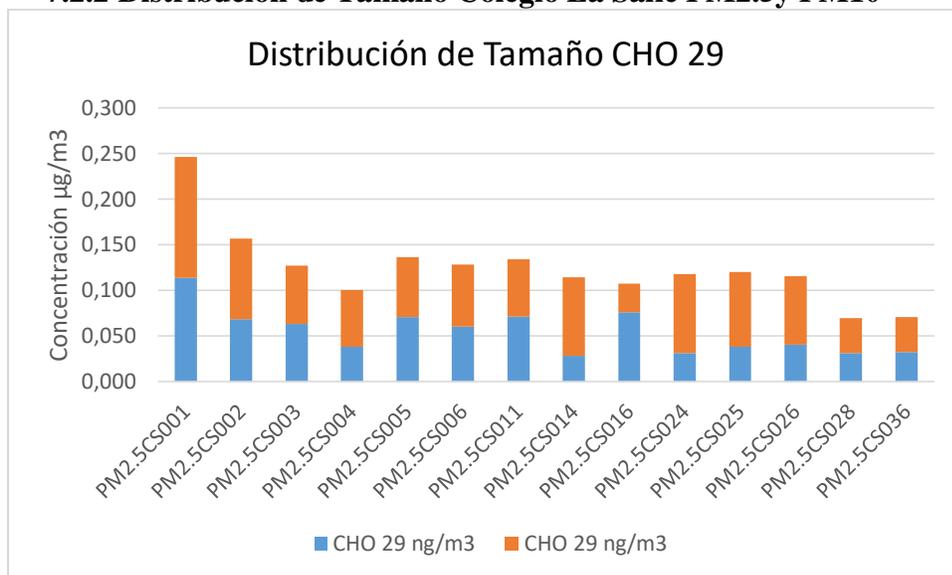


Figura 19. Distribución de Tamaño CHO 29

Fuente: Autoras.

En el análisis de la distribución de tamaño en el sector del Colegio La Salle para PM2.5 y PM10, se logra observar que hay un patrón que se inclina por la aparición de partículas muy gruesas (PM10), debido a que la composición y característica del compuesto es más compacta y su densidad es mayor, lo que permite determinar este trazador como fuente importante de quema de aceite y lubricantes automotrices.

7.2.3 Distribución Espacial PM10 Colegio La Salle, Estación de Bomberos, Sec. Movilidad.

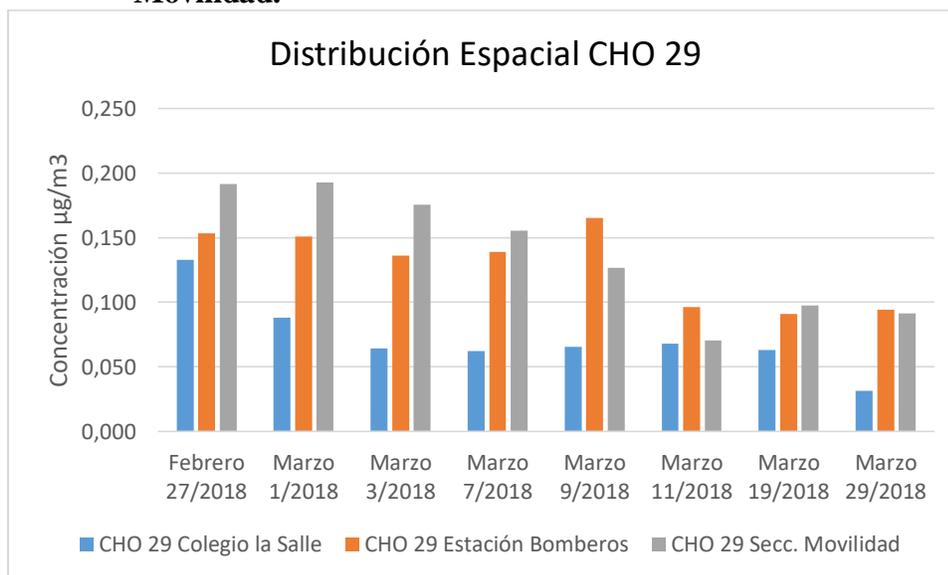


Figura 20. Distribución Espacial CHO 29

Fuente: Autoras.

El estudio indico en la Figura 20 que los valores de concentración en la zona del Colegio La Salle son las más bajas en componentes Esteranos, debido a que este sector no tiene fuentes importantes de quemas de aceites, solo la determinada por los vehículos particulares que transitan por la zona. Así mismo, se deduce que las concentraciones en la zona de Estación Bomberos y en la zona Sector Movilidad tienen los valores más altos, estos trazadores encontrados son un indicativo de autos en mal estado, es decir presencia de combustión de aceite en motores en mal estado o muy antiguos. Estos también son mayormente frecuentados en las estaciones Bomberos y Movilidad.

7.3 Hópanos

7.3.1 Distribución Temporal PM10 Colegio La Salle, Estación de Bomberos, Sec. Movilidad.

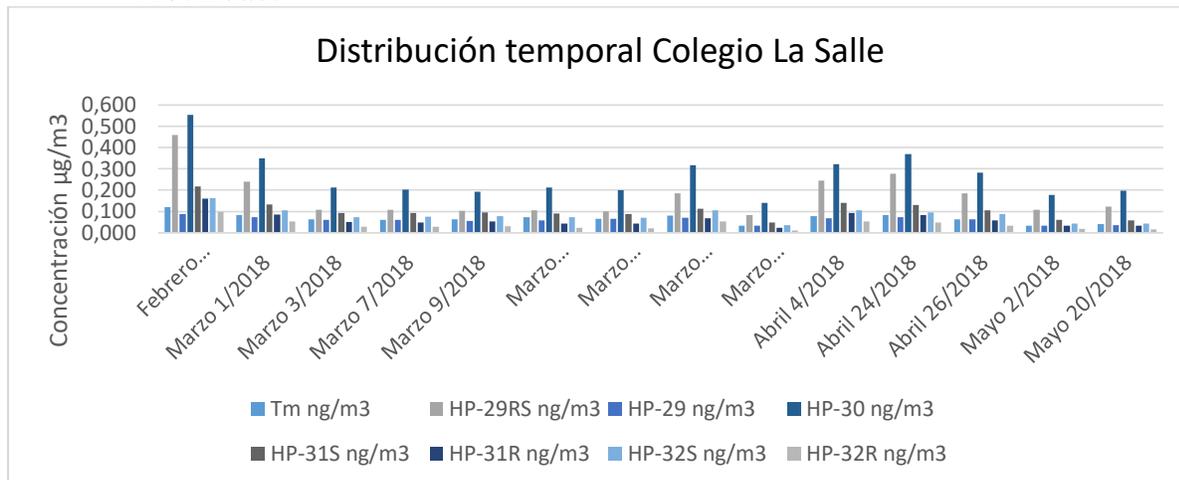


Figura 21. Distribución Temporal Colegio La Salle

Fuente: Autoras.

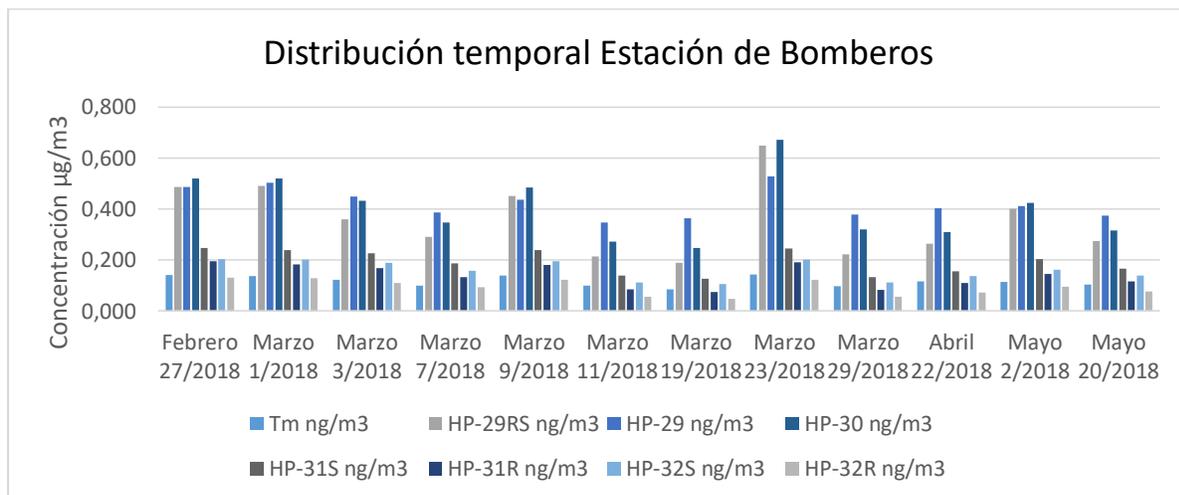


Figura 22. Distribución Temporal Estación de Bomberos

Fuente: Autoras.

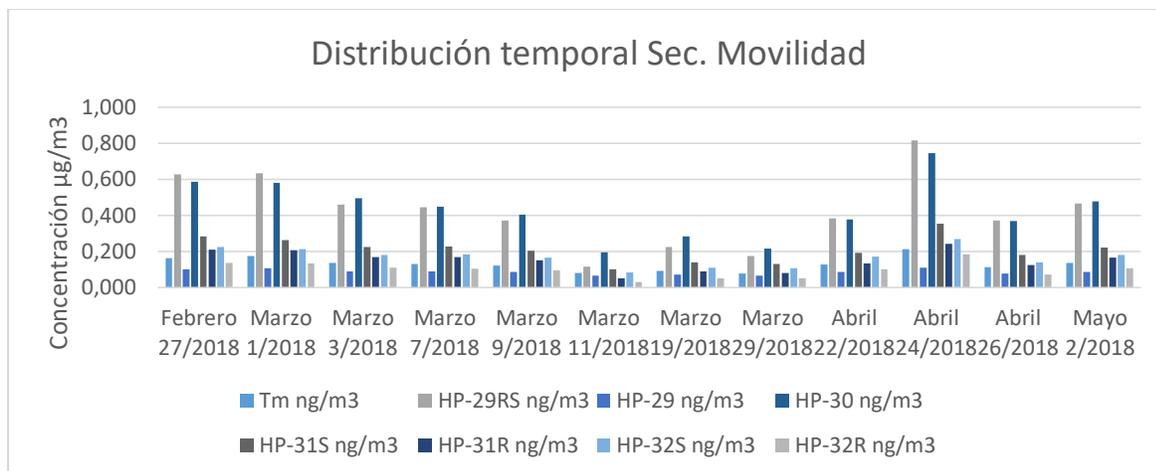


Figura 23. Distribución Temporal Sec. Movilidad

Fuente: Autoras.

Para el PM10 en su distribución temporal destacan nuevamente los valores en la escala de concentración para las estaciones Movilidad y Bomberos, los cuales predominan con concentraciones hasta de 0,600 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ del compuesto HP-30 trazador de combustión de carbón. Estas concentraciones comparadas con la estación Colegio La Salle son bajas, pues la del Colegio la Salle es de 400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ tomada de la primera muestra el día martes 27 de febrero, convirtiéndose así en la muestra del comportamiento más extraño por ser demasiado alta en comparación con los datos recolectados después de esta fecha.

El estudio permite analizar de igual manera las fuentes posibles que presentan los sectores de Movilidad y Bomberos, los cuales tienen valores altos y muy uniformes a lo largo de los días de muestreo, con anomalía el domingo 11 de marzo, día de elecciones de senado y cámara, aquí los niveles de los compuestos trazadores disminuyeron considerablemente en la atmosfera tal como lo muestran las Figuras 21, 22 y 23.

El compuesto HP-30 con valores significativos en las Figuras, se entiende como indicativo de combustión de compuestos orgánicos tales como el carbón y quema de plantas, presentes por la existencia de calderas u hornos. Estos resultados significan la presencia de industrias que usan

este tipo de combustión convencional a pequeña escala en su mayoría o quemas de carbón para producir alimentos.

7.3.2 Distribución de Tamaño Colegio La Salle PM2.5/PM10

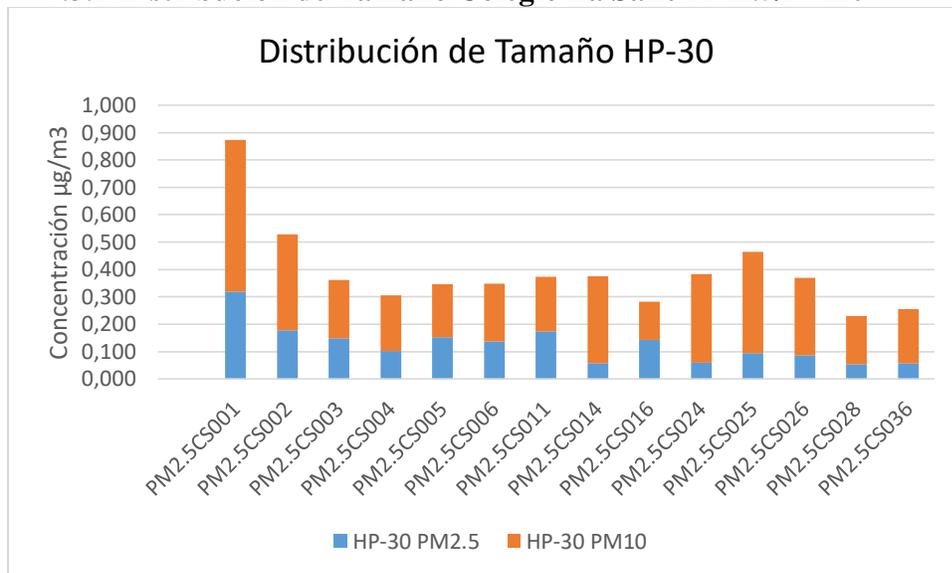


Figura 24. Distribución de Tamaño HP-30

Fuente: Autoras.

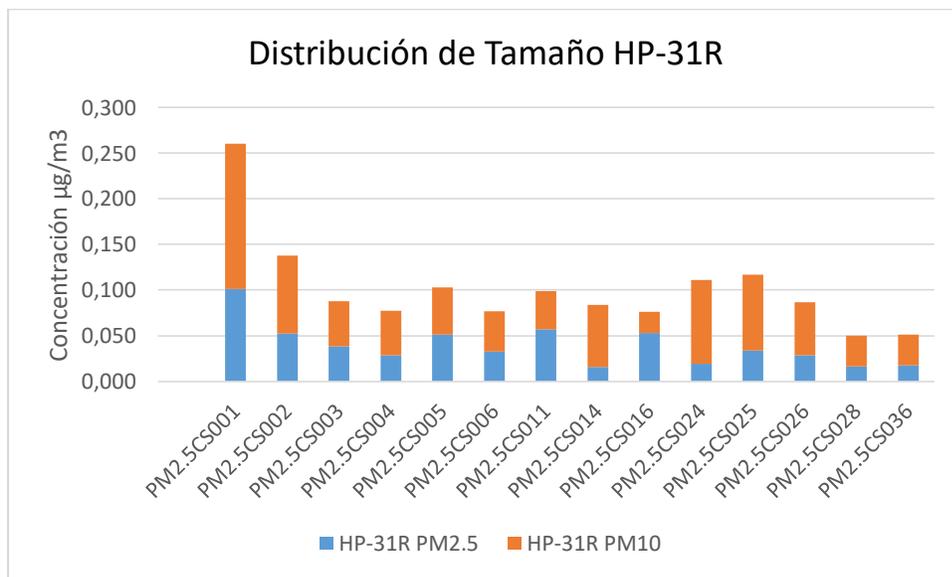


Figura 25. Distribución de Tamaño HP-31R

Fuente: Autoras.

Se puede observar para el PM2.5 y PM10 del sector Colegio La Salle la distribución de tamaño para el elemento químico HP-30 el cual como trazador de Combustión de Carbón tiene características y comportamientos importante con un primer registro elevado que va disminuyendo periódicamente, pero no de forma constantes. Del mismo modo se tiene que las Figuras registran la concentración de partículas en el PM10 de comportamiento elevado para ambas Figuras, lo que refleja la composición particular de la partícula, siendo esta una partícula pesada que por su tamaño se precipita con mayor facilidad en la superficie y tiende a ser arrastrada con mayor dificultad en el ambiente.

Para el compuesto HP-31R el cual también es trazador de combustión de carbón se puede analizar una característica especial el cual es la cantidad de concentración, ya que esta es diminuta en comparación con HP-30 siendo ambos indicadores de fuentes de combustión de carbón, se puede determinar que es mejor trazador el HP-30 por el tamaño y concentración de la particular en el muestreo realizado.

7.3.3 Distribución Espacial PM10 Colegio La Salle, Estación de Bomberos, Sec. Movilidad.

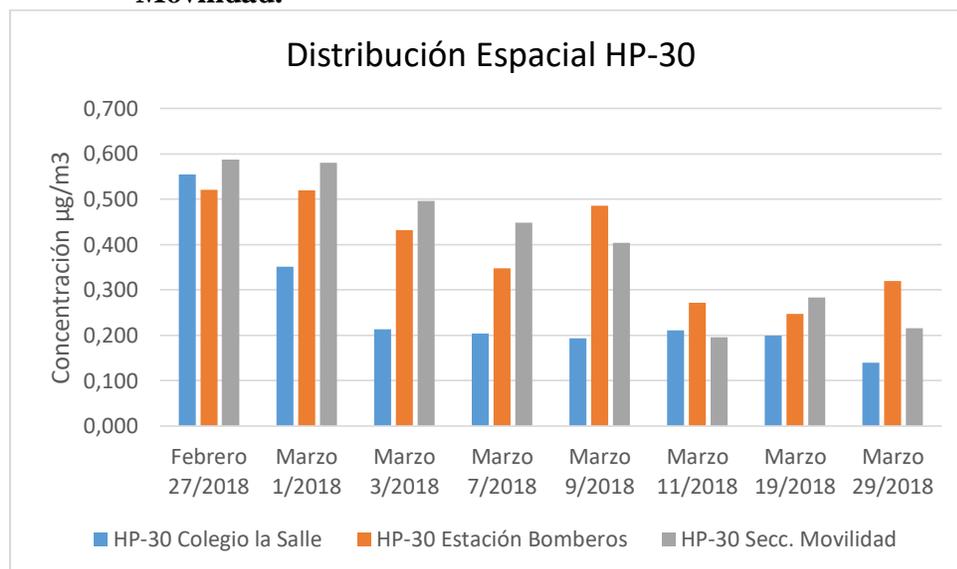


Figura 26. Distribución Espacial HP-30

Fuente: Autoras.

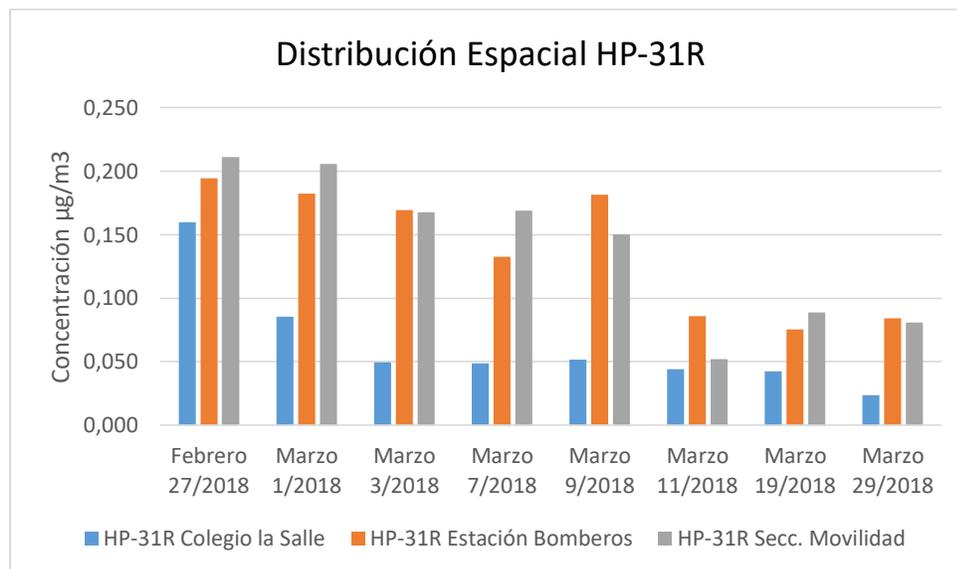


Figura 27. Distribución Espacial HP-31R

Fuente: Autoras.

La comparativa de las tres estaciones monitoreadas, permite ver que el Componente HP-30 en el sector del Colegio La Salle, se encuentra casi siempre en valores inferiores en relación a las demás estaciones, probablemente por las características del lugar tiene una poca exposición a fuentes que ocasionen aumento en la concentración, también se mantiene un patrones consistente, y similar al componente HP-31R, indicando una escasa presencia de partículas del componente derivado de la quema del carbón.

Los tres sectores de la ciudad revelan cómo es la composición de fracciones de Hópanos encontrados en la atmósfera, se presentan resultados predecibles, se observó la Figura y se encontró en la distribución espacial de HP-30 tiene los valores de concentración más elevados que van desde 0,300 µg/m³ a 0,600 µg/m³, en relación con el rango de concentración del HP-31R que sus concentraciones máximas van de 0,075 µg/m³ a 0,200 µg/m³.

El estudio reveló que en las estaciones Movilidad y Bomberos predominan las altas concentraciones de compuestos trazadores de Combustión de carbón, demostrando que las fuentes de emisión por combustión de carbón están presentes y emiten más contaminantes de este tipo, considerando que son sectores más urbanizados con presencia de industrias y comercio que utiliza calderas y hornos para sus procesos, emitiendo partículas a la atmosfera resultado de la quema de carbón sea vegetal o mineral.

7.4 HAPS

7.4.1 Distribución Temporal PM10 Colegio La Salle, Estación de Bomberos, Sec. Movilidad.

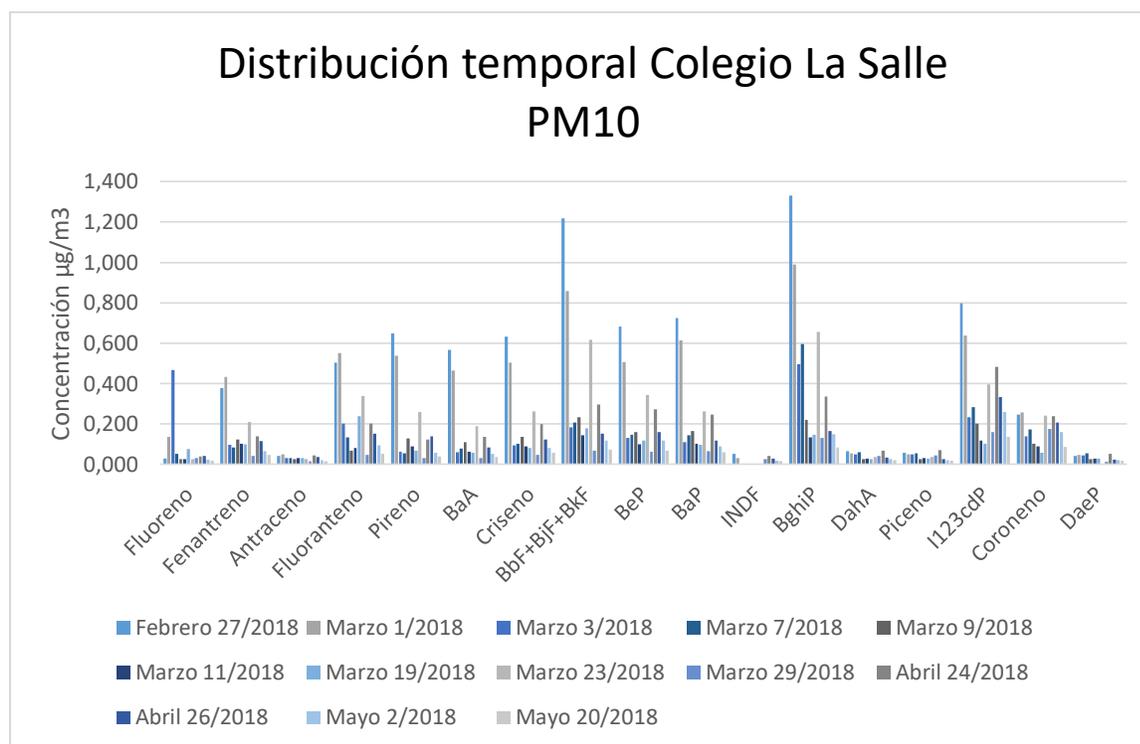


Figura 28. Distribución Temporal Colegio La Salle
Fuente: Autoras.

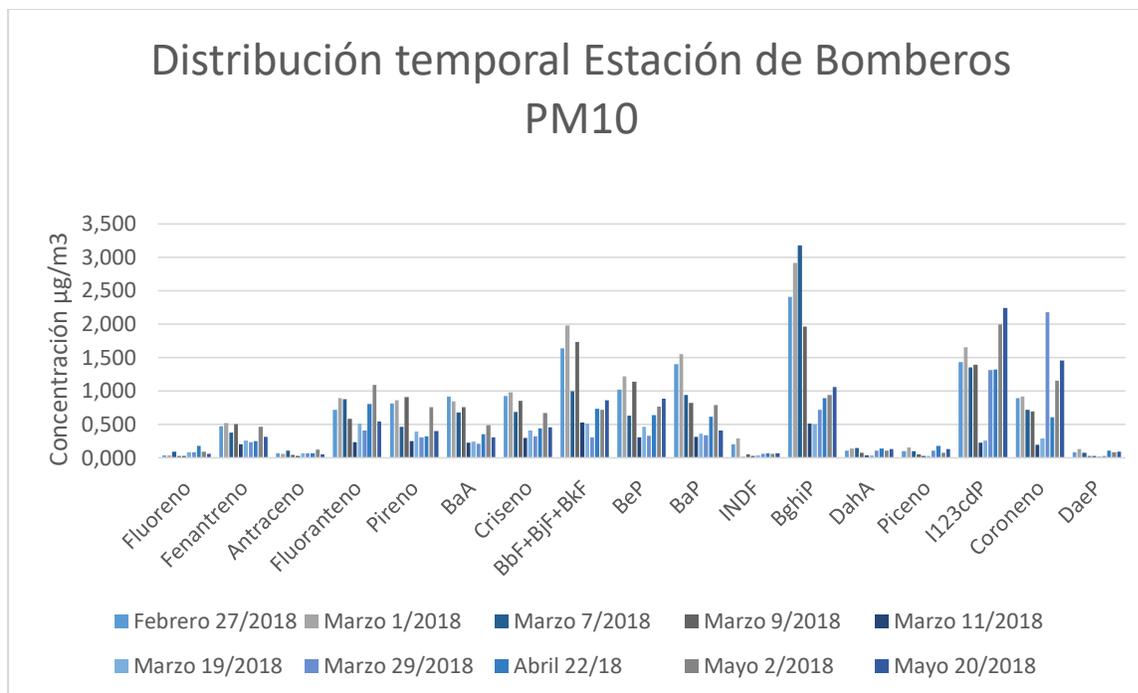


Figura 29. Distribución Temporal Estación de Bomberos

Fuente: Autoras.

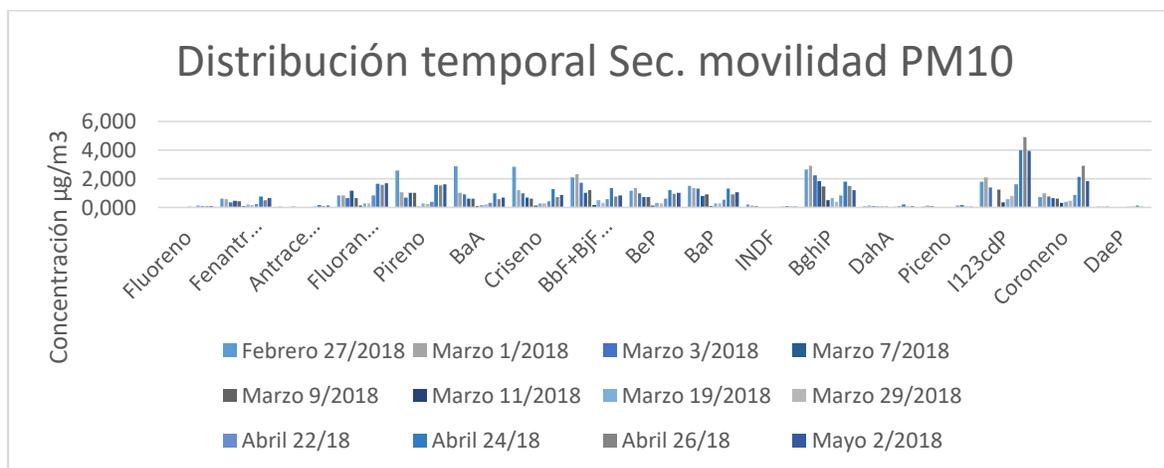


Figura 30. Distribución Temporal Sec. Movilidad

Fuente: Autoras.

Para el PM10 de los sectores Colegio La Salle, Estación de Bomberos, Estación Movilidad se observó que sobresalen los componentes químicos HAPS de Coroneno, Pireno, BghiP y 1123cdP, que tiene valores máximos en las tres estaciones y son compuestos predominantes, es

importante destacar cómo la escala de concentración es mayor para la estación de Movilidad con valores que alcanzan $5.00 \mu\text{g}/\text{m}^3$, seguido de la estación Bomberos alcanzando concentraciones de $3,20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y finalizando con las concentraciones de menor proporción en la estación colegio la Salle con un valor máximo de concentración de $1,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Respecto al nivel de concentración de los demás componentes, sus valores son supremamente bajos, es decir son los componentes menos predominantes por ejemplo los Fluoranteno, BeP, que son trazadores de combustión de Diésel. De estas concentraciones se dedujo que son poco relevantes y pueden ser considerados trazadores que confirmen la presencia de estas fuentes al haber sido determinadas por otros trazadores específicos como el Pireno. De igual manera se puede determinar que el compuesto químico de Piceno como trazador de combustión de carbón puede ser un trazador de apoyo y rectifique la presencia de estas fuentes al haber sido analizadas con otros trazadores que son más eficientes como los hópános.

Al analizar el singular y específico comportamiento del BghiP en las fechas de 1 y 7 de marzo que se dispara asombrosamente los niveles de concentración en las estaciones de Bomberos y Movilidad, esto como causa posible al incremento del flujo vehicular o flotas con problemas mecánicos causando mayor combustión de gasolina, como también puede ser el crudo y quema de derivados del petróleo, también este compuesto.

7.4.2 Distribución de Tamaño Colegio La Salle PM2.5/PM10

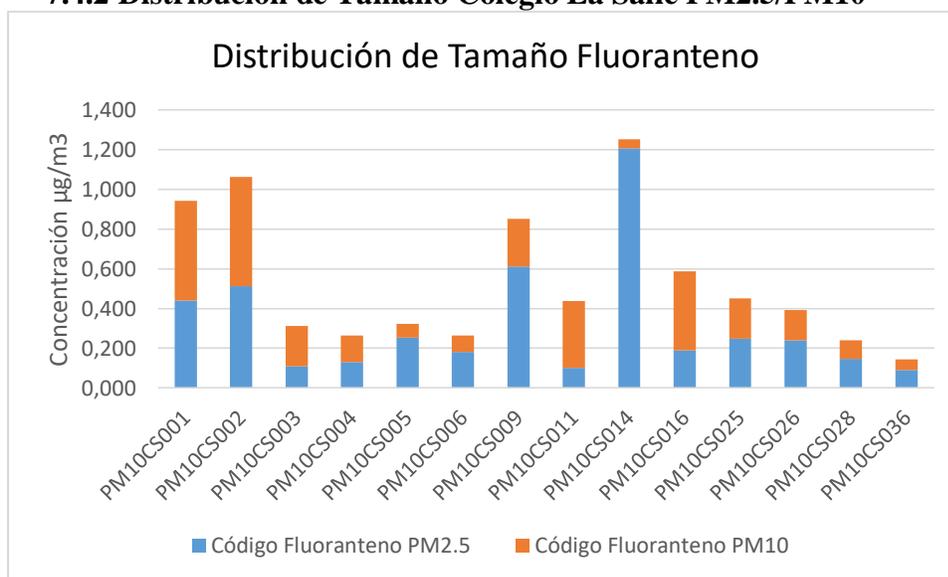


Figura 31. Distribución de Tamaño Fluoranteno

Fuente: Autoras.

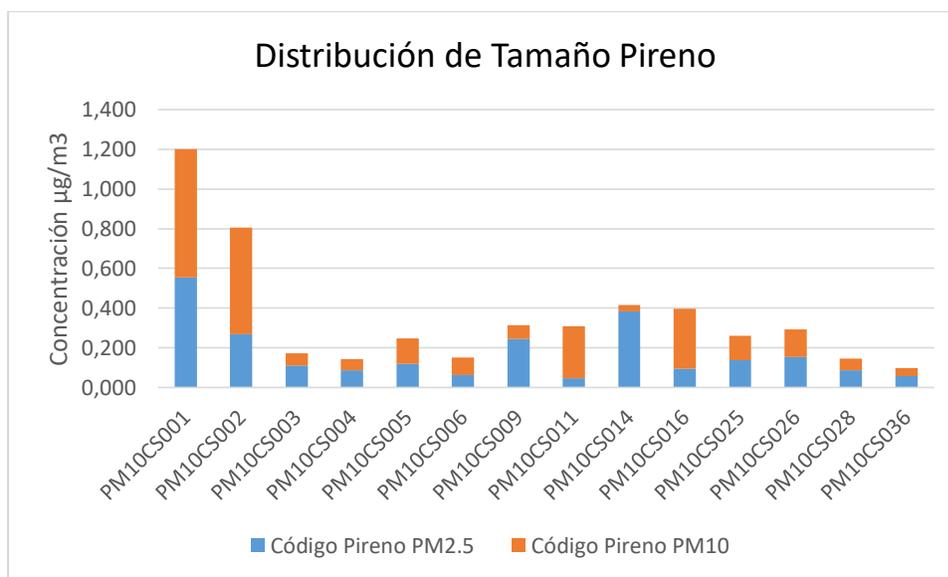


Figura 32. Distribución de Tamaño Pireno

Fuente: Autoras.

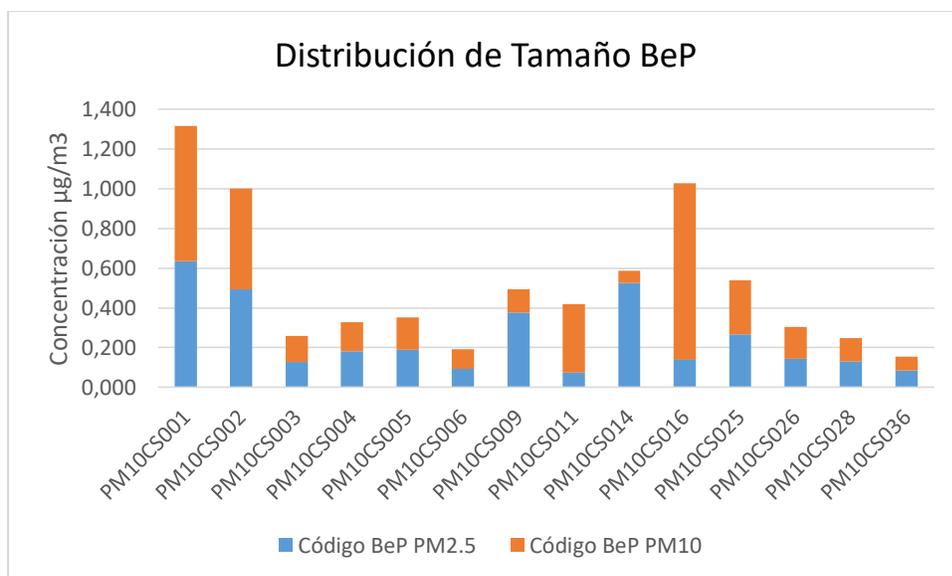


Figura 33. Distribución de Tamaño BeP

Fuente: Autoras.

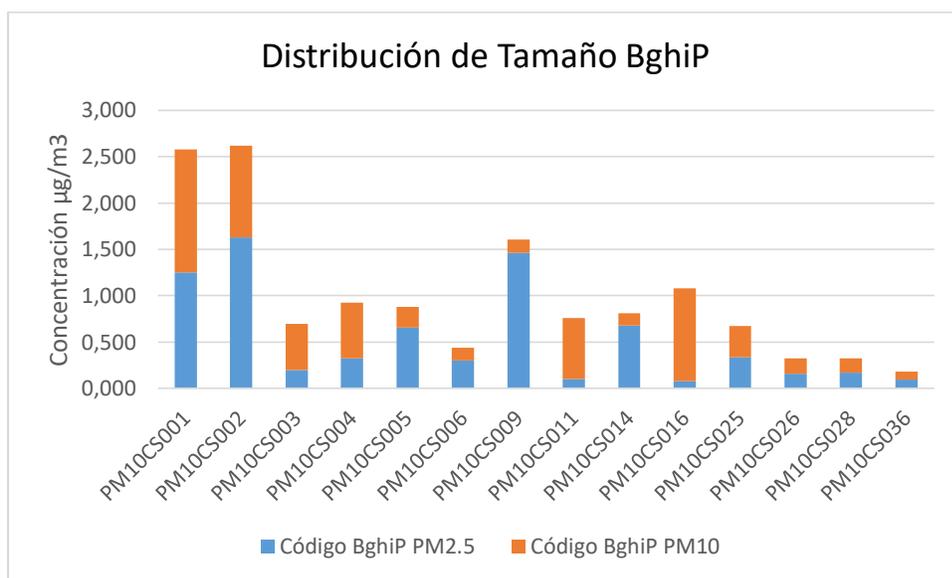


Figura 34. Distribución de Tamaño BghiP

Fuente: Autoras.

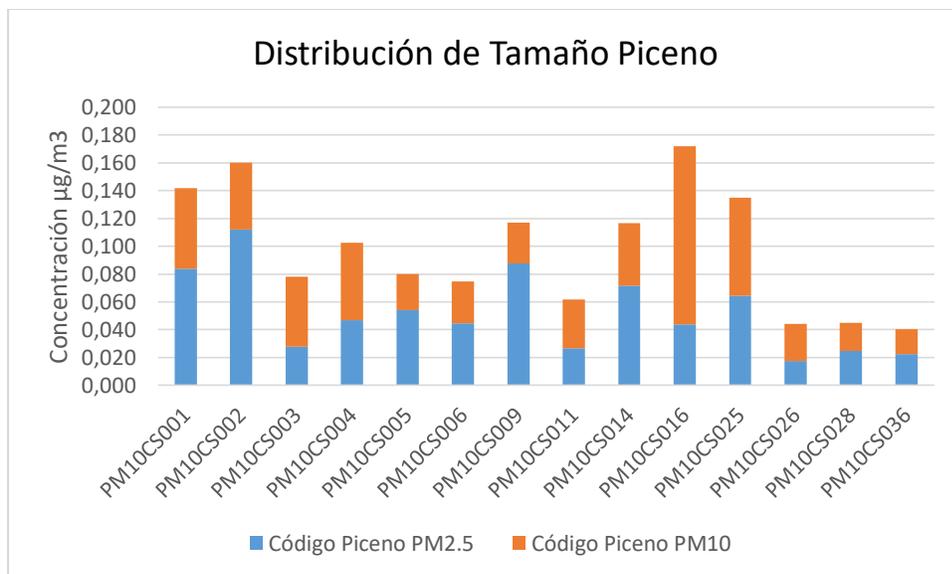


Figura 35. Distribución de Tamaño Piceno

Fuente: Autoras.

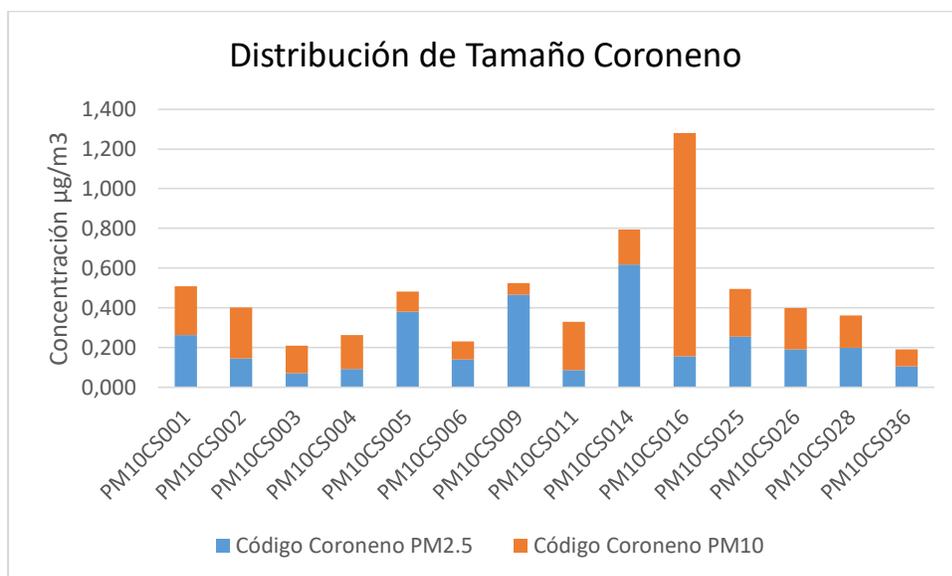


Figura 36. Distribución de Tamaño Coroneno

Fuente: Autoras.

Los Alcanos presentes en el monitoreo determinaron el estado real del material particulado suspendido en la atmosfera, con una mayor presencia de partículas finas detectadas con el PM2.5, es claro en las Figuras, que revelaron el comportamiento uniforme del tamaño de la

partícula, destacando que estas partículas son menos densas y más volátiles en el medio ambiente de estudio.

Los resultados Figurados demuestran la distribución de tamaño del material particulado, muchas veces este depende de variables locales en la zona de estudio y aunque sus efectos han sido objeto de investigación, se puede decir que el tamaño de la partícula de Pireno y fluoranteno como hidrocarburo es un indicador claro de la presencia de Combustibles fósiles y derivados del petróleo, principalmente el Diésel.

También es posible distinguir una concentración más regularizada y con una tendencia a ser más constante en sus valores, que la distribución de tamaño para PM10, sin ser la partícula PM2.5 la predominante del compuesto Pireno, el cual es un trazador que permite analizar posibles fuentes cercanas de quema de carbón que emiten las chimeneas y de más quemaduras vegetales o de otros elementos derivados.

7.4.3 Distribución Espacial PM10 Colegio La Salle, Estación de Bomberos, Sec. Movilidad.

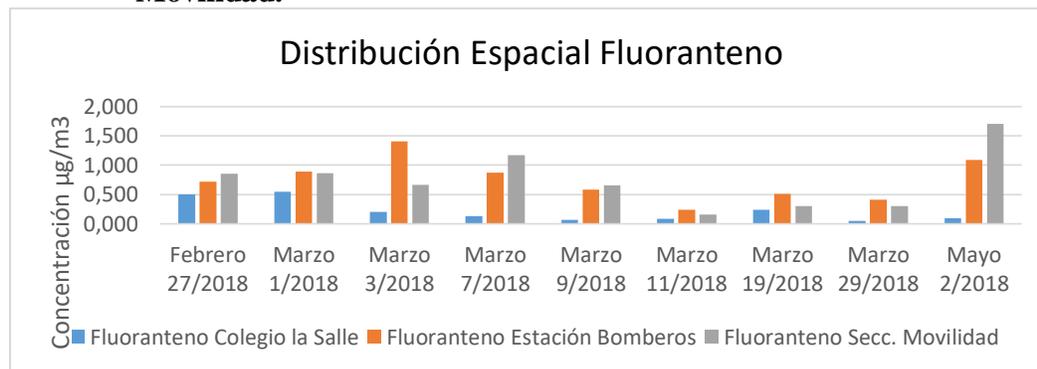


Figura 37. Distribución Espacial Fluoranteno

Fuente: Autoras.

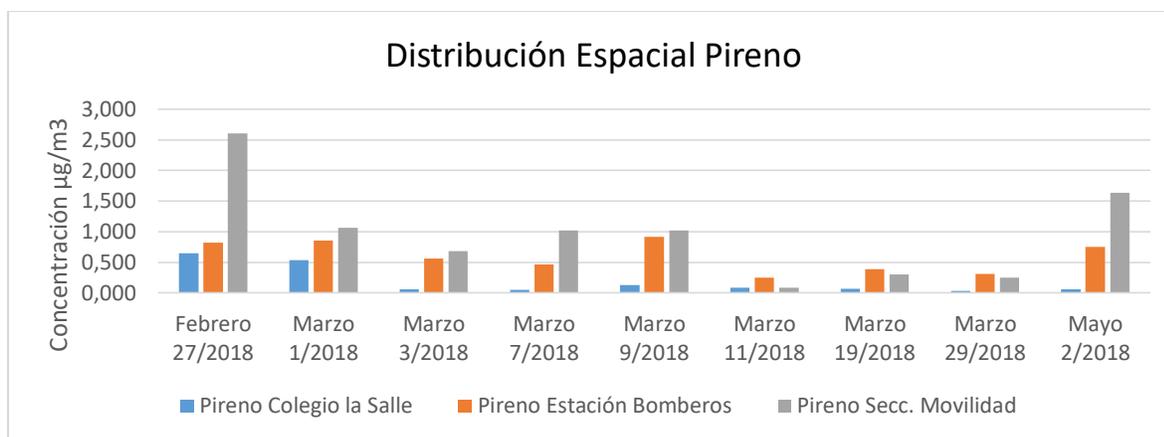


Figura 38. Distribución Espacial Pireno

Fuente: Autoras.

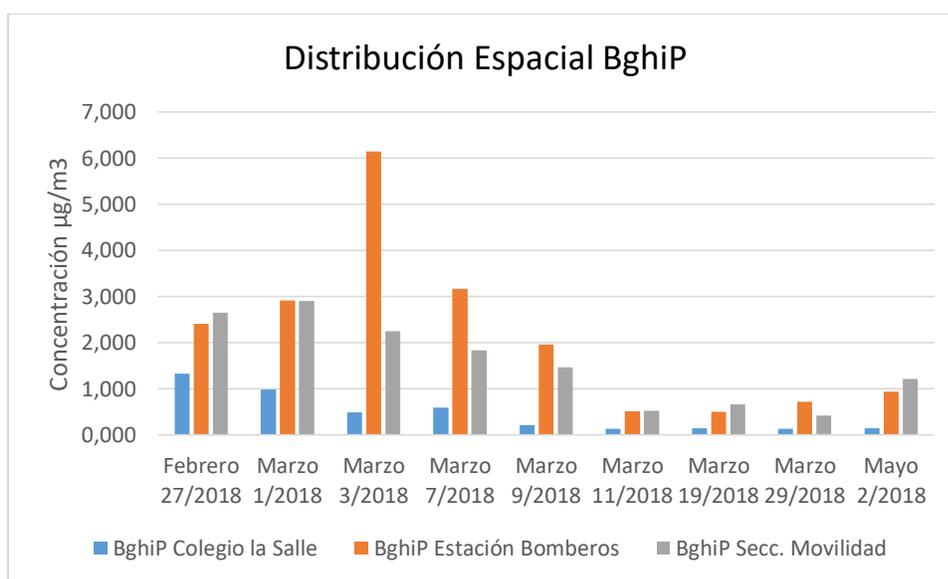


Figura 39. Distribución Espacial BghiP

Fuente: Autoras.

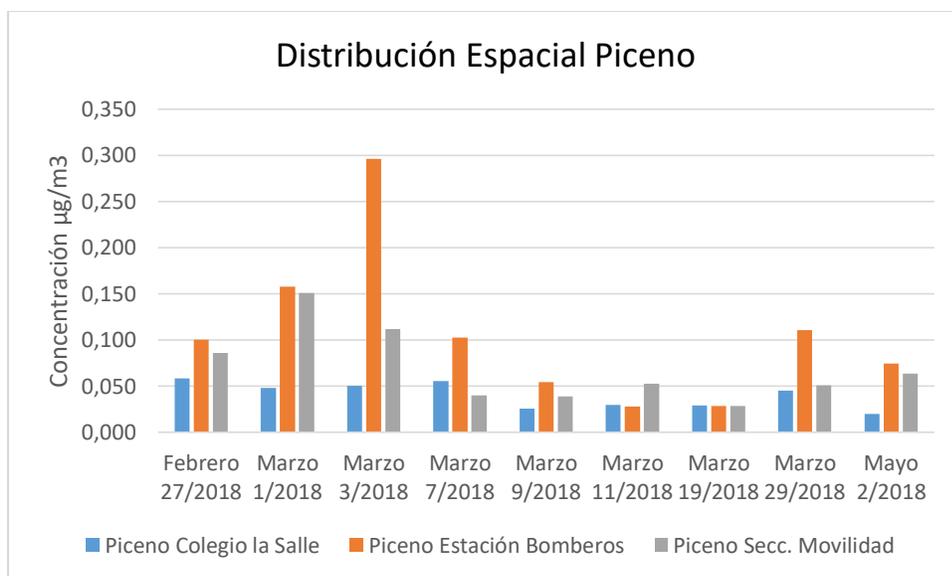


Figura 40. Distribución Espacial Piceno

Fuente: Autoras.

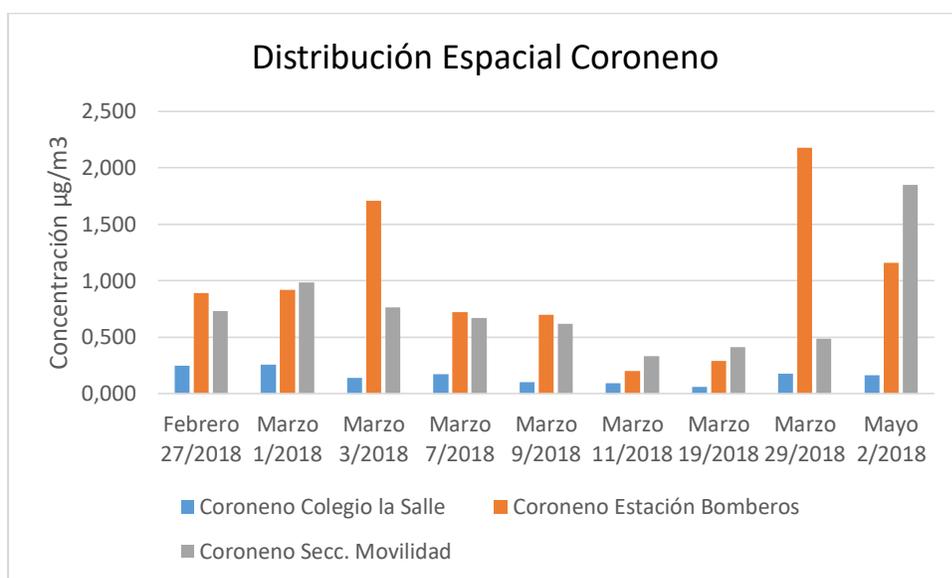


Figura 41. Distribución Espacial Coroneno

Fuente: Autoras.

Se observa la comparativa de las Figuras en los 3 sectores para el comportamiento en la distribución espacial, un punto importante del análisis fue para la muestra del 11 de marzo en la que se tiene que en los sectores se disminuye la concentración considerablemente a causa de las elecciones que se presentaron en la ciudad.

Paralelo a ello se tiene que el sector movilidad posee altas concentraciones del compuesto Fluoranteno y Pireno. Estos componentes químicos revelan cómo se comportan las emisiones de gases producidos por combustión de Diésel, siendo indicador de Contaminantes por automóviles entre otras combustiones.

La comparación observada en la distribución espacial de los 3 sectores de la ciudad revela cómo es la composición en fracciones de HAPS encontrados en la atmósfera, y como los resultados del trazador BghiP que predominan en la estación de Bomberos son contradictorios con los resultados del Fluoranteno y Pireno que son trazadores de Diésel los cuales predominan en la estación de Movilidad.

La Figura 40, muestra que los niveles de concentración se presentan con un mayor aumento del componente químico Piceno por fracción de material particulado en la atmósfera en la estación de Bomberos, datos que muestran una posible elevación de quema o combustión del elemento carbón y demás derivados que pueden llegar a la atmosfera arrastrados por el viento, para contaminar el medio. Se reveló claramente que predomina la concentración en esta estación al tener 7 de 9 muestras la mayor concentración de Piceno.

El análisis de la Estación de Bomberos y Movilidad que tienen concentraciones altas y muy uniformes determinó que el componente químico Coroneno que hace parte de los HAPS es trazador de combustión de gasolina, esto revelo cómo los vehículos que transitan en el sector tienen un mayor flujo, siendo un indicar claro y alarmante de emisiones toxicas en partículas muy pequeñas como se analizó en la distribución de tamaño.

8. Conclusiones

Los anteriores resultados permitieron identificar trazadores orgánicos para fuentes de emisión PM 2.5 y PM10 de tres estaciones ubicadas en la ciudad de Bogotá, que son la Estación Colegio La Salle, Bomberos y Movilidad. Los principales compuestos encontrados fueron: Para alcanos se identificaron los compuestos n-C21, n-C22, n-C23, n-C24, n-C25 y n-C27, los cuales son trazadores importantes de combustión de Diésel y Gasolina. Para el grupo Esterano se identificaron los compuestos CHOS y CHO 29, que son trazadores específicos de fuentes de grasa y aceites lubricantes de motores. En el grupo de los Hópanos se reconocen como principales compuestos HP-30 y HP-31R estos indican presencia de fuentes de combustión de Carbón mineral o vegetal. Por último, tenemos el grupo químico de los HAPS y sus compuestos trazadores de Diésel más notables el Fluoranteno, Pireno y BghiP; así como también presenta trazadores de combustión de gasolina y combustión de carbón, que son el Coroneno y Piceno respectivamente.

Se tiene que la composición química del material particulado colectado en las tres zonas de muestreo en la ciudad de Bogotá, identifica las familias químicas de los Hidrocarburos, Esteranos, Hópanos y HAPS, con predominancia por concentraciones más elevadas de los Hidrocarburos como n-C19, n-C20, n-C21, n-C22, n-C23, n-C24, n-C25, n-C26 y n-C27, con resultados mínimo de 15,00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y máximos de 115,00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Las familias que por la concentración tan escasa no predominaron en los monitoreos fueron los Esteranos con compuestos como CHOR, CHOS, CHO 28, CHO 29, y los Hópanos compuestos los cuales fueron Tm, HP-29RS, HP-29, HP-30, HP-31S, HP-31R, HP-32S y HP-32.

Los HAPS que son otra familia numerosa en elementos y variada en sus composiciones determinaron los siguientes compuestos: Fluoreno, Fenantreno, antraceno, Fluoranteno, Pireno,

BeA, Criseno, BeP, BaP, INDF, BghiP, DahA, Piceno, I123cdP, Coroneno, DeaP, los cuales se concentran en concentración a considerar nobles y relevantes.

Se evaluó la distribución espacial y temporal de la fracción orgánica e inorgánica del material particulado para los tres sectores de la ciudad, y como resultado se tuvo que, en el sector del Colegio la Salle las concentraciones de todas las familias químicas son escasas y mínimas debido a que las características del lugar.

Ahora bien, para la estación de Movilidad se observó un patrón de concentraciones elevadas constante y uniforme en cada familia química, debido a que este sector presenta un alto flujo vehicular, al igual que tiene mayor presencia de industria y comercio en sus alrededores. En la estación de Bomberos las características no varían mucho con respecto a la estación movilidad a causa de que tiene similitud en su ubicación y flujo vehicular, siendo por poco la estación movilidad la de mayor predominancia. Un análisis muy importante que se observó fue que en la fecha del Domingo 11 de marzo, la fecha en la cual el país estuvo en jornada de elecciones de senado y cámara de representantes, se evaluó el comportamiento del material particulado, disminuyendo considerablemente, esto refleja como la ciudad disminuye el flujo vehicular principalmente las flotas de transporte público, que son las de mayor impacto en la atmósfera. El comportamiento atmosférico es influenciado por las actividades antrópicas y sus emisiones constantes, en los 3 sectores que son Colegio La Salle, Estación Bomberos y Sector Movilidad se relacionaron los trazadores que apuntan a las principales fuentes de emisión, como por ejemplo los Hidrocarburos del n-C₂₁ al c-C₂₇ los cuales indican que las fuentes principales son el flujo vehicular y/o a la combustión de compuestos orgánicos como el Diésel y la Gasolina debido a motores o generadores, al igual que la quema de combustible.

Otros trazadores importante son los de la familia de los HAPS que son mejores trazadores de combustión de carbono que los Hópanos debido a su concentración es mayor y más frecuente, ya que son indicadores infalibles de fuentes de quema de carbón vegetal o mineral por presencia de hornos, calderas y chimeneas.

La importancia de los Esteranos es que sus compuestos son trazadores indiscutibles de Combustión de Aceites, es decir, nos ayudan a detectar fuentes en la cuales los aceites de motor y lubricantes estén siendo emitidos de manera que puede ser causado este fenómeno por un flujo vehicular en mal estado, por daños en motores, o por flotas y vehículos que estén muy antiguos y necesitan ser cambiados, los datos corroboran la relación concentración de fracción del componente con la ubicación y condiciones atmosféricas que la ciudad de Bogotá ha experimentado en el primer semestre del 2018.

Se concluye además la presencia de agentes contaminantes por acción de sectores con movilidad industrial en donde se utilizan hornos o equipos similares que, en su proceso de combustión con elementos específicos proporcionan residuos contaminantes que alteran los resultados de pureza.

9. Recomendaciones

Importante tener en cuenta cada detalle de los procesos climatológicos y externos que puedan afectar el control y la toma de la muestra, para ello la inspección visual del lugar es vital, hacer los chequeos correspondientes de las muestras, reposición y revisión de los filtros, un transporte adecuado de la muestra para no contaminar los resultados y el trabajo realizado, un mantenimiento preventivo de los equipos de acuerdo con lo establecido, para anticipar la existencia de fallos o problemas.

Importante la hora en la que se da la muestra, ya que las variaciones diurnas tienen un patrón de emisión y condiciones meteorológicas que influyen particularmente los niveles de concentración de los componentes químicos.

Crear una base datos con estudios enfocados a las fuentes de emisión y su representatividad, que permitan alimentar y sustentar los compuestos químicos que se presentan en la investigación, para próximos estudios relacionados a compuestos derivados de hidrocarburos.

La relación entre los diferentes contaminantes también puede aportar claves para determinar la validez de los datos, es importante entender las relaciones entre los compuestos y su familiaridad.

Para complementar el estudio sería importante una base de estudio de conteo de vehículos, un inventario de fuentes móviles que darían más peso a los resultados obtenidos y una mayor validez.

Adicionalmente se recomendaría para disminuir las limitaciones de obtención de datos el anexo de un estudio para una estación meteorológica cercana a La Salle en donde se pueda determinar si los valores de presencia de PM constantes en las tres estaciones para los días con características especiales, se debe a la acción del viento.

Aplicar un modelo receptor fuente para lo cual se requerirían no solo de la composición de orgánicos sino también de metales y especies iónicas.

Para mejorar la contundencia de los datos y tener un mejor análisis es importante tener más días de muestreo, que permitan comparar el comportamiento manera más específica, por ejemplo, comparaciones del mismo día durante varias semanas.

Biografía

- Bei-Bing, Z., Xiao-Feng, H., Bin, Z., Jing, D., Li-Wu, Z., Ning, F., Ling-Yan, H. (2017). Source apportionment of PM_{2.5} pollution in an industrial city in southern China. ScienceDirect, Atmospheric Pollution Research 8, 1193-1202
- “Chemical Characterization and Source Apportionment of Fine and Coarse Particulate Matter in Lahore, Pakistan.” Atmospheric Environment 44 (8). Elsevier Ltd: 1062–70.
- DeMinter J., Mieritz, M., Shelton, B. (2009). LADCO Organic Molecular marker Study Final Report. Wisconsin State Laboratory of Hygiene, University of Wisconsin-Madison.
- Gaitán, M., Cancino, J., Behrentz, E. (2007). Análisis del estado de la calidad del aire en Bogotá. Universidad de los Andes, Revista de ingeniería, 26, 81-92.
- McGranahan, G. M. (2003). Air Pollution and Health in Rapidly Developing Countries. Londres. Earthscan Publishers, 227 pp.
- Ortega, R. S. (02 de mayo de 2018). Los más pobres todavía cargan ‘el mayor peso’ de la contaminación. EL TIEMPO.
- Rodriguez V., Laura Andrea, Henry Castro Ortiz, Juan Jose Serrano Rey, Astrid B Herrera L, and Jürg Niederbacher. 2010. “Contaminación Atmosférica y Sus Efectos En La Salud En Bucaramanga.” Revista Del Observatorio de Salud Pública de Santander 5 (1): 3–18.
- Samet, J. M. et al. (2000). † The National Morbidity, Mortality, and Air Pollution Study. Part II: Morbidity and mortality from air pollution in the United States†, Res.Rep. Health Eff.Inst., vol. 94, no. Pt 2, pp. 5-70
- Stone, E. a., D. C. Snyder, R. J. Sheesley, a. P. Sullivan, R. J. Weber, and J. J. Schauer. 2007. “Source Apportionment of Fine Organic Aerosol in Mexico City during the MILAGRO Experiment 2006.” Atmospheric Chemistry and Physics Discussions 7 (4): 9635–61.

Stone, Elizabeth, James Schauer, Tauseef a. Quraishi, and Abid Mahmood. 2010.

Vargas, Freddy A., Nestor Y. Rojas, Jorge E. Pachon, and Armistead G. Russell. 2012. “PM10

Characterization and Source Apportionment at Two Residential Areas in Bogota.”

Atmospheric Pollution Research 3 (1): 72–80. <https://doi.org/10.5094/APR.2012.006>.

Efectos del material particulado (PM) sobre la salud y el medioambiente | US EPA. (2019).

<https://espanol.epa.gov/espanol/efectos-del-material-particulado-pm-sobre-la-salud-y-el-medioambiente>

Tiempo, C. (2019). Las causas que llevaron a Bogotá a la emergencia por contaminación.

<https://www.eltiempo.com/bogota/las-causas-que-llevaron-a-bogota-a-la-emergencia-por-contaminacion-327796>