

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS, INGENIERÍA, MEDICINA Y CIENCIAS SOCIALES
Y HUMANIDADES

PROGRAMA MULTIDISCIPLINARIO DE POSGRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES

Evaluación de Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP's) y Carbono Negro (CN) presentes en partículas suspendidas PM_{10} en la zona NE de San Luis Potosí.

PRESENTA:

Lic. Angel Arturo Cabrera Cano

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Valter Armando Barrera López

ASESORES:

Dr. Rogelio Flores Ramírez
Dr. Fernando Díaz-Barriga Martínez

21/09/2020

CRÉDITOS INSTITUCIONALES

PROYECTO REALIZADO EN:

LaNGIF – CIACYT - UASLP

CON FINANCIAMIENTO DE:

Becas CONACYT

A TRAVÉS DEL PROYECTO DENOMINADO:

Proyecto CONACYT de problemas nacionales 2016 (01-3849).

Evaluación de la fracción orgánica presente en las partículas atmosféricas en el estado de San Luis Potosí y su impacto en el cambio climático y salud pública.

AGRADEZCO A CONACyT EL OTORGAMIENTO DE LA BECA-TESIS

Becario No. 936384

**LA MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES RECIBE APOYO ATRAVÉS
DEL PROGRAMA NACIONAL DE POSGRADOS DE CALIDAD (PNPC)**



Evaluación de Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP's) y Carbono Negro (CN) presentes en partículas suspendidas PM₁₀ en la zona NE de San Luis Potosí. by Angel Arturo Cabrera Cano is licensed under a [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

Índice

Resumen	7
Abstract.....	8
JUSTIFICACIÓN.....	9
OBJETIVOS.....	10
HIPÓTESIS.....	11
CAPÍTULO 1. CONTAMINANTES DEL AIRE.....	13
1.1 Contaminación Atmosférica.....	13
1.1.2 Clasificación de los contaminantes atmosféricos	13
1.1.2.1 Gases y Compuestos de efecto invernadero (GyCEI)	14
Dióxido de carbono (CO ₂).....	15
Metano (CH ₄)	15
Óxido nitroso (N ₂ O)	16
Gases Fluorados (CFC)	16
Carbono Negro (CN)	16
1.1.2.2 Compuestos Tóxicos.....	18
1.1.2.3 Contaminantes Criterio (CAC).....	19
1.2 Escenario internacional de la contaminación atmosférica.....	24
1.3.1 Objetivos del Desarrollo Sostenible	25
1.3.2 Normativa Internacional	26
1.4 Escenario nacional de la contaminación atmosférica.....	28
1.4.1 Fuentes naturales y antropogénicas	30
1.4.2 Normativa nacional.....	32
1.5 Escenario local de la contaminación atmosférica en ciudades medianas: Caso de estudio ciudad de San Luis Potosí.....	34
1.6 Partículas Suspensas	36
1.6.1 Clasificación de las partículas suspendidas (origen y tamaño)	36
Clasificación por tamaño:.....	38
1.6.2. Mecanismo de acción de las partículas suspendidas en el organismo.....	41
1.6.3 Monitoreo de Partículas suspendidas en ciudades medianas de México.....	43
CAPÍTULO 2. FRACCIÓN CARBONCEA	48
2.1 Fracciones en las partículas suspendidas.....	48
2.2 Partículas carbonáceas.....	48

2.2.1 Carbono Negro (CN)	51
2.2.2 Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP's)	52
2.3 Interacciones del Carbono Negro con Hidrocarburos Aromáticos policíclicos	57
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA	60
3.1 Caracterización del sitio de estudio	60
3.2 Campaña de muestreo de partículas suspendidas y carbono negro	68
3.2.1 Técnicas de muestreo ambiental	69
3.2.2 Muestreo de Carbono Negro	69
3.2.3 Muestreo de Partículas suspendidas menores a 10 micrómetros (PM ₁₀)	71
3.2.4 Monitoreo de Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP's)	72
3.2.4.1 Caracterización de Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos en partículas PM ₁₀	72
3.3 Gráficos de dispersión de los contaminantes durante el muestreo	74
3.4 Identificación de las principales fuentes y combustibles asociados a Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos	76
3.5 Estimación del riesgo a la salud humana por Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos	77
CAPÍTULO 4. RESULTADOS	80
4.1 Concentraciones de partículas suspendidas menores a 10 micrómetros (PM ₁₀) y Carbono Negro (CN)	80
4.2 Comportamiento ambiental con base a la temporalidad de PM ₁₀ y CN	94
4.3 Concentración de Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos contenidos en fase de partícula PM ₁₀	102
4.4 Estimación del riesgo a la salud humana por Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos.	107
4.5 Relación de HAP's con carbono negro	110
4.6 Identificación de fuentes y combustibles predominantes con base al tipo de emisión de Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos.	111
CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN	120
5.1 Discusión:	120
5.2 Conclusiones	128
5.3 Recomendaciones:	130
Referencias	132

Índice de Tablas

TABLA 1. CARACTERÍSTICAS DE LOS GYCEI.....	18
TABLA 2. NORMATIVA MEXICANA PARA CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS CRITERIO.	20
TABLA 3. EFECTOS A LA SALUD POR LOS CONTAMINANTES CRITERIO.....	21
TABLA 4. NORMATIVA INTERNACIONAL PARA CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS CRITERIO. .	26
TABLA 5. MÉTODOS DE MEDICIÓN NORMADOS PARA CONTAMINANTES CRITERIO EN MÉXICO.	32
TABLA 6. NORMATIVA NACIONAL PARA OBTENCIÓN Y COMUNICACIÓN DEL ÍNDICE DE CALIDAD DEL AIRE Y RIESGOS A LA SALUD.	33
TABLA 8. ESTATUS DE LAS ESTACIONES DE MONITOREO DE PARTÍCULAS SUSPENDIDAS EN CIUDADES MEDIANAS PARA EL AÑO 2018.	45
TABLA 9. HIDROCARBUROS AROMÁTICOS POLICÍCLICOS PRIORITARIOS POR LA EPA.....	53
TABLA 10. CÁLCULOS DE RELACIONES ENTRE HAP´S.....	76
TABLA 11. FACTOR DE TOXICIDAD EQUIVALENTE DE LOS HAP´S.....	78
TABLA 12. CONCENTRACIONES DE PM ₁₀ Y CN DURANTE EL MUESTREO.	80
TABLA 13. REGISTRO DE EPISODIOS DE CONCENTRACIONES SUPERIORES AL LÍMITE PERMISIBLE DE PM ₁₀	85
TABLA 14. CARACTERÍSTICAS DE LOS EPISODIOS DE ALTAS CONCENTRACIONES DE PM ₁₀ POR MES.....	92
TABLA 15. CONCENTRACIONES DE LA MEZCLA DE HAP´S CONTENIDOS EN LA FRACCIÓN PM ₁₀	102
TABLA 16. CONCENTRACIONES DE HAP´S EN PARTÍCULAS PM ₁₀	106
TABLA 17. EQUIVALENCIA A B(A)P DE CADA UNO DE LOS HAP´S CARACTERIZADOS	108
TABLA 18. CÁLCULO PARA IDENTIFICAR LA FUENTE Y TIPO DE COMBUSTIÓN PREDOMINANTE EN EL APORTE DE HAP´S DURANTE EL MUESTREO REGISTRADO EN LA ZONA NE DE SAN LUIS POTOSÍ	111
TABLA 19. COMPARACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS DE HAP´S CON OTROS ESTUDIOS..	116
TABLA 20. COMPARACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS DE CN CON OTROS ESTUDIOS.	118

Índice de figuras

FIGURA 1. CIUDADES Y ZONAS METROPOLITANAS DE MÉXICO CON MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AIRE EN 2016	29
FIGURA 2. UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES DE MONITOREO ATMOSFÉRICO	34
FIGURA 3. DIÁMETRO EQUIVALENTE DE LAS PARTÍCULAS SUSPENDIDAS, EN FUNCIÓN A SU VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN	38
FIGURA 4. PENETRACIÓN DE LAS PARTÍCULAS SUSPENDIDAS EN EL ORGANISMO HUMANO	42
FIGURA 5. CIUDADES CON MONITOREO DE CALIDAD DEL AIRE EN MÉXICO INCLUIDAS EN EL INFORME DEL AÑO 2018.....	44
FIGURA 6. FRACCIONES DE LAS PARTÍCULAS SUSPENDIDAS	50
FIGURA 7. FRACCIONES DE LAS PARTÍCULAS SUSPENDIDAS	50
FIGURA 8. DIAGRAMA DE FUNCIONAMIENTO DEL ETALOMETRO AE-33 CARBONO ORGÁNICO (CORG)	50
FIGURA 9. DIAGRAMA DE FUNCIONAMIENTO DEL ETALOMETRO AE-33	70
FIGURA 10. EQUIPO MONITOR ATENUACIÓN BETA PM ₁₀ FIGURA 11. DIAGRAMA DE FUNCIONAMIENTO DEL ETALOMETRO AE-33	70
FIGURA 12. EQUIPO MONITOR ATENUACIÓN BETA PM ₁₀	71
FIGURA 13. GRÁFICAS POLARES DE FRECUENCIAS PARA PM ₁₀ Y CN FIGURA 14. EQUIPO MONITOR ATENUACIÓN BETA PM ₁₀	71
FIGURA 15. GRÁFICAS POLARES DE FRECUENCIAS PARA PM ₁₀ Y CN	95
FIGURA 16. GRÁFICAS POLARES DE FRECUENCIAS PARA PM ₁₀ Y CN	95
FIGURA 17. GRÁFICAS POLARES TEMPORAL PARA PM ₁₀ Y CN.....	96
FIGURA 18. GRÁFICAS DE CALENDARIO DE PM ₁₀ Y CN, DURANTE EL ÚLTIMO TRIMESTRE DE 2018	97
FIGURA 19. GRÁFICAS DE CALENDARIO DE PM ₁₀ Y CN, DURANTE EL PRIMER TRIMESTRE DE 2019	98
FIGURA 20. GRÁFICAS DE CALENDARIO DE PM ₁₀ Y CN, DURANTE EL SEGUNDO TRIMESTRE DE 2019	99

RESUMEN

“Evaluación de Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP’s) y Carbono Negro (CN), presentes en partículas PM₁₀ en la zona NE de San Luis Potosí.”

Autor: Lic. Angel Arturo Cabrera Cano

Palabras Clave: Contaminación del aire, partículas atmosféricas, hidrocarburos aromáticos policíclicos, carbono negro, salud humana

Resumen:

El objetivo de esta investigación es determinar la influencia de los compuestos orgánicos (CN y HAP’s) en las partículas suspendidas PM₁₀, para determinar su contribución en las principales fuentes de emisión en la zona de San Luis Potosí, para ello se realizó campaña de muestreo comprende del 10/10/2018 al 24/06/2019 contando con datos en tiempo real de los días comprendidos, para PM₁₀ y BC con un equipo de atenuación beta y un equipo etalometro AE-33 respectivamente; para las concentraciones de HAP’s se midieron en la fracción PM₁₀ utilizando 11 filtros de cuarzo en un muestreador de partículas de alto volumen (Hi-Vol – tipo Venturi modelo P6762 marca TISCH), los cuales permitieron comparar las concentraciones con las obtenidas por el equipo automático y a su vez realizar la caracterización para la identificación de los HAP’s, la cual se realizó mediante un análisis por cromatografía de gases acoplado a un detector de masas, el cual se realizó por medio del cromatógrafo de gases GCSsystem modelo HP-6890 con detector de masas modelo MSD 5973, empleando una columna capilar HP-5MS (30 m de longitud, 0.25 mm de diámetro interno y espesor de película de 0.25 µm). De esta manera se registró una concentración media de 51.47 µg/m³ de PM₁₀ y 1.16 µg/m³ de CN y concentraciones máximas de 210 µg/m³ y 3.77 µg/m³ respectivamente. De las concentraciones de PM₁₀, 23 días superan el límite establecido por la NOM-025-SSA1-2014 y 123 días el límite propuesto por la OMS. Sin embargo, dentro del muestreo se registró que en 110 de los días presentan episodios de al menos 3 h con concentraciones superiores a 75 µg/m³ datos se realizó una estimación de riesgo a la salud humana, utilizando la concentración de referencia de la EPA (2 ng/m³) y el factor de equivalencia toxica a benzo(a)pireno. El valor obtenido de la mezcla de los HAP’s caracterizados en equivalencia a benzo(a)pireno fue de 2.37 ng/m² el cual supera al valor de referencia de la EPA 1.18 veces, lo cual es un indicador del posible riesgo y efectos en la salud que se pueden percibir en la población de esta zona de la ciudad, por lo que se hace especial énfasis en atender la necesidad de establecer valores límite permisibles de la concentración en aire del CN y los HAP’s, con la finalidad de cuidar y proteger la salud de los habitantes de esta zona, en especial las poblaciones más vulnerables. Se señala como la principal fuente emisora a la actividad ladrillera, por lo que se recomienda que las medidas pertinentes deben enfocarse a dicha fuente, no solo para mejorar la calidad del aire y salud de los habitantes de la zona NE de la ciudad de San Luis Potosí, sino también de la población que radica, labora y estudia en la zona núcleo y periférica de la actividad ladrillera.

ABSTRACT

“Evaluation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAH’s) and Black Carbon (BC), present in particles PM₁₀ in the NW area of San Luis Potosí.”

Author: Lic. Angel Arturo Cabrera Cano

Key words: air pollution, particulate matter, polycyclic aromatic hydrocarbons, black carbon, human health

Abstract:

The aim of this investigation was determine the influence of organic compounds (BC and PAH’s) on particle matter PM₁₀, to determine their contribution to major emission sources in the San Luis Potosí area, for this a sampling campaign was carried out from 10/10/2018 to 24/06/2019 with real-time data on the days covered, for PM₁₀ and BC with a beta attenuation equipment and an AE-33 aethalometer equipment respectively; for the PAH’s analysis form PM₁₀, after gravimetric analysis from 11 quartz filter with a Hi Vol equipment (Hi-Vol – Venturi model P6762, brand TISCH), after extraction of the PAH’s, a gas chromatographic mass spectrometer (GCS model HP-6890) with a mass detector model MSD 5973 was used with a 30 m HP-5MS capillary column (0.25 mm id, 0.25 µm film thickness) for identification and quantification of PAHs. From this way the following average concentrations were obtained: 51.47µg/m³ of PM₁₀ and 1.16µg/m³ of BC with highest value concentrations of 210 µg/m³ and 3.77 µg/m³ respectively. In 23 days PM₁₀ concentrations exceed the limit set by NOM-025-SSA1-2014 and in 123 days the limit proposed by the WHO. However, in the sampling, we reported that in 110 of the days present episodes of at least 3 h with concentrations higher than 75 µg/m³. The characterization from 15 of the 16 PAHs prioritized by the EPA, results with an average of 1.13 ng/m³ and the highest concentration was 8.03 ng/m³. With these data, a risk estimation to human health was made, using the EPA reference concentration (2 ng/m³) and the toxic equivalence factor to benzo(a)pyrene. The results of the mixture of PAHs characterized in B(a)P equivalence was 2.37 ng/m³, which exceeds 1.18 times the EPA reference value, which is an indicator of the possible risk and health effects that can be perceived in the population of this area of the city, in this way special emphasis is placed on attending to the need to establish permissible limit values for the concentration in air of the BC and PAHs for care and protect the health of the population who lives in this area, especially the vulnerable population. The main source identified was the brick industry, for this reason it is recommended that the pertinent measures should focus in this activity, to get better the air quality and health of the inhabitants of the NE area of the city of Sa Luis Potosi and the population who lives, works and studies in the core and peripheral zone of the brick industry.

JUSTIFICACIÓN

En el año 2015 según datos de la carga de enfermedad global (GBD, por sus siglas en inglés), se estimaba que la contaminación atmosférica causaba entre 5.7 y 7.3 (6.5) millones de muertes prematuras, de las cuales 3.1 son por exposición en exteriores (GBD, 2017). Del mismo modo la Organización Mundial de la Salud durante el 2018 realizó una actualización en la estimación, en la cual reportó que al año la exposición a la contaminación del aire (en interiores y exteriores) ocasiona aproximadamente 7 millones de muertes prematuras a nivel mundial de las cuales el 34 % de estas muertes se atribuye a enfermedades isquémicas del corazón, 21 % se atribuye a neumonías, 20 % por evento cerebral vascular, 19 % a causa de EPOC (enfermedad pulmonar obstructiva crónica) y un 7 % por cáncer de pulmón. Siendo la población más impactada los niños, al ser el grupo poblacional con más muertes por neumonía, mujeres expuestas a humo intradomiciliario y los trabajadores de exteriores como vendedores ambulantes, oficiales de tránsito principalmente (OMS, 2018).

La Agencia de Protección al Ambiente de los Estados Unidos (US-EPA, por sus siglas en inglés) y la Organización Mundial de la Salud (OMS), reconocen y advierten de la importancia de la medición de las partículas suspendidas en el aire ambiente, debido a los efectos adversos en las poblaciones humanas. Inclusive existen estudios que han sugerido el incremento de morbilidad y mortalidad debido a los problemas que ocasionan a nivel respiratorio del ser humano y mayormente en las ciudades más pobladas del mundo. Así mismo hay estudios que sugieren que las partículas finas o $PM_{2.5}$, están fuertemente asociadas a daños al sistema respiratorio en la población infantil y al incremento de alergias y otras enfermedades respiratorias (Brook R, 2010).

La relevancia y pertinencia de esta investigación se aborda desde diferentes ejes de importancia científica, pública y académica. Desde el ámbito nacional donde se apoya del cumplimiento de las normas: NOM-156-SEMARNAT-2012 y NOM-025-SSA1-2014; e inclusive de internacional apoyándose de decretos internacionales como lo son los Objetivos del Desarrollo Sostenible, los Límites Planetarios, entre otros enfocados a temas de la salud

pública, impactos del cambio climático, la calidad del aire y la vigilancia, prevención y control de contaminantes atmosféricos.

Son diversos los autores que respaldan la importancia de la caracterización química de las partículas suspendidas para comprender mejor como varía su toxicidad a partir de sus diversos componentes, ya que estos varían en función a cada lugar (Arif, Kumar, Kumar, Eric, & Gourav, 2018), (Cheng, y otros, 2015). De esta manera conociendo los componentes de la fracción orgánica en las partículas PM_{10} en San Luis Potosí, se contará con un mayor conocimiento sobre su composición y como esta puede afectar a la salud de la población, contribuir a la contaminación atmosférica e incluso al cambio climático local.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL:

Determinar la influencia de los compuestos orgánicos (carbono negro e hidrocarburos aromáticos policíclicos) en las partículas suspendidas PM_{10} , para determinar su contribución en las principales fuentes de emisión en la zona NE de San Luis Potosí.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

1. Evaluar las concentraciones de CN, HAP's y PM_{10} , así como su relación que guardan entre si durante un periodo de 9 meses en la zona NE de San Luis Potosí.
2. Identificar las principales fuentes de emisión que generan los compuestos orgánicos o carbonáceos evaluados (HAP's y CN).
3. Determinar el estado actual de la contaminación atmosférica y posibles riesgos a la salud ocasionados por estos contaminantes en la zona NE de la ciudad de San Luis Potosí.

HIPÓTESIS.

Al conocer los HAP's y CN contenidos en partículas PM_{10} es posible identificar sus fuentes de emisión principales, así como los combustibles que más emplean y su contribución al deterioro de la calidad del aire en la ciudad.

CAPÍTULO 1. CONTAMINANTES DEL AIRE

1.1 Contaminación Atmosférica

Se considera contaminación atmosférica cuando existe una presencia en la atmósfera de sustancias en cantidades y duración en las que puedan generar molestias o algún riesgo a la salud humana o de los demás seres vivos o que puedan causar daños a materiales, reducir la visibilidad, que interfieran con el goce de la vida o el ejercicio de las actividades (Martínez, 2004), (Wark & Warner, 2002).

1.1.2 Clasificación de los contaminantes atmosféricos

La contaminación atmosférica se puede clasificar en función al impacto que producen los contaminantes emitidos, en aquellos con escala global o escala local (Rojas, 2014), a su vez existen diferentes clasificaciones para los contaminantes atmosféricos en función y conveniencia de los autores, se pueden clasificar en función a su proceso de formación en contaminantes primarios (se emiten directamente a la atmósfera) o secundarios (se forman en la atmósfera a partir de reacciones químicas de compuestos precursores); otra clasificación propuesta por la EPA es en aquellos considerados como contaminantes criterio (representan un riesgo a la salud humana y/o del ecosistema) y los no criterio (Ubilla & Yohannessen, 2017). Para esta investigación se adopta una clasificación en función al “target” en donde ejercen su función contaminante, en esta clasificación, destacan aquellos contaminantes que afectan a la atmósfera modificando y/o alterando su composición e interacciones entre sus componentes, en este grupo destacan los considerados gases y partículas de efecto invernadero (GyPEI), los que representan un riesgo a la salud de las personas, denominados compuestos tóxicos y aquellos de igual importancia por sus efectos en salud, pero que deben estar sujetos a vigilancia, normativas y monitoreo constante, a nivel regional, nacional y/o internacional, denominados contaminantes atmosféricos criterio (CAC).

1.1.2.1 Gases y Compuestos de efecto invernadero (GyCEI)

La contaminación atmosférica y cambio climático son dos de las grandes adversidades que afronta la humanidad, ambas en constante incremento poniendo en riesgo la salud de los ecosistemas y de las poblaciones que los habitan y a su vez ambas son capaces de impactarse mutuamente puesto que ciertos contaminantes atmosféricos tienen como efecto adverso impactos y modificaciones en las concentraciones de otros componentes de la atmósfera y los fenómenos que ocurren en ella alterando directa e indirectamente en los cambios de temperatura, los cuales a su vez son capaces de alterar el comportamiento de ciertos contaminantes atmosféricos (Roca, Beltrán, & Gómez, 2019).

Los gases de efecto invernadero (GEI), son el conjunto de gases que atrapan y reflejan el calor proveniente del Sol lo que permite que el planeta conserve temperaturas óptimas para la vida, los cuales se ven afectados por cambios físicos y químicos que pueden ser causados naturalmente o por actividades humanas, lo cual genera una modificación en las temperaturas globales. Los principales gases de efecto invernadero son: dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido de nitrógeno (N_2O) y los denominados gases fluorados (hidrofluorocarbonos, perfluorocarbonos, hexafluoruro de azufre y trifluoruro de nitrógeno) (EPA, 2019). Aunados a estos contaminantes existe un subgrupo denominado como contaminantes climáticos de vida corta (SLCP, por sus siglas en inglés *Short-Life Climate Pollutants*) de los cuales forman parte el carbono negro (CN), metano (CH_4), el ozono (O_3) y los hidrofluorocarbonos (HFC's), los cuales son de origen antropogénico (OMS, 2019).

El reciente incremento en la tasa de producción de estos gases se debe en gran medida a las actividades antropogénicas del último siglo, tales como lo son el crecimiento poblacional, cambio de uso de suelo, actividades industriales y quema de combustibles fósiles principalmente; en las cuales se emiten diversos contaminantes como el metano, dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno, etc. Han generado cambios fisicoquímicos en la atmósfera siendo el más conocido e impactante el que sufre el efecto invernadero, generando un incremento en las temperaturas globales también conocido como "calentamiento global" (Castilla, 2015).

Estudios recientes no solamente identifican al grupo de los GEI con estas propiedades, sino que un grupo más de contaminantes es agregado, en el cual entran las partículas en suspensión como lo son las partículas suspendidas $PM_{2.5}$ las cuales dentro de su composición destacan las partículas carbonáceas como el carbono elemental (CE), carbono café ($C_{café}$) y el carbono negro (CN) entre otros, los cuales son capaces de absorber la energía calorífica ocasionando un incremento en la temperatura (Orru, Ebi, & B., 2017).

Dióxido de carbono (CO_2)

El Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC), *por sus siglas en inglés* lo describe como un gas de origen natural o antropogénico producto de la combustión de combustibles fósiles o la quema de biomasa, es considerado como el principal gas de efecto invernadero al afectar el equilibrio radiativo de la Tierra (IPCC, 2018).

Las principales fuentes naturales de emisión son los procesos de respiración y fotosintéticos de los organismos vivos quienes realizan un intercambio gaseoso de O_2 por CO_2 , seguido por los incendios forestales, mientras que las fuentes antropogénicas radican principalmente en procesos de urbanización y comunicación como lo es el cambio de uso de suelo, la deforestación, incendios provocados y por actividades de producción e industriales que utilizan combustibles fósiles, de las cuales destacan los complejos industriales, industria cementera, industria química y metalúrgica (PRTR, 2017).

Metano (CH_4)

Es el hidrocarburo saturado de cade más corta que existe y es el componente principal del gas natural asociado a todos los combustibles con hidrocarburos.

Sus fuentes naturales son la descomposición anaerobia de la materia orgánica, la fermentación entérica de los animales. Mientras que sus fuentes de origen antropogénico radican principalmente en las actividades productivas como en la agricultura y ganadería

principalmente, así como en la producción, distribución y utilización de hidrocarburos, principalmente gas natural y petróleo (PRTR, 2017)

Óxido nitroso (N₂O)

Es un gas volátil, considerado como uno de los gases de efecto invernadero, cuyas emisiones se dan de manera natural mediante procesos biológicos del suelo y el océano, desnitrificación del estiércol en suelos y emisiones volcánicas; de manera antropogénica mediante la volatilización y escorrentía de fertilizantes nitrogenados, descomposición de los residuos de los cultivos utilizados en la agricultura intensiva, quema de combustibles fósiles y la deforestación (González-Estrada & Camacho, 2017).

Gases Fluorados (CFC)

También conocidos como “Halocarbonos”, es un grupo de compuestos halogenados que incluye a los clorofluorocarbonos (CFC), hidroclorofluorocarbonos (HCFC), hidrofluorocarbonos (HFC), halones, cloruro de metilo y bromuro de metilo.

Estos gases son de origen antropogénico, usados ampliamente como refrigerantes, aislantes y disolventes. Fue en el año de 1974 que se encontró que las moléculas de estos gases pueden perdurar varias décadas en la atmósfera, principalmente en la estratósfera, que es la capa de atmósfera donde se lleva a cabo el proceso de ozonogénesis y es aquí donde mediante un proceso de disociación fotolítica los CFC liberan cloro atómico el cual reacciona con el ozono, al actuar como catalizador, descomponiendo hasta 100'000 moléculas de ozono (Molina & Rowland, 1974); (EPA, 2001).

Carbono Negro (CN)

Con el continuo crecimiento de la civilización humana y las actividades industriales, agroindustriales, de construcción y el uso de combustibles fósiles que estas ameritan se generan múltiples emisiones de diversos contaminantes que afectan la calidad del aire;

modificando la composición química de la atmosfera, el clima y otras que ponen en riesgo la salud de las poblaciones que habitan en la zona, uno de estos compuestos son los denominados aerosoles carbonáceos (carbono elemental “CE”, carbono negro “CN” y carbono orgánico “C_{org}”) (Kolhe, Aher, Ralegankar, & Safai, 2018).

El carbono negro es una clase química heterogénea de compuestos de carbón producido por la combustión incompleta de biomasa y combustibles fósiles (Zhan, Wan, & Han, 2019), también es definido como parte de los aerosoles carbonáceos que absorben la luz (Lack, Moosmüller, & McMeeking, 2014) especialmente a 880 nm es refractario con una temperatura de vaporización cerca de 4000 K, es insoluble en agua y disolventes orgánicos y en la atmósfera se encuentra en forma de agregados (Bond, y otros, 2013).

El CN es considerado de suma importancia debido a los múltiples efectos que ocasiona al ambiente, a la atmosfera y a la salud humana; dentro de los cuales destacan su capacidad para producir un reforzamiento radiativo positivo al absorber la radiación de la luz visible causando un incremento en la temperatura de la atmósfera, modificar las propiedades de las nubes, disminuir el albedo de la nieve, por lo que se le considera como el segundo agente antropogénico más importante después del CO₂ para el cambio climático (Bond, y otros, 2013) y en cuanto a efectos a la salud al encontrarse dentro de las PM_{2.5} y PM₁ comparte efectos similares causados por el tamaño de las partículas al llegar hasta la región alveolar, donde puede acumularse en el organismo (Suarez, Torres, Helmig, & Hueber, 2017).

Diversos estudios epidemiológicos se han realizado, los cuales muestran que la concentración de CN presente en la atmosfera se encuentra relacionada con la incidencia de morbilidad por enfermedades cardiovasculares, respiratorias y daños adversos en el sistema nervioso. Estos padecimientos son generados debido a la toxicocinética del CN el cual cuando ingresa al organismo activa la respuesta inflamatoria en el organismo y a su vez induce un estrés oxidativo a nivel celular y lipoperoxidación, esto debido a que la fracción orgánica absorbida en la superficie de las partículas de CN, se encuentran más compuestos orgánicos como pueden ser los HAP's, los cuales pueden desencadenar en mutaciones de los genes (Bollinger, 2008), (OMS, 2012), (Gong, y otros, 2019).

Tabla 1. Características de los GyCEI

GYCEI	Fuentes de emisión antropogénicas	Duración en la atmósfera	CO₂ equivalente	Alcance e impactos
CO₂	Urbanización, industria, quema de combustibles fósiles	5 – 200 años	1	Local, regional y global
CH₄	Agricultura, ganadería y quema de combustibles fósiles	12 años	25	Regional y global
N₂O	Agricultura intensiva, quema de combustibles fósiles	100 años	298	Regional y global
CFCs	Sistemas de aire acondicionado, aerosoles y otros productos químicos	45 – 200 años	124 – 14,800	Global
CN	Quema de combustibles fósiles y tráfico vehicular	1 – 5 días	2,200	Local y regional

(IPCC, 2019) (Lund, y otros, 2018) (Bachmann, 2009) (PRTR, 2020)

1.1.2.2 Compuestos Tóxicos

Son el conjunto de sustancias en forma de gas o de partículas presentes en el aire, los cuales presentan características de persistencia y/o toxicidad, que pueden ocasionar algún daño al ambiente o a la salud humana con efectos agudos o crónicos.

Dentro de esta clasificación los de mayor importancia son los que pueden ocasionar afectaciones a nivel sistémico (nervioso, inmune, respiratorio, etc.), que afecten el desarrollo

fetal (malformaciones) y que pueden ocasionar algún tipo de cáncer (EPA, 2016), (COFEPRIS, 2017).

Los principales contaminantes tóxicos presentes en la atmósfera son:

- Compuestos Orgánicos Volátiles (COV's).
- Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP's): Benzo(a)pireno.
- Compuestos orgánicos persistentes (COP's): Dioxinas, furanos y plaguicidas.
- Metales Pesados: mercurio, vanadio, arsénico, manganeso, níquel, cromo, cobre, cadmio y plomo.

1.1.2.3 Contaminantes Criterio (CAC)

En esta clasificación se agrupan los contaminantes atmosféricos que son liberados en grandes cantidades (miles de toneladas al año) y que provienen de una gran variedad de fuentes, dichos contaminantes cuentan con la capacidad de representar un riesgo a la salud humana y debido a estas cualidades se encuentran normados y/o regulados por distintos organismos nacionales e internacionales, los cuales, mediante la información toxicológica, epidemiológica y cuantificaciones decretan los límites máximos permisibles de las concentraciones de estos contaminantes en el aire de las ciudades, con el fin de proteger la salud de sus habitantes (García-Reynoso, Grutter, & Cintora, 2007).

Actualmente, se consideran como contaminantes prioritarios o criterio las partículas suspendidas (PM₁₀ y PM_{2.5}), dióxido de azufre (SO₂), dióxido de nitrógeno (NO₂), monóxido de carbono (CO), ozono (O₃) y plomo (Pb), dichos contaminantes se encuentran normados en México (COFEPRIS, 2017).

Tabla 2. Normativa mexicana para contaminantes atmosféricos criterio.

Valores Límite permisibles de contaminantes atmosféricos criterio en México					
CAC	Norma	Promedio 24 h	Promedio anual	Promedio 8 h	Promedio trimestral
PM ₁₀	NOM-025-SSA1-2014	75 µg/m ³	40 µg/m ³	-	-
PM _{2.5}	NOM-025-SSA1-2014	45 µg/m ³	12 µg/m ³	-	-
SO ₂	NOM-022-SSA1-2010	0.110 ppm	-	0.200 ppm	-
NO ₂	NOM-023-SSA1-1993	0.210 ppm	-	-	-
O ₃	NOM-020-SSA1-2014	0.095 ppm	-	0.070 ppm	-
CO	NOM-021-SSA1-1993	-	-	11 ppm	-
Pb	NOM-026-SSA1-1993	-	-	-	1.5 µg/m ³

Estas normas tienen como objetivo establecer los valores límite permisibles de concentración de estos contaminantes en el aire ambiente y sus criterios de evaluación, con la finalidad de proteger la salud de la población. Dichos efectos son variados por lo que se resumen en la tabla 3 para cada contaminante en cuestión.

Tabla 3. Efectos a la salud por los contaminantes criterio.

Contaminante	Efectos a la salud humana
<p>Partículas suspendidas (PM₁₀ y PM_{2.5})</p>	<p>PM₁₀: Las partículas de este tamaño no logran atravesar los alveolos, quedando retenidos en las mucosas donde aún pueden agravar casos de asma, bronquitis, EPOC, catarros e infecciones respiratorias (Riojas, 2017).</p>
	<p>PM_{2.5}: Las partículas de este tamaño pueden penetrar y depositarse en la región bronquial secundaria y terminal, donde causan los efectos que ocasionan las PM₁₀, además de aumentan la morbilidad y mortalidad por cardiopatías, neumopatías y cáncer (OMS, 2017).</p>
<p>Dióxido de azufre (SO₂)</p>	<p>En exposiciones agudas además de la irritación, puede causar bronquitis, reacciones asmáticas, shock respiratorio y congestiones bronquiales en personas asmáticas; estos efectos se ven incrementados cuando el SO₂ se combina con otras partículas principalmente PM₁₀ y/o humedad en el aire (PRTR, 2017). A su vez distintos estudios demuestran que la exposición a SO₂ está relacionada con la infertilidad masculina, un incremento en el número de ingresos hospitalarios por afecciones cardiopulmonares y en la mortalidad relacionada con la reducción de la función pulmonar, asma, enfisema pulmonar y bronquitis (Gwimbi, 2017).</p>
<p>Dióxido de nitrógeno (NO₂)</p>	<p>Ingresa al organismo a través del sistema respiratorio donde se absorbe de un 80-90 %, una vez que ingreso al organismo reacciona con el agua presente en las vías respiratorias, formando ácido nítrico y nitroso, los cuales ocasionan una irritación generalizada en el tracto respiratorio. En exposiciones agudas se ha encontrado que produce una disminución en los niveles de hemoglobina, leucocitos y eritrocitos, siendo más susceptibles a efectos adversos personas asmáticas, con bronquitis y EPOC, lo cual está relacionado a su capacidad de alterar la respuesta inflamatoria del organismo (INSST,</p>

	<p>2018). En exposiciones crónicas se han encontrado evidencias de que este tipo de exposición en niños con asma aumentan los efectos y síntomas generados por la bronquitis y a su vez aumenta el riesgo y los efectos ocasionados por la mezcla de contaminantes atmosféricos (OMS, 2005).</p>
<p>Ozono (O₃)</p>	<p>La exposición a ozono se encuentra relacionada a diversos efectos en la salud humana en función a la concentración en el ambiente debido a sus propiedades de ser un gas potencialmente irritante y altamente oxidante, lo que ocasiona daños como irritación en el tracto respiratorio, a nivel celular ocasionando un incremento de radicales libres y peroxidación lipídica; siendo el sistema respiratorio y cardiovascular los más afectados al ocasionar un incremento en la morbilidad por enfermedades respiratorias, inflamación de las vías aéreas, disminución de la función pulmonar y exacerbación de cuadros asmáticos y un incremento en la mortalidad por cardiopatías y enfermedades cerebrovasculares (NOM-020-SSA1-2014, 2014). De esta manera se atribuyen los efectos morbilidad y mortalidad a las exposiciones agudas, mientras que, para exposiciones crónicas, se encuentre una asociación con mortalidad prematura por afecciones respiratorias en adultos (Silva, 2016).</p>
<p>Monóxido de carbono (CO)</p>	<p>Ingresa al organismo mediante la vía inhalatoria, una vez en el organismo el monóxido de carbono ingresa al torrente sanguíneo donde compete con el oxígeno y es gracias a la afinidad que presenta con la hemoglobina, impidiendo que el oxígeno se adhiera a los glóbulos rojos y sea distribuido por el organismo, lo cual genera daños por hipoxia. En exposiciones a bajas concentraciones el CO puede ocasionar cefalea y fatiga. En exposiciones crónicas el CO ocasiona sintomatología similar a la gripe, náuseas, mareos, falta de memoria y coordinación, dificultad para el aprendizaje, así como</p>

	<p>trastornos sensoriales y motores (EPA, 2017), (NOM-021-SSA1-1993, 1994).</p>
<p>Plomo (Pb)</p>	<p>Mediante la vía de absorción aérea, se puede absorber hasta un 40 % del plomo siendo una de las principales vías de absorción junto con la digestiva que puede ser de hasta 50 % en niños. Una vez absorbido el plomo, este se distribuye en la sangre, donde permanece hasta 35 días, es mediante la sangre que se distribuye a huesos y tejidos blandos (hígado, riñones, médula ósea y SNC) donde puede almacenarse desde 40 días hasta 27 años en el caso de los huesos. El Pb interfiere con el metabolismo de calcio, hierro y la vitamina D. Cuando la exposición es crónica, el plomo suele depositarse en forma de fosfato de plomo insoluble en los huesos más largos (Rodríguez-Rey, Cuéllar-Luna, Maldonado-Cantillo, & Suardiaz-Espinosa, 2016).</p> <p>Dentro de las principales afectaciones la salud se da en niños, donde se ha establecido que ocasiona daños importantes al SNC que van desde una disminución de coeficiente intelectual, un menor rendimiento académico, un aumento en la incidencia de trastornos relacionados con la atención y comportamiento. A su vez es un fuerte disruptor endócrino y disminuye la función renal, siendo estos efectos más graves en niños que presenten anemia (Téllez-Rojo, 2017).</p>

1.2 Escenario internacional de la contaminación atmosférica

La contaminación atmosférica es un problema de escala global, debido a que no existe ningún país se encuentra exento de esta problemática, pues tanto países en vías de desarrollo como países desarrollados padecen este problema debido a que todas las actividades esenciales que engloba la civilización y la cultura actual emiten estos contaminantes (transporte, uso de combustibles fósiles, actividades agrícolas y ganaderas, producción industrial, minería, metalurgia, transporte, etc.) (Amable, y otros, 2017). Pero algo igual de importante es que los contaminantes atmosféricos no conocen fronteras, pues pueden ser emitidos en un país y llegar a impactar en otro incluso otro continente como lo es el caso del aporte de PM10 y PM2.5 en California, E.U.A, por aporte de tormentas de arena del desierto de Gobi así como la celebración del año nuevo chino (Ngo, Bao, & Zhong, 2018) o como hasta el 29 % del plomo registrado en San Francisco, E.U.A, tiene procedencia de Asia (Ewing, Christensen, Vancuren, Cliff, & Depaolo, 2010). Según estimaciones otro tipo de fuentes como los incendios forestales y aquellos que son provocados o utilizados en la agricultura, contribuyen ente un 40 y un 50 % de las partículas suspendidas clasificadas como partículas finas y de las partículas carbonáceas presentes en la atmósfera (Fox & Riebau, 2013).

Lo alarmante de la contaminación es que puede alcanzar a impactar no solo la zona cercana a las fuentes de emisión, sino que existen contaminantes con un alcance global, ejemplo de esto son los límites planetarios propuestos por Rockström, los cuales son un listado de 9 situaciones límite y cruciales para el planeta, los cuales si son rebasados ponen en riesgo la salud de los ecosistemas y poblaciones, de este listado son 3 los más importantes en cuestión de la contaminación atmosférica (Cambio climático, Carga por aerosoles atmosféricos y Contaminación química). El estatus actual a nivel mundial para estos 3 límites es desfavorable, pues desde el año 2009 el límite para el cambio climático fue rebasado, mientras que los otros 2 no han sido determinados (Rockström, y otros, 2009), por ello la importancia de las mediciones de estos compuestos en la ciudad de San Luis Potosí, ya que la medición de estos 2 límites es a un nivel local, por lo que medidas y políticas han sido implementadas por diferentes países con el fin de mejorar la situación actual y tener un mejor control de sus emisiones (Zhang, y otros, 2017), ejemplo de esto son Distintos acuerdos y

leyes nacionales e internacionales han sido acatados, aplicados y ratificados con la finalidad de garantizar un adecuado desarrollo de la población, dentro de los cuales uno de los que mayor implicación tienen y en los cuales se apoya esta investigación son: Los Objetivos del Desarrollo Sostenible.

1.3.1 Objetivos del Desarrollo Sostenible

Son un listado de 17 objetivos que adoptaron los Estados Miembros desde el 2015 con la finalidad de poner fin a la pobreza, proteger el planeta y garantizar paz y prosperidad para el año 2030, contemplando un desarrollo equilibrado entre la sostenibilidad ambiental, económica y social.

De este listado y partiendo desde los objetivos 3 (Salud y bienestar), 7 (Energía asequible y no contaminante) y 13 (Acción por el clima) se refuerza la importancia de caracterizar a las partículas suspendidas, debido a las múltiples implicaciones que logran generar (PNUD, 2020).

- Salud y bienestar: El conocer las concentraciones de los contaminantes del aire, permitirá tomar mejores medidas de control y prevención de estos.
 - cada 2 segundos una persona muere prematuramente a causa de enfermedades no transmisibles (cardiovasculares, respiratorias, diabetes o cáncer).
 - 7 millones de personas mueren al año a causa de respirar aire contaminado.

- Energía asequible y no contaminante: El uso ineficiente de combustibles y la falta de acceso a tecnologías y combustibles más "limpios", inclina a las personas a seguir utilizando combustibles, los cuales pueden emitir una gran cantidad de compuestos que afectan el clima y su salud. Por lo que mejorando la calidad de las tecnologías y/o sus combustibles es fundamental para mitigar los impactos negativos por estas prácticas.
 - La producción de energía representa hasta un 60 % de emisiones de compuestos de efecto invernadero.

- 40 % de la población mundial (3'000 millones de personas) dependen de combustibles contaminantes para cocinar.
- Acción por el clima: Un monitoreo de compuestos de efecto invernadero como lo es el CN permitirá implementar y mantener mejores medidas y políticas enfocadas en la reducción de estos compuestos.
 - Se propuso una reducción de 45 % en las emisiones de CO₂ para el año 2030.
 - Los desastres ocasionados por el cambio climático causan daños por cientos de miles de millones de dólares.

1.3.2 Normativa Internacional

Para poder acatar estas recomendaciones y alcanzar los objetivos, los países desde su autonomía dictan normativas que aplican en sus territorios para establecer límites para el contaminantes criterio.

Tabla 4. Normativa internacional para contaminantes atmosféricos criterio.

CAC	País	Ley o Norma	Valor límite permisible 24 h	Valor límite permisible anual	Referencia
PM ₁₀	Internacional	OMS	50 µg/m ³	20 µg/m ³	(OMS, 2005)
	E.U.A.	NAAQS	150 µg/m ³	-	(EPA, 2017)
	Unión Europea	Directiva sobre la calidad del aire ambiente	50 µg/m ³	40 µg/m ³	(Tribunal de Cuentas Europeo, 2018)
PM _{2.5}	Internacional	OMS	25 µg/m ³	10 µg/m ³	(OMS, 2005)
	E.U.A.	NAAQS	35 µg/m ³	12 µg/m ³	(EPA, 2017)

	Unión Europea	Directiva sobre la calidad del aire ambiente	-	25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	(Tribunal de Cuentas Europeo, 2018)
SO ₂	Internacional	OMS	20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	-	(OMS, 2005)
	E.U.A.	NAAQS	75 ppb (1h)	-	(EPA, 2017)
	Unión Europea	Directiva sobre la calidad del aire ambiente	125 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	-	(Tribunal de Cuentas Europeo, 2018)
NO ₂	Internacional	OMS	200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	(OMS, 2005)
	E.U.A.	NAAQS	-	53 ppb	(EPA, 2017)
	Unión Europea	Directiva sobre la calidad del aire ambiente	-	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	(Tribunal de Cuentas Europeo, 2018)
O ₃	Internacional	OMS	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (8 h)	-	(OMS, 2005)
	E.U.A.	NAAQS	0.07 ppm (8 h)	-	(EPA, 2017)
	Unión Europea	Directiva sobre la calidad del aire ambiente	120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (8 h)	-	(Tribunal de Cuentas Europeo, 2018)
PB	E.U.A.	NAAQS	-	0.15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (3 meses)	(EPA, 2017)
	España	Real Decreto 102/2011	-	0.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	(Tribunal de Cuentas Europeo, 2018)

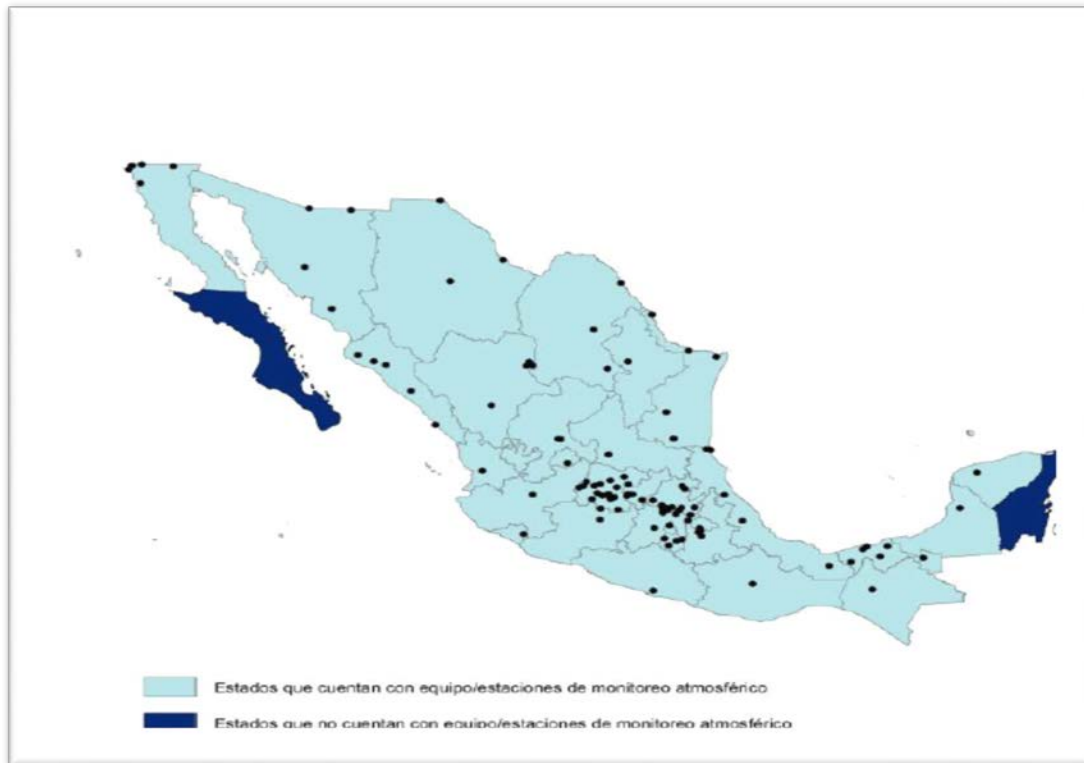
Los valores límite permisibles son diferentes en cada país en función a sus propias características y posibilidades para el monitoreo y control de las fuentes, así como en el enfoque y prioridad que estos desde su autonomía decidan ejercer, con la finalidad de llegar a los niveles pactados en acuerdos internacionales que ratifican.

1.4 Escenario nacional de la contaminación atmosférica

En México se utiliza como herramienta fundamental para poder gestionar la calidad del aire el inventario nacional de emisiones, el cual puede ser de contaminantes criterio o de gases y compuestos de efecto invernadero, mediante el cual se logran estimar las emisiones de estos contaminantes que son emitidos por las diversas fuentes antropogénicas y aquellas que son naturales en todo el país (SEMARNAT, 2019).

Otra forma con la que se cuenta y se considera de mayor precisión puesto que pasa de hacer estimaciones, para hacer mediciones son los sistemas de monitoreo de la calidad del aire, los cuales se enfocan en la medición de determinados contaminantes atmosféricos criterio en ciudades o zonas metropolitanas.

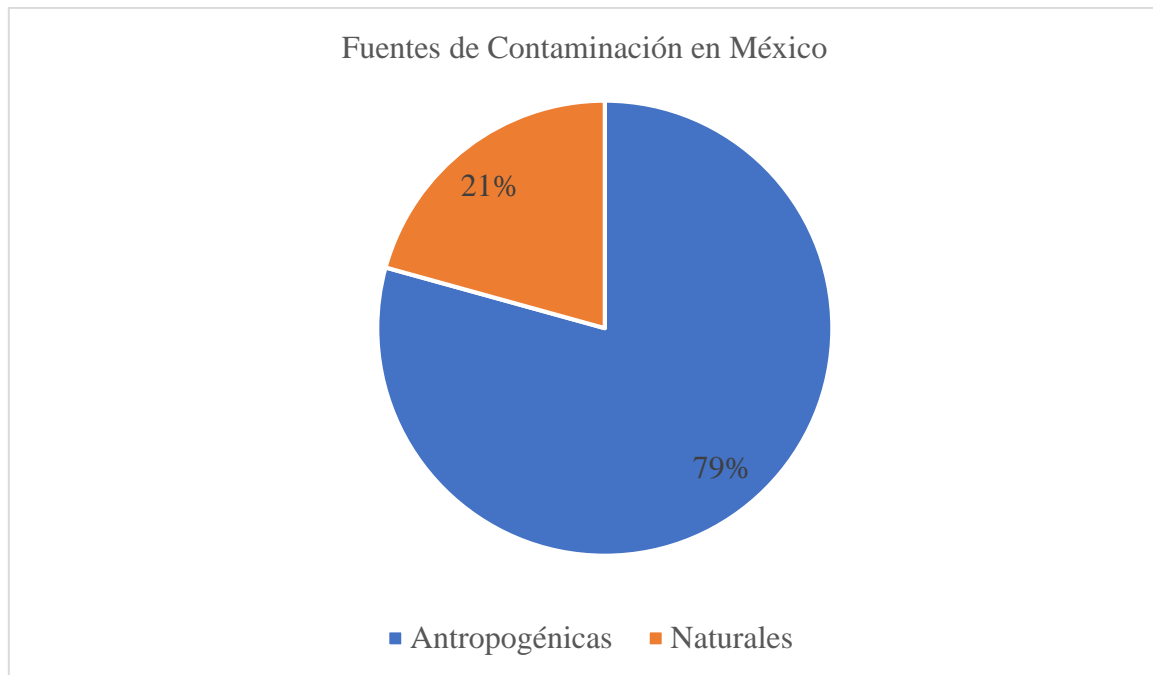
Figura 1. Ciudades y zonas metropolitanas de México con monitoreo de la calidad del aire en 2016.



(SEMARNAT, 2017)

1.4.1 Fuentes naturales y antropogénicas

Durante el año 2013, la SEMARNAT reportó el aporte las fuentes antropogénicas y naturales para la contaminación atmosférica en el país (SEMARNAT, 2013).



Dentro de las fuentes naturales se engloban aquellas emisiones producto de la emisión directa de algún proceso biológico natural o directamente de alguna de las siguientes fuentes de emisión: volcanes, océanos, plantas, suspensión de suelos, emisiones por digestión anaerobia y aerobia, las cuales pueden clasificarse por el tipo de emisión que representan (INECC, 2007); (SEMARNAT, 2019):

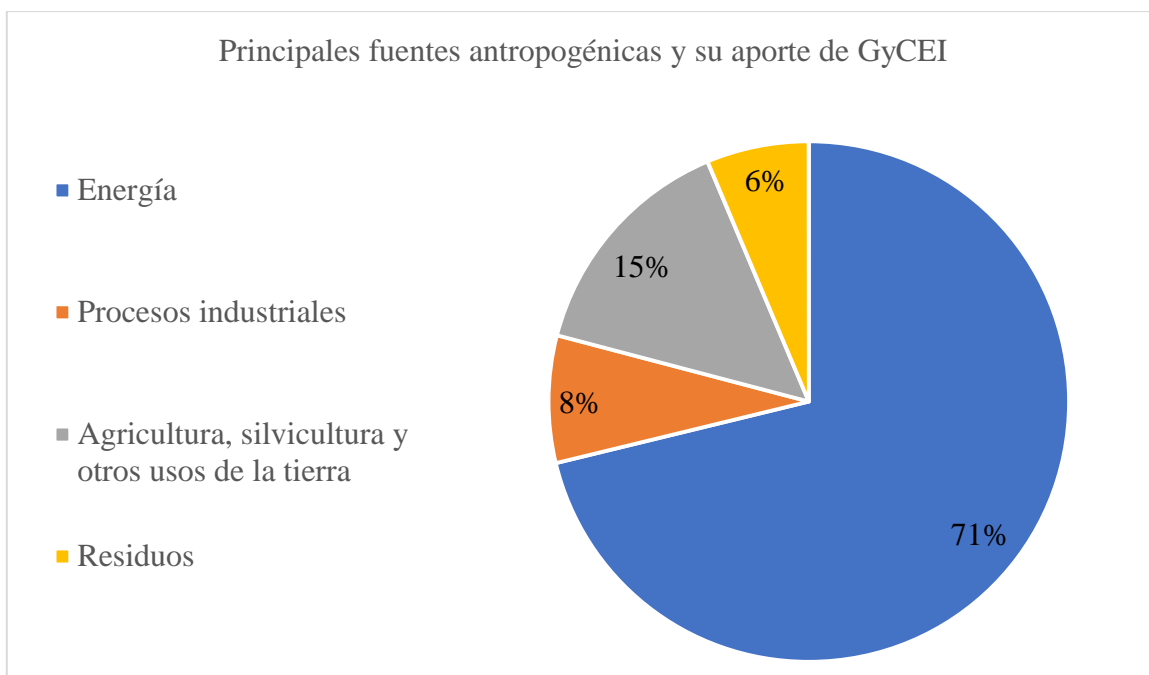
- Emisiones biogénicas: Para estas emisiones las fuentes principales son la vegetación, la cual emite contaminantes como lo son los hidrocarburos, compuestos orgánicos volátiles (COV's), hidrocarburos no metánicos. La actividad microbiana en suelos y océanos.
- Emisiones de los suelos: La fuente será el suelo y sus procesos derivados de la interacción con organismos y el ambiente, generando principalmente la formación de

polvos, resuspensión de suelo y de los contaminantes que pueda contener como el óxido nitroso (N₂O).

- Erosión eólica: Es un fenómeno natural pero que se asocia en mayor medida en suelos con algún tipo de perturbación.

Para las fuentes derivadas de todo proceso involucrado a la actividad humana o también llamadas fuentes antropogénicas son aquellas derivadas de la generación de energía, actividades industriales, emisiones derivadas de combustibles e incluyen a las denominadas fuentes móviles (medios de transporte).

Según datos del Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero 2017, se estimó la cantidad de contaminantes emitidos (CO₂, CH₄, N₂O, HFC's y CN) expresadas en emisiones netas en giga gramos de CO₂ equivalente procedentes de las principales fuentes antropogénicas (INECC, 2017).



1.4.2 Normativa nacional

Como se expresó en la tabla 2 existen diferentes normas oficiales, una para cada uno de los contaminantes atmosféricos criterio normados en el país, enfocadas en establecer los valores límite permisibles, de este modo existen otras normas, las cuales detallan la metodología para su muestreo, colecta, manejo e interpretación de datos; de igual modo estipulan los valores límite permisibles para estos.

Tabla 5. Métodos de medición normados para contaminantes criterio en México.

Contaminante	Norma	Método de medición
SO₂	NOM-038-SEMARNAT-1993	Pararrosanilina
CO	NOM-034-SEMARNAT-1993	Absorción infrarroja no dispersiva
NO₂	NOM-037-SEMARNAT-1993	Luminiscencia química
O₃	NOM-036-SEMARNAT-1993	Luminiscencia química
PM₁₀	No existe	Utilizar método equivalente
Pb	No existe	Muestreo de alto volumen / espectrofotometría de absorción atómica

(INECC, 2020)

Aunado a esto recientemente se creó una nueva norma la cual permite comunicar la calidad del aire en función al riesgo asociado a las concentraciones ambientales de los contaminantes criterio la cual establece los rangos del riesgo asociado a salud y la calidad del aire en base a la concentración de los contaminantes en sus respectivos promedios horarios como se muestra en la tabla 3, la cual nace de la obligación por parte del Estado de monitorear la calidad del aire y de comunicar los resultados a la población con la finalidad de que la población pueda utilizar eficazmente la información brindada para tomar medidas protectoras (NOM-172-SEMARNAT-2019, 2019).

Tabla 6. Normativa nacional para obtención y comunicación del Índice de Calidad del Aire y Riesgos a la Salud.

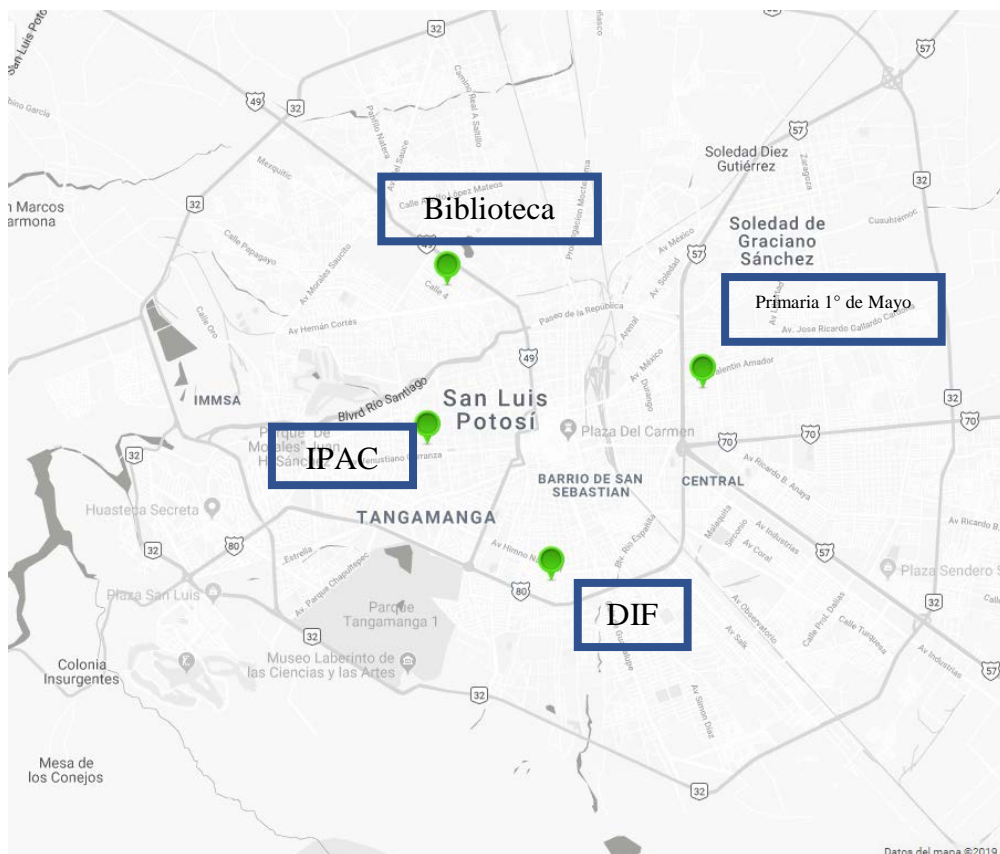
NOM-172-SEMARNAT-2019						
Lineamientos para la obtención y comunicación del índice de calidad del aire y riesgos a la salud.						
CAC	Concentración promedio móvil.	Buena calidad	Calidad aceptable	Mala calidad	Muy mala calidad	Extremadamente mala calidad
		Bajo riesgo	Riesgo moderado	Alto riesgo	Riesgo muy alto	Riesgo extremadamente alto
PM ₁₀ (µg/m ³)	12 h	50	>50 - 75	>75 - 155	>155 - 235	>235
PM _{2.5} (µg/m ³)	12 h	25	>25 - 45	>45 - 79	>79 - 147	>147
O ₃ (PPM)	1 h	0.051	>0.051 - 0.095	>0.095 - 0.135	>0.135 - 0.175	> 0.175
	8 h	0.051	>0.051 - 0.070	>0.070 - 0.092	>0.092 - 0.114	> 0.114
NO ₂ (PPM)	24 h	0.008	>0.008 - 0.110	>0.110 - 0.165	>0.165 - 0.220	> 0.220
CO (PPM)	8 h	8.75	>8.75 - 11	>11 - 13.30	>11.30 - 15.50	>15.50

(NOM-172-SEMARNAT-2019, 2019)

1.5 Escenario local de la contaminación atmosférica en ciudades medianas: Caso de estudio ciudad de San Luis Potosí.

La ciudad de San Luis Potosí cuenta con 4 estaciones de monitoreo atmosférico, las cuales operan intermitentemente desde el año 2006, de entre las cuales la estación Biblioteca es la más reciente y la que ha recibido mayor mantenimiento; dicha estación monitorea los siguientes CAC: PM_{10} , SO_2 y CO ; además de los parámetro meteorológicos como dirección del viento (WD), precipitación pluvial (PP), temperatura (T) y velocidad del viento (WD) (SEGAM, 2015) .

Figura 2. Ubicación de las estaciones de monitoreo atmosférico.



Desde el año 2017 iniciaron las investigaciones de la calidad del aire y contaminantes atmosféricos en la zona NE de San Luis Potosí, dentro de las cuales destacan las campañas de monitoreo de CN, PM₁₀ y PM_{2.5}; así como la caracterización de las fracciones orgánica e inorgánica de PM_{2.5}, obteniendo una reconstrucción de la masa de hasta un 70 %. Algunos resultados de estas investigaciones son (Muñiz, 2018), (Cabrera, 2018), (Barrera, 2019):

1. Durante los meses de mayo a noviembre del año 2017, el 53.6 % de las muestras superaron los límites permisibles propuestos por la OMS y un 7.3 % los presentes en la NOM-025-SSA1-2014.
2. Concentraciones promedio de PM_{2.5} de $29.96 \pm 6.43 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y un valor máximo de $104.20 \pm 20.90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ del periodo de mayo 2017 a abril 2018.
3. Concentración promedio de PM_{2.5} de 33.25 ± 7.00 durante el 2017 y 28.16 ± 6.14 durante el 2018 superando el límite permisible para promedio anual de la NOM-025-SSA1-2014 de $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$.
4. Las fuentes fijas cercanas a la estación de muestreo en dirección E (ladrilleras) contribuyen el 75 % de PM_{2.5} y un 57 % de PM₁₀.
5. En el año 2017, mediante la técnica de fluorescencia de rayos X (XRF), se logró la caracterización elemental con una reconstrucción de la masa, de un 23.84 % de masa reconstruida se encontró que los elementos más abundantes son el Cl, K, Cr, V, Mg y Ni; los que se consideran de aporte antropogénico. Mientras que en el año 2018 con un 24.83 % de masa reconstruida los elementos más abundantes son el Mg, Al, Si y P; asociados a un origen natural.
6. Las concentraciones de Mn, Ni superan las propuestas por la OMS y la UE para proteger la salud de la población.
7. Se cuantificó el carbono total (TC), el cual es la suma del carbono orgánico (OC) y el elemental (EC).
8. Durante los años de 2018 a 2019 se obtuvieron un total de 90 muestras, con las cuales se identificó una reconstrucción de la masa gravimétrica de PM_{2.5}, de 44 % de la masa, la cual es atribuible al carbono total (TC).

9. Un 70 % de la masa de $PM_{2.5}$ es atribuible al TC y los elementos detectados (Mg a Zn), dejando un 30 % restante para partículas biogénicas, iones y elementos pesados no detectados por la técnica de XRF ($Z > 30$) debido al tipo de detector.
10. Se consideran como principales fuentes de PMs la industria metal-mecánica, minera, ladrilleras y tráfico vehicular.

1.6 Partículas Suspendidas

Como se mencionó anteriormente la contaminación atmosférica es consecuencia del efecto de una mezcla de contaminantes, dentro de los cuales resaltan las partículas suspendidas (también llamadas aeropartículas, partículas atmosféricas, aerosoles atmosféricos y el término en inglés *particulate matter*), esto en función a sus afecciones a la salud de las poblaciones humanas, el clima; pero además dentro de las partículas suspendidas se encuentran formadas por una mezcla de compuestos orgánicos e inorgánicos donde pueden incluirse otros contaminantes, es por ello que su definición y clasificación son indispensables para poder enfatizar sobre estos contaminantes según sea la perspectiva en el tema desde donde se abarquen (Wiseman & Zereini, 2011).

1.6.1 Clasificación de las partículas suspendidas (origen y tamaño)

Comúnmente las partículas suspendidas tienen diferentes maneras de clasificación y se utiliza la clasificación que mejor englobe a las partículas desde el punto de vista, desde el cual se esté abordando, siendo el más común la clasificación por el tamaño del diámetro aerodinámico de las partículas; pero las características físico-químicas como volatilidad, morfología, composición química son factores importantes a considerar en otros tipos de clasificación, por ello se explicaran las principales clasificaciones:

Clasificación por Origen:

Debido a la gran diversidad de sus componentes de las partículas suspendidas, existen distintas clasificaciones para estas partículas además de la clasificación por tamaño existe

otra clasificación en función a su origen. La importancia de este tipo de clasificación radica en la gran diversidad y heterogeneidad de las fuentes emisoras como cambian en proporción y presencia según sea el sitio de estudio.

Clasificación por Origen: Se distinguen entre partículas primarias y secundarias (Zhang, y otros, 2018)

- Primarias: Son aquellas partículas que se emiten directamente a la atmósfera por fuentes primarias, tales como lo son la suspensión y resuspensión de polvo, emisiones de autos, fabricas, incendios, etc. Estas fuentes juegan un papel fundamental en la regulación de a nucleación y oxidación de las partículas atmosféricas.
- Secundarias: Son aquellas partículas que se forman en la atmósfera como producto de reacciones químicas entre gases denominados como gases precursores, estos gases se dividen en tres grupos los cuales son gases sulfurosos reducidos, gases básicos e hidrocarburos reactivos (dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, COV's y amoniac) como resultado de las interacciones químicas entre estos gases se dan lugar a productos con baja presión de vapor. Es donde tiene lugar una transferencia de masa desde la fase gaseosa a la condensada, dicho proceso se le conoce como “proceso de conversión de gas a partícula”. Durante este proceso se forman principalmente partículas de sulfatos y nitratos, así como partículas orgánicas derivadas de la oxidación fotoquímica de los compuestos orgánicos e inclusive mediante procesos de absorción y adsorción otros compuestos como lo son los HAP's (Dat & Chang, 2017).

Actualmente es imposible determinar con exactitud la cantidad de partículas emitidas por cada uno de los tipos de fuentes de cada sitio en particular, por lo que durante las últimas décadas se ha optado por métodos que permiten aproximar la cantidad de partículas emitidas a la atmósfera, de los cuales el más ampliamente utilizado son los factores de emisiones específicos de cada fuente, los cuales se basan en datos estadísticos y mediciones directas de las fuentes. Los factores de emisiones consisten en calcular, medir y/o estimar la cantidad de material producido (en este caso en específico las partículas) que se generan durante el consumo de combustible, la producción de una unidad de bienes industriales o por unidad de

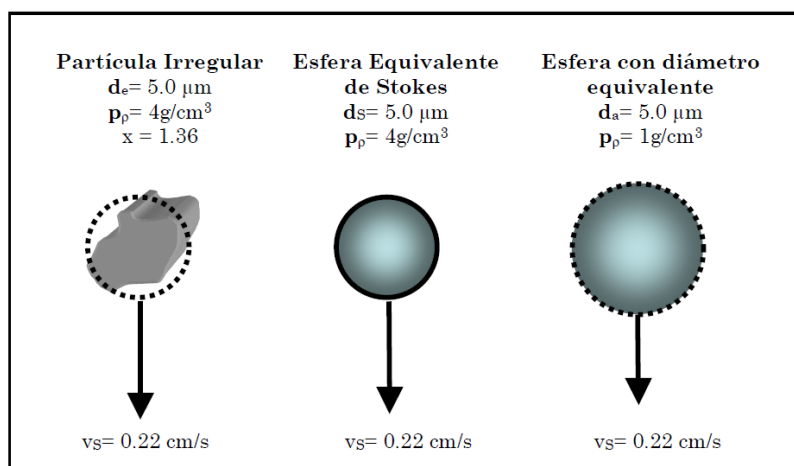
distancia recorrida; dicho método permite reportar esta información mediante inventarios de emisiones, los cuales pueden ser locales, regionales o mundiales.

Clasificación por tamaño:

Los aerosoles como se mencionó presentan diversas formas, tamaños y densidades; los cuales están regulados por procesos físicos como la fuerza de gravedad y los procesos de coagulación por lo que para fines prácticos-comparativos se les han asignado dos estándares que funcionan en base a estos parámetros:

- El diámetro equivalente que es el diámetro que corresponde a una partícula esférica con el mismo volumen que la partícula a estudiar.
- El diámetro aerodinámico equivalente, depende de la densidad de la partícula y se define como el diámetro de una partícula esférica de densidad igual a 1 g/cm^3 que tendría los mismos efectos gravitatorios y velocidad en la atmósfera que la partícula en cuestión.
- El diámetro de difusión corresponde al diámetro de una esfera con el mismo coeficiente de difusión que el de la partícula, bajo las mismas condiciones de presión, temperatura y humedad relativa. Este diámetro se utiliza cuando el diámetro de la partícula es menor a $0.5 \text{ }\mu\text{m}$ y se utiliza en lugar del diámetro aerodinámico.

Figura 3. Diámetro equivalente de las partículas suspendidas, en función a su velocidad de sedimentación.



(Barrera, 2005)

El tamaño de la partícula tiene una relación inversa con el tiempo de residencia atmosférica que posee (Barrera, 2005), (Marino, 2011). Es el tamaño el parámetro más importante en términos de comportamiento y de la distribución en la atmósfera de las partículas suspendidas. Las partículas finas tienen periodos de vida media en la atmósfera de días hasta semanas, viajan hasta cientos de kilómetros, aunque en zonas urbanas tienden a comportarse de manera homogénea. Por su parte las partículas gruesas se depositan con mayor velocidad por lo que presentan mayor variabilidad espacial dentro de una misma región (Rojas, 2003). Debido a las distintas formas que presentan las partículas, es imposible poder caracterizarlas dentro de una sola dimensión geométrica, por lo que se utiliza el diámetro aerodinámico para indicar su tamaño; este diámetro es equivalente al diámetro de una partícula con forma esférica y una densidad unitaria que tiene la misma velocidad terminal que la partícula considerada, independiente de su forma, tamaño o densidad bajo condiciones de temperatura, presión y humedad existentes; por lo que se utiliza la siguiente clasificación:

- Fracción gruesa: Son todas aquellas partículas con un diámetro aerodinámico de entre 2.5 – 10 μm (también denominadas “PM₁₀”). Están compuestas por: sulfatos, nitratos, amonio, Pb, Cd, óxidos de Si, Al, Ti y Fe; carbón orgánico y elemental, dioxinas y macro bacterias, polvos, sal marina, cenizas, carbonato de calcio, sal, polen, esporas e inclusive fragmentos de organismos (piel muerta, fragmentos de plantas, desperdicios etc.). Dichos compuestos provienen de diversos tipos de fuentes, de las cuales las que más aportan este tamaño de partículas son la resuspensión de polvo, tormentas de arena, brisa marina, actividad volcánica, incendios forestales procesos antropogénicos de construcción, demolición y combustión, así como procesos biológicos los cuales provienen de procesos de molienda, abrasión, erosión, suspensión de polvos, evaporación de aerosoles, etc.

Suelen permanecer en la atmósfera solo unas horas, hasta que se precipitan, esto debido a su tamaño por lo que su dispersión es menor, pudiendo transportarse hasta decenas de kilómetros.

- Fracción fina: Son todas aquellas partículas con diámetro aerodinámico menor a 2.5 μm (también denominadas “PM_{2.5}”). Están compuestas por: sulfatos, nitratos,

amonio, dioxinas, macro bacterias iones de sulfato, nitrato e hidrogeno, compuestos carbonáceos (CE, CN, OC), compuestos orgánicos y metales (Pb, Cd, V, Ni, Cu, Zn, Mn, Fe, etc.). Dichos compuestos provienen de diversos tipos de fuentes, de las cuales las que más aportan este tamaño de partículas son las emisiones de procesos metalúrgicos e industriales, la combustión de carbón, aceites, combustibles fósiles y madera, así mismo se pueden crear a partir de la transformación atmosférica de óxidos de azufre y nitrógeno, así como de otros compuestos orgánicos, de manera natural mediante incendios forestales formándose principalmente mediante reacciones químicas y los procesos de nucleación y coagulación (Rojas, 2003).
Suelen permanecer de 2 a 4 días en la atmósfera donde pueden transportarse desde cientos hasta miles de kilómetros.

- Ultrafinas: Son todas aquellas partículas con diámetro aerodinámico menor a $1 \mu\text{m}$ (también denominadas “ PM_1 ”). Este tipo de partículas se forman principalmente en la atmosfera a partir de reacciones químicas mediante gases precursores (dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, COV's y amoniaco) aunque también son emitidas directamente en procesos de combustión a altas temperaturas, por lo que suelen estar compuestas por: compuestos carbonáceos, sulfatos y compuestos metálicos (Cr, Pb, Mn, Ni).

Las partículas ultrafinas pueden permanecen suspendidas por más de 2 semanas y son más afectadas por la meteorología, principalmente por las lluvias. Se pueden transportar desde 0 a decenas de km según eventos meteorológicos. pueden llegar hasta los bronquiolos, conductos alveolares y los alveolos.

A principios de los años 2000 aún varios países utilizaban las partículas suspendidas totales (PST), las cuales son partículas entre los 0.005 y $100 \mu\text{m}$ de diámetro aerodinámico, como indicadores de la calidad del aire, sin embargo, las investigaciones encontraron que la mayoría de las partículas cuentan con un tamaño menor a los $40 \mu\text{m}$ de diámetro aerodinámico. Pero fue gracias a las investigaciones en epidemiología que las partículas PM_{10} podían ser inhaladas y ocasionar efectos en salud; mientras que actualmente la atención se enfatiza en las partículas $\text{PM}_{2.5}$ por ocasionar efectos más relevantes en salud, es por ello que

actualmente las normativas en los diferentes países se enfocan en estos tamaños de partículas, e incluso las investigaciones actualmente están considerando a la fracción ultrafina PM_{10} (SEMARNAT, 2011)

1.6.2. Mecanismo de acción de las partículas suspendidas en el organismo

La contaminación atmosférica por partículas suspendidas es un problema característico de la mayoría de los escenarios y ambientes antropogénicos como son las ciudades, zonas industriales, zonas agrícolas e incluso nuestros espacios más íntimos y seguros como las oficinas, casas, cocinas, etc. Como se mencionó anteriormente sobre la variedad y complejidad en la mezcla dentro de este tipo de contaminante atmosférico, cabe mencionar los efectos en salud son igual de variados para cada grupo dentro de las partículas, los cuales dentro de la misma mezcla puede aumentar o potenciar los efectos en salud, además de la variación para cada zona y cada mezcla propia, es por ello por lo que se describirán los principales efectos en salud humana asociados a estos contaminantes.

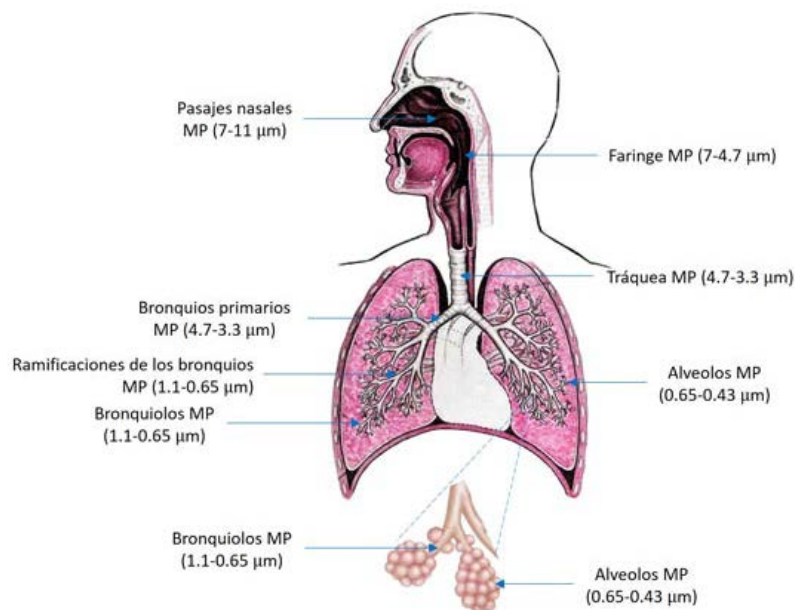
Una vez que ingresan al organismo las partículas suspendidas y según sea su tamaño y/o composición, estas pueden depositarse en distintas partes de las vías respiratorias en donde activan una respuesta inicial de las células epiteliales pulmonares, macrófagos residentes, las cuales desencadenan la activación de genes proinflamatorios y el inicio de reacciones inflamatorias. De estas respuestas algunas de las que se han identificado son (Health Effects Institute, 2002) (Flood-Garibay, Méndez-Rojas, & Pérez-Cortés, 2019):

- Formación directa de especies reactivas del oxígeno (ERO) generando un estrés oxidativo, interacciones con la capa lipídica de las membranas celulares, dañando componentes como el ADN, las proteínas, mitocondrias y los lípidos.
- Otro mecanismo es producto de la inflamación provocada por partículas cristalinas que activan los dominios NACHT (la NTPasa implicada en apoptosis y el complejo de transcripción de multihistocompatibilidad), LRR (repetición rica en leucina) y PYD (dominio de pirin) que contienen las proteínas 3 (NLRP3 o NALP3), lo que lleva al

ensamblaje del inflamasoma: El inflamasoma reconoce los patrones moleculares asociados al peligro y la activación de la caspasa-1, la caspasa-1 rompe las proteínas IL-1beta y pro-IL-18, lo que provoca la secreción de IL-beta y pro-IL-18 en sus formas activas, provocando una respuesta inflamatoria.

- La fracción biogénica de las partículas suspendidas es la de mayor importancia en la respuesta de los macrófagos alveolares y tejido epitelial respiratorio, liberando citocinas y quimiocinas proinflamatorias.
- Otra respuesta del sistema inmunológico es generada cuando las partículas logran ingresar a torrente sanguíneo, provocando la activación de los leucocitos generando inflamación al inducir la fase aguda de respuesta de la proteína C reactiva (PCR) – citosinas y de esa manera aumentar los niveles de fibrinógeno en la sangre, incrementando la formación de coágulos (trombosis) y de esta manera desencadenar padecimientos cardiacos

Figura 4. Penetración de las partículas suspendidas en el organismo humano.



1.6.3 Monitoreo de Partículas suspendidas en ciudades medianas de México

Como se describió con anterioridad, en México existe un sistema de monitoreo de la calidad del aire el cual se encarga de vigilar las concentraciones de los contaminantes criterio. Para el año 2018, se contabilizaron 242 estaciones de monitoreo repartidas en 103 ciudades y zonas metropolitanas en 30 estados. Para el mismo año se realizó un informe con datos de 191 estaciones de monitoreo repartidas en 83 ciudades y zonas metropolitanas en 23 estados. De estas estaciones solamente 163 cuentan con infraestructura para la medición de partículas PM₁₀ y 118 para PM_{2.5} (INECC, 2019).

Como se observa es evidente que las mediciones son a razón de sus necesidades y limitaciones de cada ciudad, es por ello que tomaremos un enfoque en las ciudades denominadas “medianas o intermedias”, las cuales son ciudades con una población de entre 100,000 y 1,000,000 de habitantes y que cuenten con alguna de las siguientes características: con un crecimiento de la población y su espacio urbano, con la capacidad de recibir migrantes de ciudades menores, condiciones para el establecimiento de relaciones dinámicas con el espacio rural que las envuelve, así como el surgimiento de ciertos problemas de las grandes ciudades (Stadel, 2000); (Álvarez, 2011).

Figura 5. Ciudades con monitoreo de calidad del aire en México incluidas en el informe del año 2018.



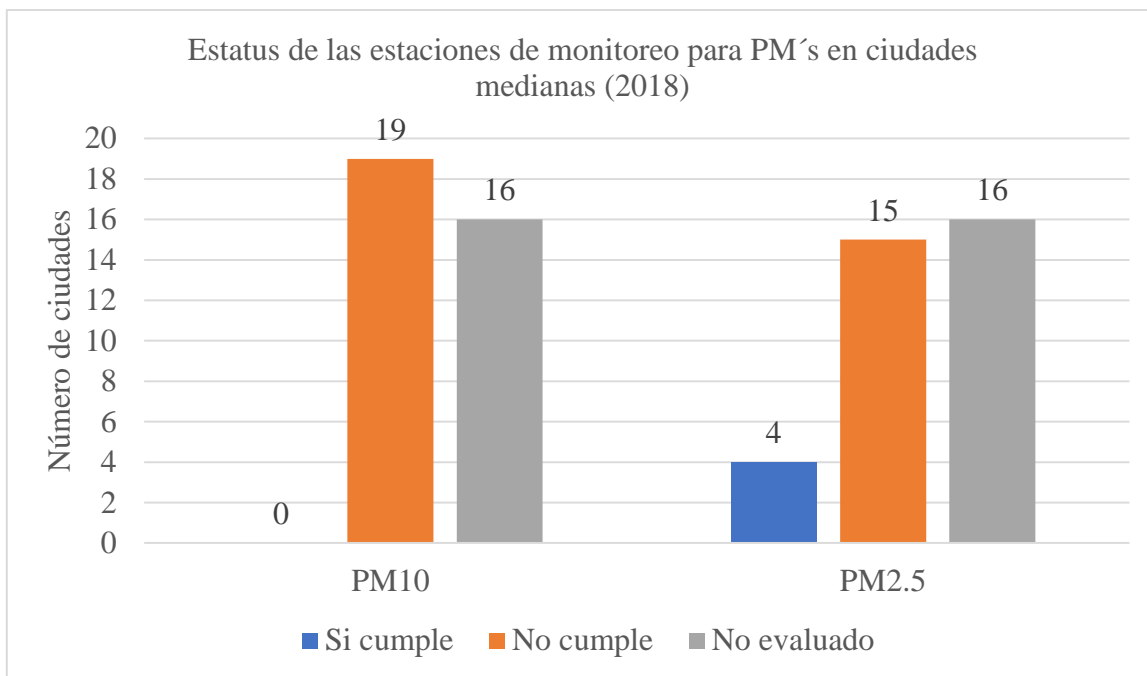
(INECC, 2019)

De las 83 ciudades de las que se cuenta con información, existen 35 consideradas como ciudades medianas y a continuación, se detallan los resultados obtenidos en estas ciudades:

Tabla 7. Estatus de las estaciones de monitoreo de partículas suspendidas en ciudades medianas para el año 2018.

	PM ₁₀	PM _{2.5}
Si cumple normativa		San Miguel de Allende, Corregidora, San Luis de la Paz y Guanajuato
No cumple normativa	Mexicali, Irapuato, Chihuahua, Celaya, Salamanca, Silao, Saltillo, Nogales, Atotonilco, Torreón, Durango, Aguascalientes, Cuernavaca, San Luis Potosí, Tepic, Xalapa, Pachuca, Macuspana y Tulancingo.	Atotonilco de Tula, Aguascalientes, Salamanca, Celaya, Irapuato, Pachuca, Cuernavaca, Durango, Minatitlán, Tepic, Tula de Allende, Tizayuca, Santiago de Querétaro, Xalapa y Poza Rica.
No evaluado	Gómez Palacio, Monclova, Ensenada, Piedras Negras, Comalcalco, Huimanguillo, Poza Rica, Oaxaca, Hermosillo, Cajeme, Morelia, Cuautla, Ocuituco, Dolores Hidalgo, Cunduacán y Minatitlán	Chihuahua, Piedras Negras, Monclova, Saltillo, Ensenada, Torreón, Lerdo, Lolotla, Tulancingo, Cuautla, Hermosillo, Cajeme, San Francisco del Rincón, Morelia, Oaxaca y Mérida.

(INECC, 2019)



El panorama de la contaminación atmosférica por partículas suspendidas en las ciudades mexicanas no es anda alentador pues el 100 % (19) de las que fueron evaluadas cuentan estas cuentan con niveles de contaminación por PM₁₀ superiores a los marcados en la normativa nacional, mientras que un 78.9 % (15) cuentan con niveles de contaminación por PM_{2.5} superiores a los marcados en la normativa nacional. Las ciudades que no fueron evaluadas se debieron a la falta de datos (INECC, 2019).

CAPÍTULO 2. FRACCIÓN CARBONCEA

2.1 Fracciones en las partículas suspendidas

Dentro de las partículas suspendidas existe una mezcla variada de especies químicas, en la cual encontramos una fracción orgánica, llamada preferentemente “fracción carbonácea” compuesta principalmente por: Carbono total (carbono orgánico + carbono elemental ó carbono negro) y otros compuestos con carbono comprendido en la interface gas-partícula, como dioxinas, HAP’s, entre otras). Una fracción inorgánica (metales, iones como ion nitrato (NO_3^-). Ion sulfato (SO_4^{2-} , ion amonio (NH_4^+) y ion cloro (Cl^-), principalmente.) y finalmente una fracción biológica (esporas, bacterias, virus y otros.), las cuales varían según las características del sitio de estudio como factores meteorológicos, densidad poblacional, tránsito vehicular y otras fuentes de emisión locales. Cada uno de estos tóxicos afecta a diferentes partes del organismo de distintas maneras, por lo que pueden producir un aumento o cambio en la toxicidad de las partículas suspendidas combinando y/o potenciando los efectos tóxicos a la salud humana (Hildemann, 1996), (EPA, 2003).

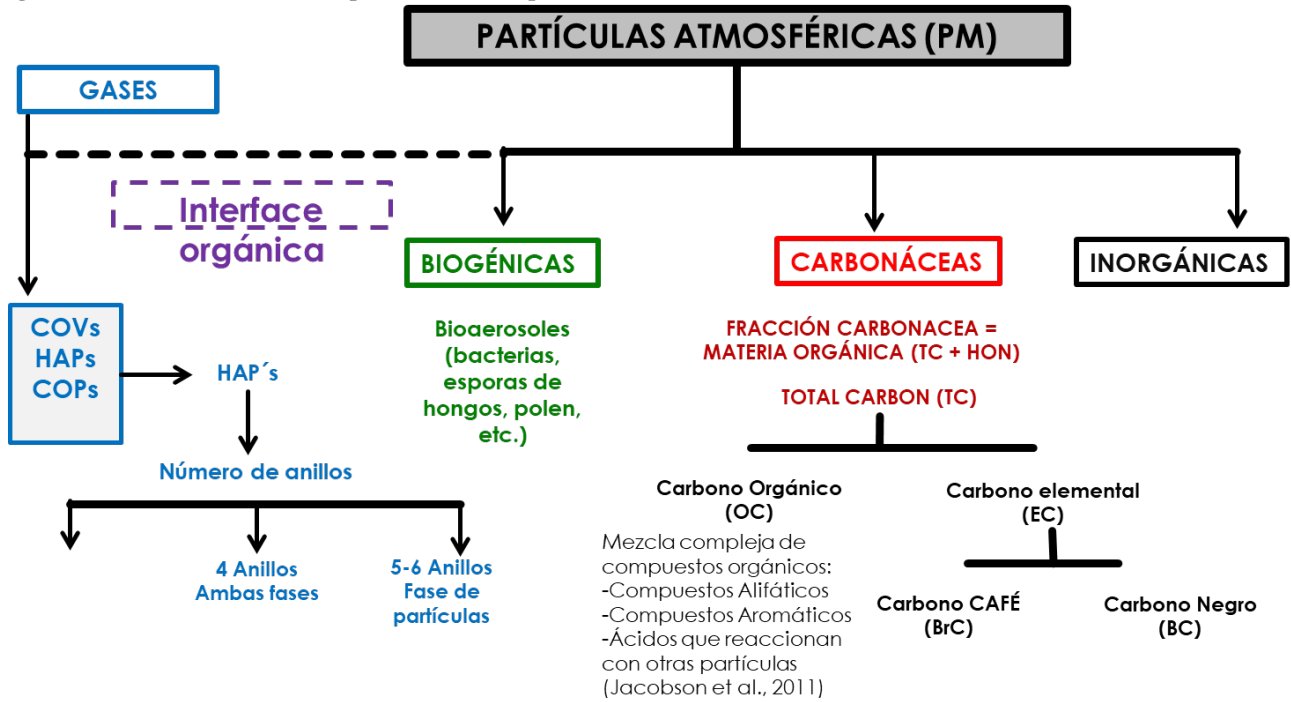
2.2 Partículas carbonáceas

Las partículas carbonáceas son consideradas como la fracción más importante en cuanto a términos de absorción de luz, por lo que son las que tienen un mayor impacto en el clima, absorción de la radiación solar, el calentamiento de la atmósfera, sin mencionar que cuentan con la capacidad de acumular otro tipo de partículas contaminantes en su superficie (Zhao, 2019).

Dentro de las partículas carbonáceas existen diversas clasificaciones en función de la fuente emisora, morfología, composición química y las propiedades ópticas de las partículas, es de esta manera que existen diversos términos y definiciones para las partículas carbonáceas, las cuales evolucionan en función a la mejora de la tecnología en métodos analíticos; dentro de los cuales destacan:

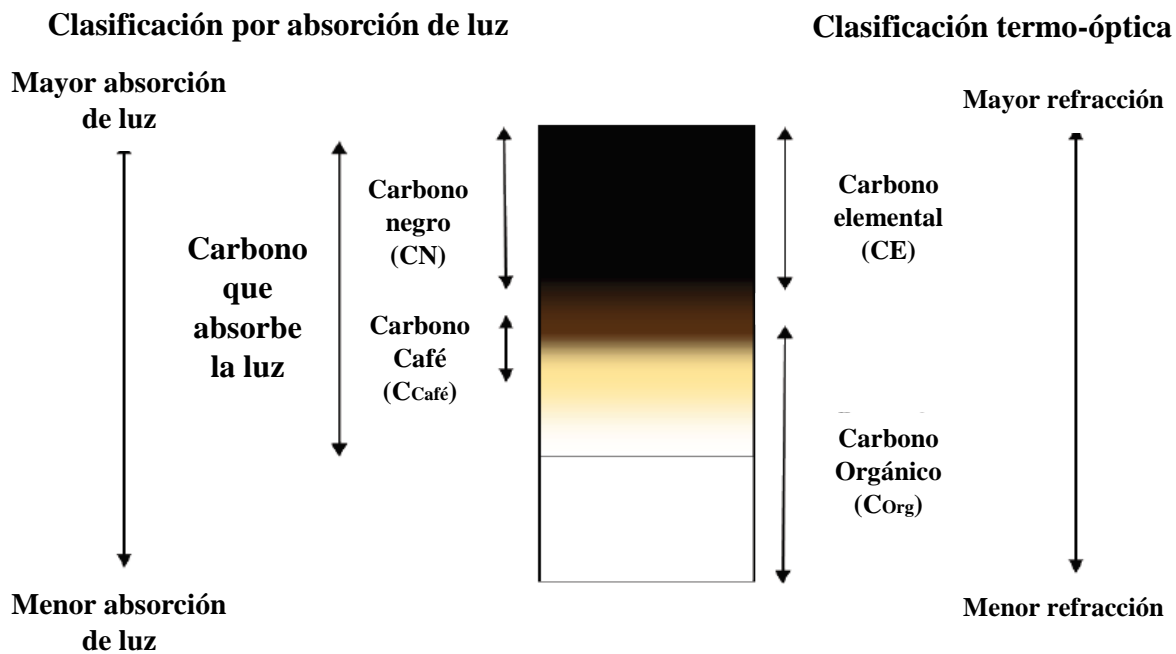
- Hollín (*Soot*): sustancia negra, negruzca o café formada durante la combustión, la cual en la atmósfera se encuentra en forma de partículas denominadas partículas soot o partículas de hollín. Es identificado como una impureza del carbono elemental con una estructura similar al grafito, formado durante la combustión.
- Partícula de hollín (*Soot carbon*): Son partículas de carbono que cuentan con propiedades químicas y morfológicas muy similares a las partículas de hollín provenientes de la combustión y se encuentran constituidas en su mayoría de carbono y una pequeña porción de heteroelementos como hidrogeno y oxígeno. Sin incluir sustancias orgánicas en esta definición.
- Carbono café ($C_{\text{café}}$): Partículas de compuestos orgánicos de carbono que absorbe la luz ultravioleta y visible de la radiación solar. Proviene de diversas fuentes como sustancias ricas de humus, alquitrán de combustión, bioaerosoles, de igual manera se puede formar en la atmósfera (EPA, 2012).
- Carbono elemental (CE): Son partículas muy similares a las de hollín en cuanto a composición, en la mayoría de los casos se hace referencia a la fracción de carbón oxidado en la combustión cercano a cierta temperatura límite en presencia de una atmósfera con oxígeno.
- Carbono negro (CN): Es la forma más pura de carbón que absorbe la radiación solar en todas las longitudes de onda, tiene propiedades ópticas y de composición similares a las partículas de hollín (soot carbon), más adelante se profundizara en su definición.
- Carbono orgánico (C_{org}): Esta fracción de las partículas carbonáceas se caracteriza principalmente porque dispersa la radiación solar. Dentro de las partículas de carbono orgánico encontramos una mezcla compleja de compuestos orgánicos (Chen, 2006). El C_{org} es producto de la combustión incompleta, de la formación de la oxidación de COV's en la atmósfera.

figura 6. Fracciones de las partículas suspendidas



(Barrera, 2019)

Figura 7. Propiedades de las partículas carbonáceas



2.2.1 Carbono Negro (CN)

Es definido como parte de los aerosoles carbonosos que absorben la luz especialmente a 880 nm es refractario con una temperatura de vaporización cerca de 4000 K, es insoluble en agua y disolventes orgánicos y en la atmósfera se encuentra en forma de agregados (Bond 2013). Este es el término que se utiliza con mayor frecuencia debido a que se encuentra bien definido y determinado en la tropósfera, por lo que se menciona este en los inventarios de emisiones, transferencia radiativa y modelos climáticos (Andreae, 2006).

De las partículas carbonáceas, las más importantes, relevantes y de mayor uso por la comunidad científica son el CN y el carbono orgánico, de los cuales este estudio se centrará sobre el carbono negro y su relación con otros contaminantes.

El CN se emite en forma de pequeñas esferas de unos 0.001 – 0.005 μm , las cuales tienden a aglomerarse formando partículas de un mayor tamaño 0.1 - 1 μm de aquí se deriva una de las características de las partículas de CN y su importancia en el clima y la temperatura atmosférica, ya que a este tamaño de las partículas, son similares al tamaño de la longitud de onda emitida por el sol, facilitando que las partículas puedan absorber y dispersar la energía (Díaz, 2016). La composición química del CN varía en función a su proceso y/o fuente de emisión lo que también define sus propiedades químicas, modificando su solubilidad en agua o solventes orgánicos, el cambio en estas propiedades es de vital importancia ya que pueden afectar otros factores de las partículas, tales como la hidrofilia o hidrofobia del CN que modifican su permanencia en la atmósfera.

En comparación con otros contaminantes atmosféricos que alteran la composición química de la atmósfera como los gases de efecto invernadero, su periodo de permanencia en la atmósfera es menor (días-semanas), por lo que se le clasifica un como contaminante de vida corta, esta característica a su vez indica que sus emisiones son puntuales y constantes permitiendo identificar con mayor facilidad sus fuentes, periodos y temporadas de emisión predominantes en determinada región. (EPA, 2012) así mismo siguiendo las recomendaciones del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático

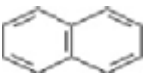
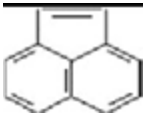
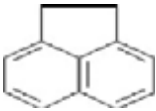

(IPCC) por sus siglas en inglés, señala que una medida importante para combatir a los contaminantes de la atmosfera y sus efectos es el controlar las fuentes de emisión de los contaminantes de vida corta, dentro de los cuales destaca en CN, por lo que las acciones de mitigación en la emisión de este contaminante puede ayudar significativamente en la reducción de los efectos ocasionados en el clima (Peralta, y otros, 2019).

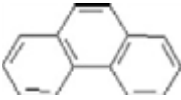
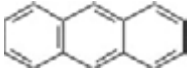
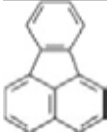
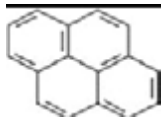
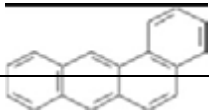
2.2.2 Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP's)

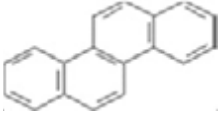
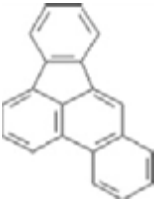
Son un grupo de más de 100 sustancias químicas contenidos en la fracción carbonácea, los cuales están formados por dos o más anillos aromáticos condensados en forma recta, angulados o racimados; los cuales se forman durante la combustión incompleta de materia orgánica como: carbón, petróleo, gasolina, diésel y basura (ATSDR, 2016). Individualmente los HAP's cambian fácilmente de comportamiento como en función de su volatilidad, es decir, algunos cambian de estado en el aire transformándose de partículas a gas muy fácilmente y viceversa, además la mayoría de ellos no se disuelven fácilmente en agua es por esto por lo que su estudio es complicado (Loera, 2016).

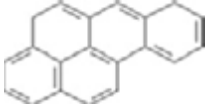
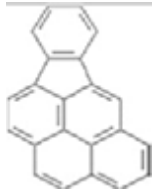

La formación de los HAP's puede ocurrir mediante pirólisis o combustión incompleta de materia orgánica (carbón, aceite, gas, madera, basura, tabaco, carne asada u otras sustancias orgánicas e incluso en el asfalto utilizado en la construcción de caminos). Los HAP's son liberados en estado gaseoso, en forma de vapores, esto es debido a sus bajas presiones de vapor, la mayoría de los HAP's se condensan en el acto sobre partículas de hollín o forman ellos mismos partículas muy pequeñas (Matandrea, y otros, 2005). Una vez en el aire los HAP's se someten a distintos proceso atmosféricos como lo son: el proceso de formación gas-partícula, una distribución por tamaño de partícula, deposición (viajan largas distancias antes de depositarse en suelo o agua superficial), reacciones con otras sustancias (como lo son otros contaminantes como el NO_2 y el O_3 , que reaccionan vía nitración y ozonólisis) y su degradación (Wang, y otros, 2019)

Tabla 8. Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos prioritarios por la EPA.

Hidrocarburo aromático policíclico	Número de anillos	Fuentes de emisión	Referencia	Imagen
Naftaleno	2	Fuentes petrogénicas, quema de madera, tabaco, uso industrial, degradación de materia orgánica.	(PRTR, 2019), (Johnse & Karlson, 2007), (INECC, 2017)	
Acenaftileno	3	Fuentes petrogénicas	(Ortiz, Cram, & Sommer, 2012)	
Acenafteno	3	Fuentes petrogénicas	(Ortiz, Cram, & Sommer, 2012)	
Fluoreno	3	Fuentes petrogénicas	(Johnse & Karlson, 2007)	

Fenantreno	3	Fuentes petrogénicas, quema de vegetación y combustibles ligeros, actividades agrícolas y de transporte	(Johnse & Karlson, 2007), (INECC, 2017)	
Antraceno	3	Motores de gasolina, fuentes pirogénicas	(Vargas, Romero, Palencia, Rivero, & Piñero, 2013)	
Fluoroantraceno	4	Fuentes biogénicas		
Pireno	4	Combustión incompleta, emisiones diésel, quema de vegetación y combustibles ligeros, actividades agrícolas y de transporte	(Quijano & Meléndez, 2014), (Vargas, Romero, Palencia, Rivero, & Piñero, 2013), (INECC, 2017)	
Benzo(a)antraceno	4	Fuentes pirogénicas,	(Vargas, Romero,	

		combustión de gas natural,	Palencia, Rivero, & Piñero, 2013), (Chrysikou, y otros, 2007)	
Criseno	4	Emisiones diésel, fuentes petrogénicas, quema de vegetación y combustibles ligeros, actividades agrícolas y de transporte	(Vargas, Romero, Palencia, Rivero, & Piñero, 2013), (Johnse & Karlson, 2007), (INECC, 2017)	
Benzo(b)fluoroanteno	5	Fuentes pirogénicas, uso de diésel y combustóleo, actividad industrial, transportes de carga y industria de hierro y acero	(Chrysikou, y otros, 2007), (INECC, 2017), (Wang, y otros, 2018)	

<p>Benzo(a)pireno</p>	<p>5</p>	<p>Fuentes pirogénicas, uso de diésel, combustóleo y gasolina, actividad industrial y transportes de carga e industria de hierro y acero</p>	<p>(Chrysikou, y otros, 2007), (INECC, 2017), (Wang, y otros, 2018)</p>	
<p>Indeno(1,2,3-cd)pireno</p>	<p>6</p>	<p>Combustión de combustóleo y coque, actividades industriales</p>	<p>(INECC, 2017)</p>	
<p>Benzo(ghi)perileno</p>	<p>6</p>	<p>Motores de gasolina, combustión de combustóleo y coque, actividades industriales</p>	<p>(Vargas, Romero, Palencia, Rivero, & Piñero, 2013), (INECC, 2017), (Wang, y otros, 2018)</p>	

*Petrogénico: son derivados del petróleo

*Biogénicas: son producto de procesos metabólicos de organismos microscópicos

* Pirogénico: son producto de la combustión incompleta de materia orgánica (Ortiz, Cram, & Sommer, 2012)

2.3 Interacciones del Carbono Negro con Hidrocarburos Aromáticos policíclicos

Tanto los HAP's como el CN tienden a provenir de las mismas fuentes como lo son los procesos de combustión incompleta por lo que se hace referencia a que son co-emitidos, compartiendo las mismas fuentes de emisión, pero a su vez debido a las propiedades físicas y químicas del CN, se sabe que existen otras partículas de distintos tipos de contaminantes que pueden adherirse a su superficie, como es el caso de los HAP's, dioxinas y furanos.

Por lo que se ha propuesto y documentado el uso de monitoreos de CN como indicador de otros contaminantes como los son los HAP's, ya que estos compuestos se pueden encontrar en fase gaseosa o de partícula, distribuyéndose de la siguiente manera: HAP's de dos o tres anillos (naftaleno, acenafteno, acenaftileno, antraceno, fluoreno y fenantreo) se encuentran principalmente en su forma gaseosa, los de cuatro anillos (fluoranteno, pireno, criseno y benzo(a)antraceno) se encuentran en proporciones similares entre ambas fases y por ultimo los HAP's de cinco y seis anillos se encuentran principalmente en la fase de partículas (benzo(a)pireno y benzo(g,h,i, pirileno). Es debido a esta característica de los HAP's que se dificulta su degradación, pues los que se adhieren a otras partículas como las de la fracción carbonácea, en especial al CN, les proveen cierta protección contra la fotooxidación (Bocanegra, 2011), (Wang C. Z., 2017).

Cabe mencionar que, aunque difícilmente existe una correlación estadísticamente significativa al tratarse de contaminantes del aire, en el caso de los que son co-emitidos coincide su comportamiento cuando se la fuente en común presenta sus mayores emisiones. Los HAP's se encuentran asociados múltiples efectos en salud donde destacan las afectaciones al sistema respiratorio, reproductivo y la generación de cáncer, estos efectos en

el caso de los presentes en la fase de partículas los cuales son transportados hasta los pulmones incrementando el riesgo a padecer afectaciones sistémicas (EPA, 2012).

Por lo que se destaca la importancia de seleccionar métodos de medición de las concentraciones de CN y a su vez coleccionar información sobre los demás contaminantes que pueden ser co-emitidos y con los cuales el CN interaccione, tales como: PM_{10} , $PM_{2.5}$ y HAP's. Con la finalidad de ampliar los conocimientos y obtener datos más precisos sobre la composición de los contaminantes del aire y la toxicidad de esta mezcla, para a su vez realizar mejores estimaciones de riesgo para la salud.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

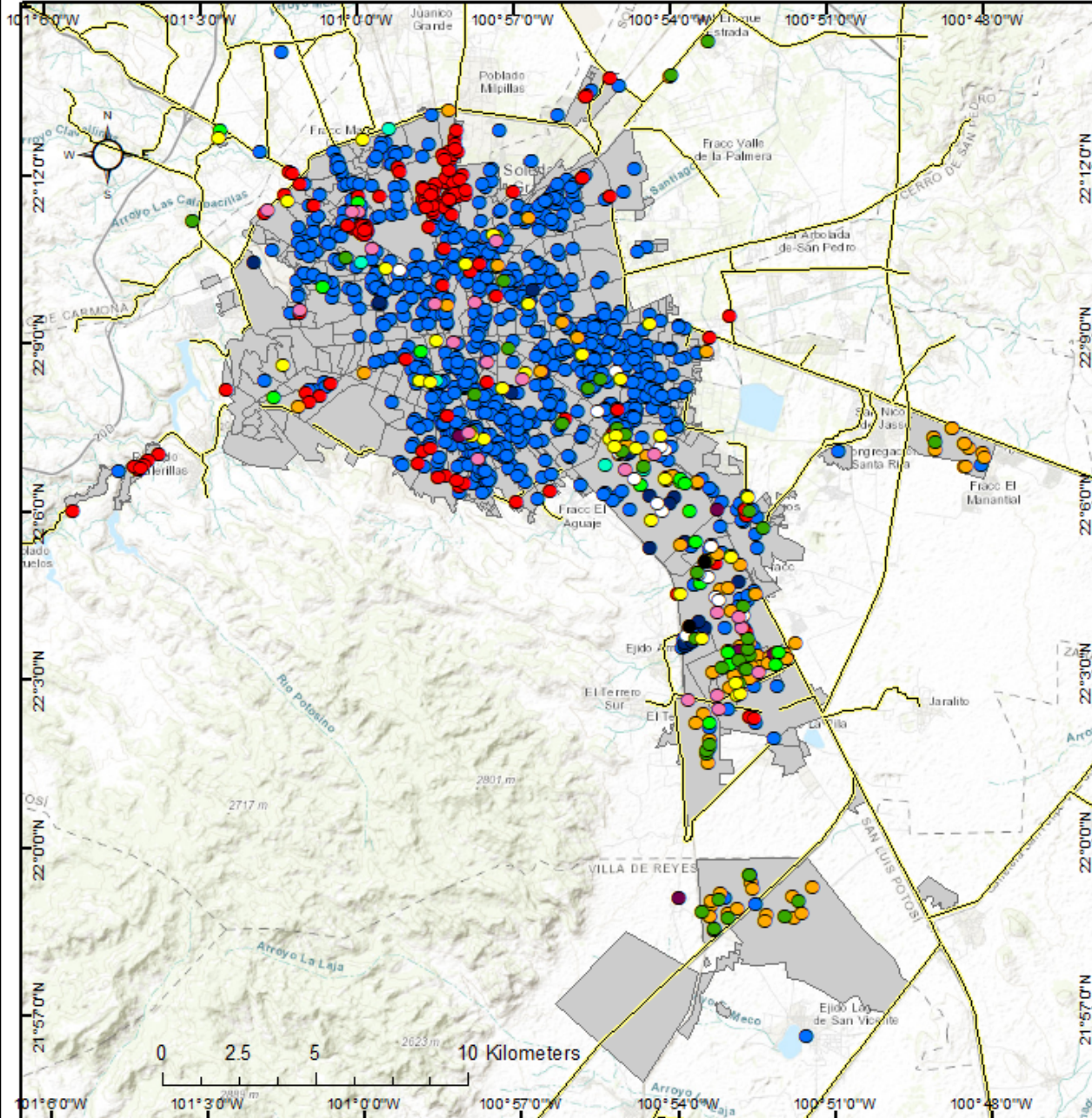
3.1 Caracterización del sitio de estudio

El municipio de San Luis Potosí es la capital del estado de San Luis Potosí y se localiza en las coordenadas 100°58" de longitud oeste y 22°09" de latitud norte, con una altura de 1,860 metros sobre el nivel del mar y se extiende por 1'471.1 km². Colinda al norte, con los municipios de Moctezuma y Villa de Arista, al este, Villa Hidalgo, Soledad de Graciano Sánchez, Cerro de San Pedro y Villa de Zaragoza, al sur, Villa de Reyes, al oeste, Villa de Arriaga, Mexquitic de Carmona y Ahualulco (INAFED, 2010).

El municipio de San Luis Potosí cuenta con 824,229 habitantes y una densidad poblacional de 2'140 personas por km², pero a esta cantidad se suman los habitantes de Soledad de Graciano Sánchez (309,342), Mexquitic de Carmona (57,184) y Cerro de San Pedro (4,535), sumando un total de 1,195,290 habitantes y una densidad poblacional de 715 personas por km² en la zona metropolitana de San Luis Potosí (INEGI, 2017).

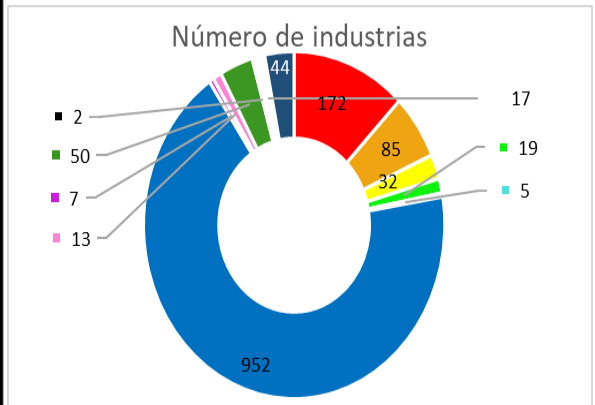
La ciudad de San Luis Potosí presente un clima seco templado, con una temperatura media anual 17.4 °C, siendo mayo y junio los meses más calientes 21 °C; mientras que enero es el mes más frío 14 °C y una tasa de precipitación media de 391.7 mm de lluvia al año (SEGAM, 2015). Aunque estudios recientes muestren un efecto del cambio climático en la región, con aumentos en la temperatura y disminución de las lluvias en los últimos 10 y 20 años (SEGAM, 2018).

Como se mencionó con anterioridad gran parte de la contaminación atmosférica en la ciudad de San Luis Potosí es atribuible a fuentes de tipo industrial (minera, metalúrgica, autopartes y ladrilleras) es por, que se identificaron estas industrias y su distribución espacial en la ciudad, con información obtenida por el Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE – INEGI) (INEGI, 2020) se realizaron mapas donde se demuestra la distribución espacial de estas empresas que puedan emitir contaminantes atmosféricos, los cuales se muestran a continuación.



Simbología

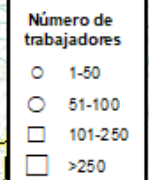
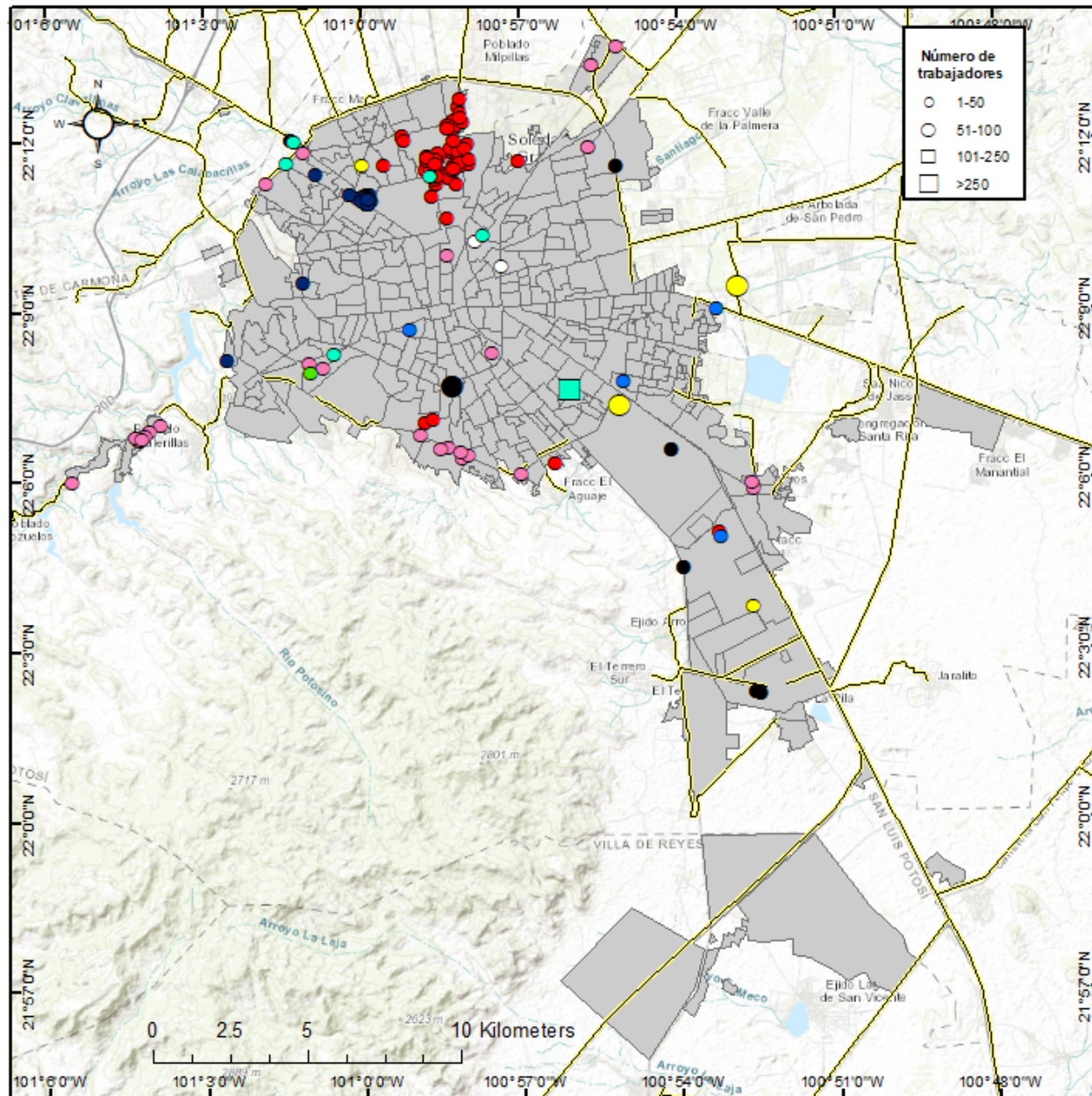
- Vidriera
- Petróleo y petroquímica
- Química
- Plástico y hule
- Papel y cartón
- Fabricación de accesorios, aparatos, electrónicos y equipos de generación de energía eléctrica
- Fabricación de equipos de computación, comunicación, medición y otros equipos, componentes y accesorios electrónicos
- Fabricación de equipos de transporte
- Bebidas
- Metálica básica
- Cemento y cal
- Productos metálicos
- SLPCarreteras
- Zona Metropolitana de San Luis Potosí



Como se observa la industria predominante dentro de la zona metropolitana de San Luis Potosí, la cual incluye al municipio de San Luis Potosí y Soledad de Graciano Sánchez es la perteneciente a la industria de la fabricación de productos metálicos (fabricación de herramientas de mano sin motor, recubrimientos y terminados metálicos y fabricación de productos metálicos forjados y troquelados principalmente), la industria de cemento y cal (Fabricación de ladrillos no refractarios, Fabricación de productos a base de piedra de cantera y otros productos de cemento y concreto principalmente), la fabricación de equipos de transporte (partes de vehículos, equipos eléctricos y partes de sistema de dirección principalmente).

Así mismo se cuenta con mapas para estos tipos de industria emisoras, y su distribución espacial en la ciudad de San Luis Potosí, por lo que se realizaron mapas de los 5 tipos de industria manufactureras más grandes en la ciudad de San Luis Potosí, las cuales en su mayoría son de las principales fuentes de emisión de los contaminantes criterio. En estos mapas se representa su distribución espacial y su tamaño en función del número de trabajadores que laboran dentro de ellas.

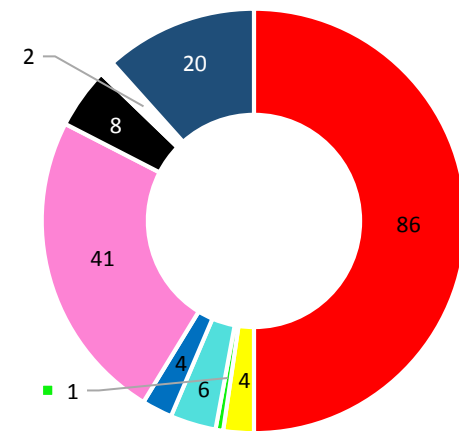
Distribución espacial de la industria de cemento y cal en la zona metropolitana de San Luis Potosí



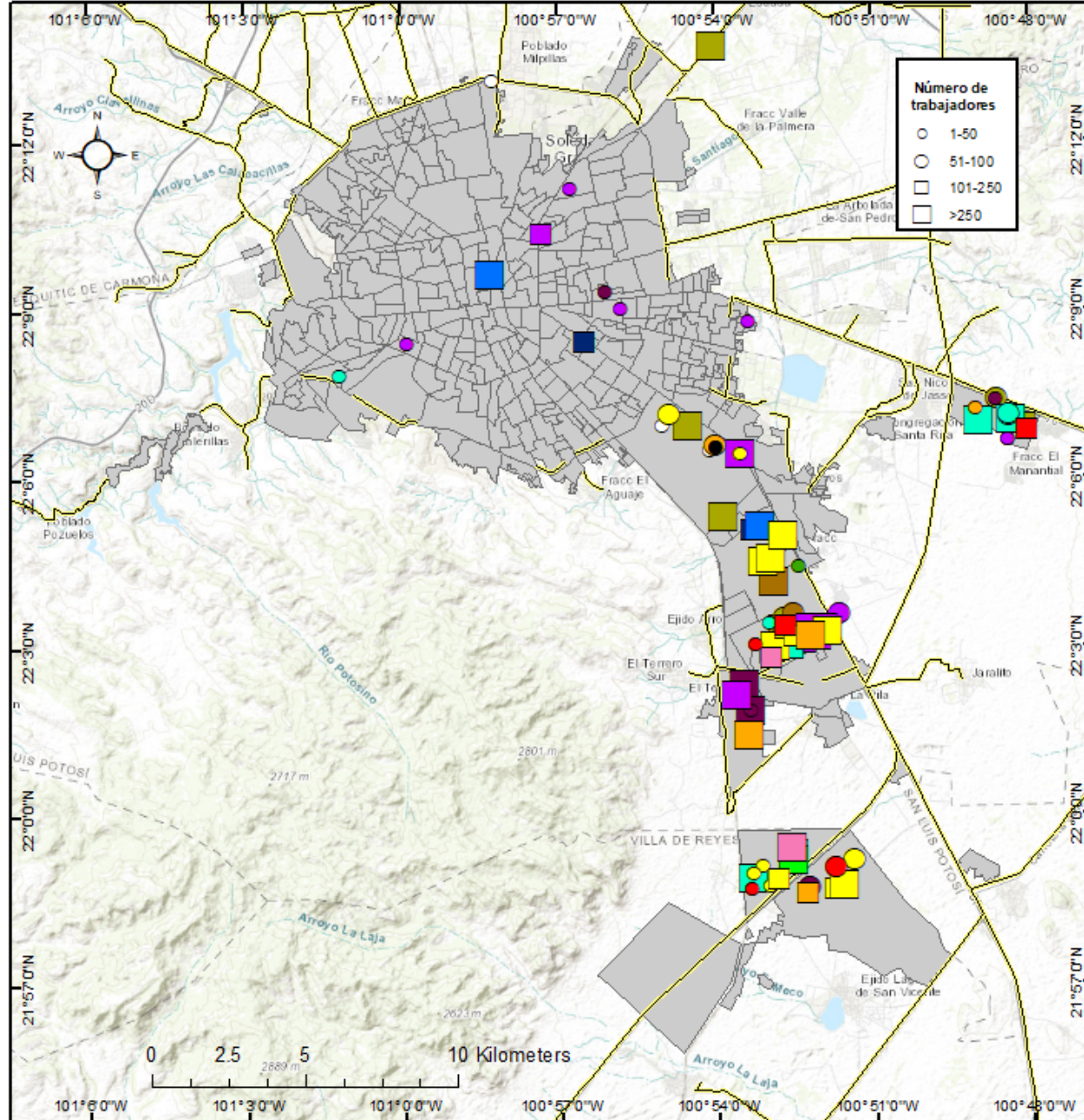
Simbología

- Fabricación de tubos y bloques de cemento y concreto
- Fabricación de productos preesforzados de concreto
- Fabricación de otros productos de cemento y concreto
- Fabricación de concreto
- Fabricación de cemento y productos a base de cemento en plantas integradas
- Fabricación de yeso y productos de yeso
- Fabricación de productos a base de piedra de cantera
- Fabricación de cal
- Fabricación de ladrillos no refractarios
- SLP Carreteras
- Zona Metropolitana de San Luis Potosí

Número de industrias



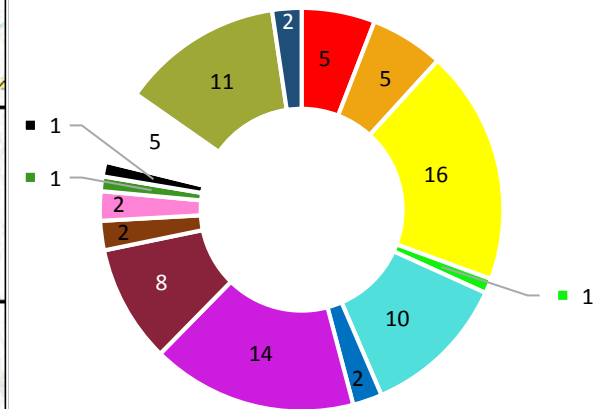
Distribución espacial de la industria de la fabricación de equipos de transporte en la zona metropolitana de San Luis Potosí



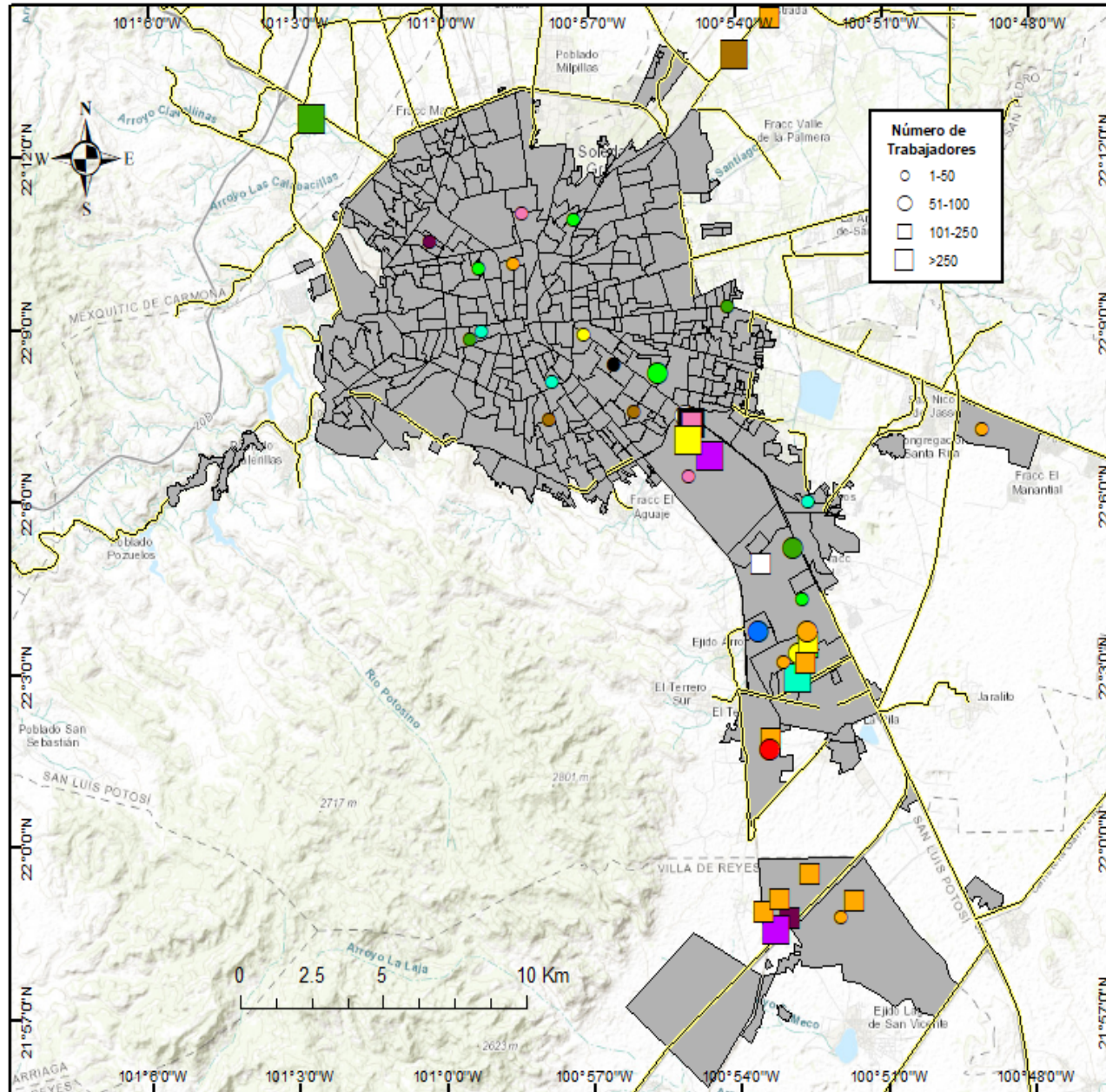
Simbología

- Fabricación de piezas metálicas troqueladas
- Fabricación de partes de sistemas de transmisiones
- Fabricación de otras partes de vehículos
- Fabricación de automóviles y camionetas
- Fabricación de motores de gasolina
- Fabricación de equipos ferroviarios
- Fabricación de equipo eléctrico y sus partes
- Fabricación de carrocerías y remolques
- Fabricación de asientos y accesorios
- Fabricación de bicicletas y triciclos
- Fabricación de camiones y tractocamiones
- Fabricación de equipos aeroespaciales
- Fabricación de otro tipo de transporte
- Fabricación de partes de sistemas de frenos
- Fabricación de partes de sistemas de dirección
- SLPCarreteras
- Zona Metropolitana de San Luis Potosí

Número de industrias



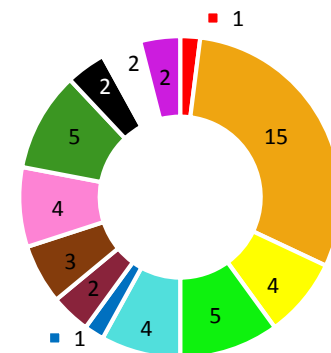
Distribución espacial de la industria de plástico y hule en la zona metropolitana de San Luis Potosí

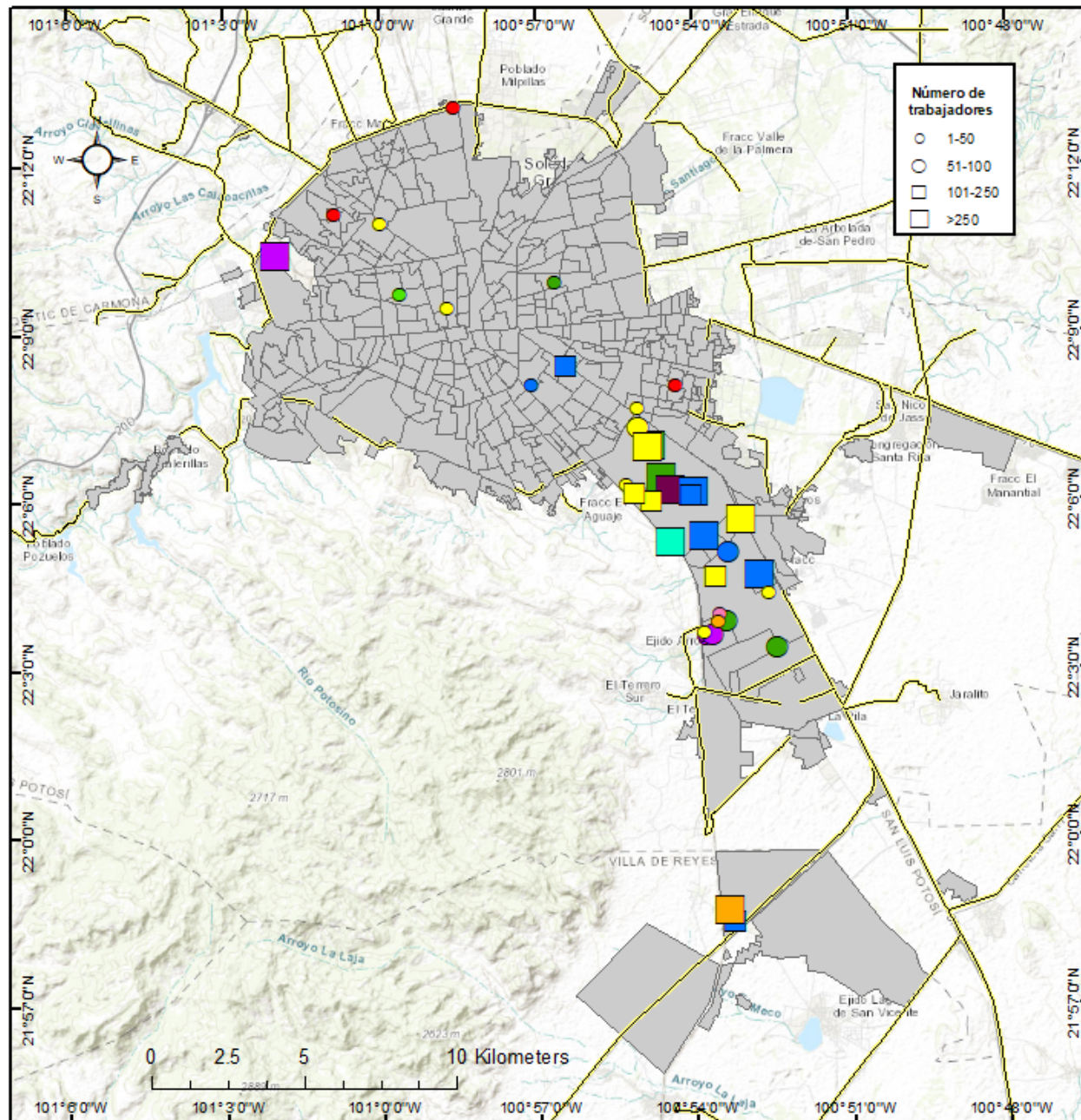


Simbología

- Fabricación de tubería y conexiones para embalaje
- Fabricación de autopartes de plástico
- Fabricación de bandas y mangueras
- Fabricación de bolsas y películas de plástico flexible
- Fabricación de contenedores de plástico
- Fabricación de espumas y productos de poliestireno
- Fabricación de llantas y camaras
- Fabricación de otros productos de plástico sin reforzamiento
- Fabricación de plásticos con reforzamiento
- Fabricación de plásticos para el hogar
- Otros productos de hule
- Fabricación de espumas y productos de uretano
- Fabricación de laminas de plástico
- SLP Carreteras
- Zona Metropolitana de San Luis Potosí

Número de industrias

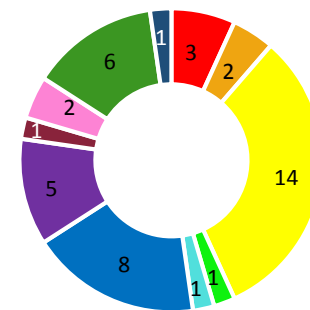




Simbología

- Moldeo por función de piezas metálicas no ferrosas
- Industria básica del aluminio
- Fabricación de productos de hierro y acero
- Complejos siderúrgicos
- Fabricación de desbastes primarios y ferroaleaciones
- Fabricación de tubos y postes de hierro y acero
- Fundición y refinación de cobre
- Fundición y refinación de otros metales no ferrosos
- Laminación secundaria de cobre
- Laminación secundaria de otros metales no ferrosos
- Moldeo por función de piezas de hierro y acero
- SLPCarreteras
- Zona Metropolitana de San Luis Potosí

Número de industrias



3.2 Campaña de muestreo de partículas suspendidas y carbono negro

Parte esencial de un programa de monitoreo y la caracterización química de las partículas suspendidas es el establecimiento de una campaña de muestreo que defina el tiempo y duración de muestreo y colecta de los contaminantes para su posterior análisis.

El periodo de muestreo de este estudio abarca desde el día 10 de octubre del año 2018 hasta el día 24 de junio del año 2019, dando como resultado 9 meses y medio (256 días). Durante estos días se cuentan con datos horarios continuos para las concentraciones de PM₁₀ y CN, proporcionados por equipos de muestreo automáticos. En el caso de los HAP's la campaña se ubica en el mismo periodo de tiempo, pero con un monitoreo manual contando con un total de 43 filtros colectados (misma cantidad de días) ya que al ser un muestreo de tipo manual, la colecta depende en función a la instalación del equipo, disposición de filtro quemados y disposición de la estación ya que al estar sobre una biblioteca que no abre los fines de semana, el acceso se ve limitado ciertos días y finalmente de las condiciones meteorológicas que puedan impedir el muestreo (lluvias).

3.2.1 Técnicas de muestreo ambiental

Además de las mediciones de las concentraciones ambientales de CN, se efectuaron mediciones de las concentraciones de PM_{10} ya que el CN es considerado un componente importante de esta clasificación de las partículas por lo que una medición conjunta permitirá conocer la fracción de las PM_{10} compuesta por CN. De las partículas colectadas (PM_{10}) se realizó una caracterización para identificar los HAP's presentes, ya que se cuenta con evidencia formidable de su presencia y asociación con las partículas al igual que con el carbono negro.

3.2.2 Muestreo de Carbono Negro

Para poder medir las concentraciones de CN se emplean distintos métodos, los cuales se concentran en evaluar sus propiedades fisicoquímicas, de los cuales el método más utilizado es un método óptico, el cual se basa en la medición de fuerte capacidad de absorbanza de la luz visible de las partículas de CN (Andreae, 2006).

Un equipo ampliamente utilizado y seleccionado para la medición de las concentraciones de CN es el "Etalometro AE-33", el cual permite realizar mediciones en tiempo real basándose en la atenuación de la luz a través de un filtro (EPA, 2012)

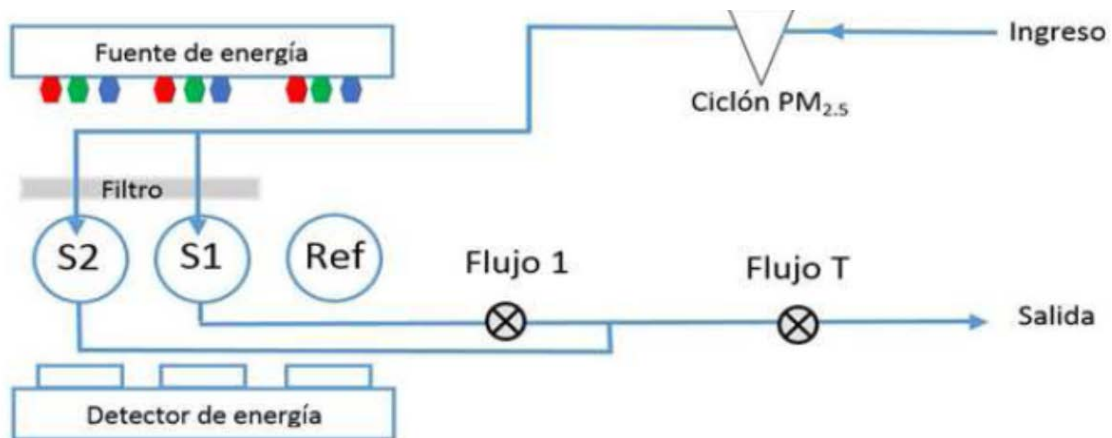
- Etalometro AE-33: El Etalometro colecta partículas suspendidas de tamaño $PM_{2.5}$ utilizando un ciclón de punto de corte en un filtro de filtro de cuarzo, que mide la absorción de la luz a siete longitudes de onda (370 UV, 470 azul, 520 verde, 590 amarillo, 660 rojo, 880 IR-1 y 950 nm IR-2). El equipo toma dos puntos de la muestra para realizar dos mediciones simultáneamente con distintas tasas de acumulación, ambos puntos derivan sus muestras de la misma toma de aire con una tasa de flujo de aire de 3 LPM (litros por minuto) en un filtro de entrada de 25 μm . Ambos resultados de la atenuación se combinan para eliminar la no-linealidad, lo que proporciona la

absorción de la luz de las partículas compensadas, de esta manera se obtiene la concentración de CN (Kolhe, 2018).

Se selecciona el canal de 880 nm para reportar las concentraciones de carbono negro, el cual es la estimación del canal IR-1, el cual es el considerado el más cercano a la masa de concentración del CN con respecto a la atenuación óptica en conjunción con la absorción de la masa en su sección transversal de $7.77 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$.

La concentración de CN se calcula a partir de la relación del coeficiente de absorción, midiendo la atenuación de la luz transmitida a través del punto de muestra en el filtro y la absorción de la masa en la sección transversal. El AE-33 utiliza una absorción de masa sección transversal (MAC) de $16.6 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ (Peralta, 2019).

figura 9. Diagrama de funcionamiento del Etalometro AE-33



(Suarez, 2017)

3.2.3 Muestreo de Partículas suspendidas menores a 10 micrómetros (PM₁₀)

Se recopilaron los datos arrojados por la estación de monitoreo “Biblioteca”, la cual cuenta con un equipo de monitoreo de partículas PM₁₀, el cual reporta las concentraciones de estas en tiempo real aprovechando las propiedades físicas de las partículas.

- Atenuación de radiación beta: Los equipos que utilizan este método de medición de concentración de partículas, las colectan del aire ambiente mediante una bomba de succión, depositando las partículas en un filtro (cinta carrete de fibra de vidrio), de tal manera que el impacto de la masa de las partículas en el filtro se realiza en periodos de tiempo, los cuales son establecidos por el usuario del equipo, en el caso de la estación de monitoreo de registran datos por minuto.

Se realiza la radiación beta de bajo nivel a través de la cinta cargada de las partículas recolectadas, esta capa reduce la intensidad de un haz de radiación beta en la sección, esta reducción se mide mediante una cámara de ionización que funciona como un detector, la señal eléctrica de salida es proporcional a la masa real muestreada y la concentración se calcula a partir del aumento temporal de la masa de partículas.

figura 12. Equipo Monitor Atenuación Beta PM₁₀



3.2.4 Monitoreo de Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP's)

El muestreo de los hidrocarburos aromáticos policíclicos se realizó en la fracción de partículas PM₁₀ mediante un muestreador de alto volumen (Hi-Vol – tipo Venturi modelo P6762 marca TISCH), utilizando filtros de cuarzo, los cuales recibieron un tratamiento previo con un pre-quemado a 500°C durante dos horas con el fin de eliminar cualquier impureza en su proceso de fabricación. Posterior a ello, se realizó el análisis por cromatografía de gases acoplado a un detector de masas.

La campaña de muestreo se realizó durante el periodo de octubre de 2018 a junio de 2018. El periodo de muestreo consistió en la colecta de partículas en los filtros de cuarzo durante 24 horas cada 48 horas (un día sí, dos días no). Los filtros colectados en el Hi-Vol a un flujo de 16.7 LPM se mantuvieron en un proceso de refrigeración constante (3 °C – 5 °C), hasta su posterior análisis cromatográfico, basándose en la metodología propuesta por Bocanegra (Bocanegra, 2011).

3.2.4.1 Caracterización de Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos en partículas PM₁₀

Para la caracterización de los HAP's contenidos en la fase de partículas de un tamaño menor a 10 micrómetros, se utilizó la metodología descrita por Bocanegra en el 2011, la cual consiste en una cromatografía de gases.

Cromatografía de gases: Se realizó por medio del cromatógrafo de gases GCSystem modelo HP-6890 con detector de masas modelo MSD 5973, empleando una columna capilar HP-5MS (30 m de longitud, 0.25 mm de diámetro interno y espesor de película de 0.25 µm).

1. El filtro de cuarzo se midió con ayuda de una regla metálica (previa limpieza con acetona) para proceder a dividirlo en tres partes iguales. Se adicionaron 30 µL de pireno-d10 de 500 mg/L sobre una tercera parte del filtro como estándar surrogado para determinar la pérdida de compuestos desde la extracción hasta el análisis. Las

otras dos terceras partes del filtro permanecieron como resguardo para otro tipo de análisis posterior.

2. Posteriormente, se realizan dos procesos de extracción a cada filtro y se conjuntaron los dos extractos en el mismo matraz, después se concentra el extracto hasta obtener un valor de volumen aproximado de 5 mL, en el cual se evaporó con un flujo de Nitrógeno grado cromatográfico, hasta llegar a un punto de sequedad parcial. Una vez se extrae una gota de solución a un frasco de 2 mL; se adiciona una gota de hexano al tubo de ensayo de 15mL con el concentrado de la solución y se pone a centrifugar, para pipetear nuevamente, a esta nueva concentración se adicionan 25 μ L de la solución de fluoranteno-d10 a 200 mg/L como estándar interno y se afora a 1 mL. Se arma una jeringa equipada con un filtro, mediante la cual se vierte la solución y se inyecta en un incerto el cual es almacenado en un vial ámbar de 2 mL.
3. En el cromatógrafo de gases con detector de masas, el volumen de inyección de la muestra fue de 1 μ L en modo splitless pulsado y empleando Helio como gas de arrastre. La temperatura del inyector fue de 250 °C. Se trabajó un programa de temperatura en el horno iniciando en 60 °C manteniéndose así durante 4 minutos, posteriormente se incrementó 13 °C/min hasta 150 °C permaneciendo 1 minuto, luego 7 °C/min hasta 300 °C durante 7 minutos. Bajo estas condiciones se obtuvieron los tiempos de retención para cada analito. Se evaluó la linealidad y sensibilidad para cada analito con el promedio de tres curvas en matriz preparadas independientemente, comprendidas en el intervalo lineal de (5 μ g/L - 70 μ g/L), expresando la linealidad como el coeficiente de correlación y la sensibilidad como la pendiente de la curva.
4. Se calcularon los límites de detección (LOD) y de cuantificación (LOC) para cada uno de los analitos mediante el método de Miller y Miller (2002) empleando los datos obtenidos de tres curvas preparadas independientemente en un intervalo lineal menor al de trabajo (4 μ g/L - 7 μ g/L).
5. Los resultados del cromatógrafo de gases se encuentran en μ g/L, sin embargo, los valores de la concentración de HAP's en aire se expresan en ng/m^3 por lo que para

hacer la conversión se siguió la fórmula descrita por el método TO-13A de la EPA (EPA, 1999):

$$\text{Concentración} \left(\frac{\text{ng}}{\text{m}^3} \right) = \frac{A_x * I_s * V_t * D_f}{A_{is} * V_i * RRF}$$

A_x = área de respuesta del compuesto

A_{is} = área de respuesta del estándar interno

I_x = concentración del estándar interno (ng/μL)

RRF = la media del RRF de la calibración más reciente

V_i = volumen de aire muestreado (m³)

V_t = volumen del extracto final (μL)

D_f = factor de dilución. Si no se hizo la dilución es igual a 1

3.3 Gráficos de dispersión de los contaminantes durante el muestreo

Una vez obtenidos los datos de las concentraciones tanto de PM₁₀, CN y de los HAP's contenidos en esta fracción, estos se clasificaron según la disposición de los datos en aquellos que se cuenta con concentraciones en tiempo real (resultados de sus concentraciones cada hora) como es el caso del CN y PM₁₀ a su vez de ambos contaminantes se calcularon las concentraciones promedio de 24 h para poder hacer su comparación con las concentraciones obtenidas de los HAP's.

Para realizar los cálculos estadísticos, se utilizó el software estadístico de código abierto R (RCoreTeam, 2016). Lenguaje y medio ambiente para la informática estadística, *R Foundation for Statistical Computing*, Viena, Austria) con el entorno de desarrollo integrado RStudio para R (RStudio Boston, MA. [Http://www.rstudio.org/](http://www.rstudio.org/)) y el paquete de herramientas para el análisis de la calidad del aire en R OpenAir (Carslaw, 2015). Este paquete tiene funciones dedicadas para analizar e interpretar datos de contaminación atmosférica mediante varias funciones/herramientas, entre las cuales las utilizadas son las siguientes:

1. Grafica polar temporal: Representa la dirección del viento en la que proviene el contaminante en cuestión y las concentraciones alcanzadas del parámetro en función de las divisiones temporales que indique el usuario. De esta forma, se puede ver durante que horas del día se producen las mayores concentraciones de un contaminante dado (la escala de las horas la darán los ejes de la gráfica) y en qué dirección del viento se producen de forma mayoritaria, lo que aporta un potencial adicional a la hora de identificar las fuentes de origen de la contaminación.
2. Gráfica polar de frecuencias: incluye una serie de innovaciones para mostrar cómo evolucionan los parámetros seleccionados con respecto a la distribución de la velocidad y dirección del viento, permitiendo a su vez tratar los datos de estos parámetros utilizados a través de múltiples comandos estadísticos, de esta forma la función polar de frecuencias escala la dirección del viento en función de la velocidad de este, disponiendo de pequeños tramos en los que representará el resultado estadístico que corresponda al conjunto de datos incluido dentro de esa combinación de velocidad y dirección del viento.
3. Gráfica de calendario: Representar la evolución en el tiempo de un parámetro, utilizando un calendario para representar el parámetro en escala de colores. calculando las medias diarias de un año determinado y para un parámetro, establecer una escala de colores para dichas medias, y pintar con el color resultante cada uno de los días de un calendario de ese año.

3.4 Identificación de las principales fuentes y combustibles asociados a Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos

Para la estimación de los principales tipos de fuentes y combustibles se utilizaron dos metodologías en las cuales se utiliza a los HAP's para identificarlas, dichas metodologías son:

1) Recurrir a una revisión bibliográfica:

Como se mencionó en la tabla 5 la presencia y abundancia de los HAP's permite identificar su fuente de procedencia, las cuales son clasificadas en petrogénicas (son derivados del petróleo), biogénicas (son producto de procesos metabólicos de organismos microscópicos) y pirogénico (son producto de la combustión incompleta de materia orgánica) (Ortiz, 2012)

2) Cálculo de las relaciones entre los HAP's:

Este cálculo es utilizado para distinguir entre los procesos de combustión que emiten HAP's (emisiones diésel, de gasolina, quema de biomasa, etc.) de igual manera muestra la variabilidad y similitud de las fuentes.

Los cálculos de las relaciones entre los HAP's se determinan a partir de la siguientes formulas (Tobiszewski & Namiesnik, 2012):

Tabla 9. Cálculos de relaciones entre HAP's.

Formula	Rango de valores	Fuente atribuida
ANT/(ANT+PHE)	< 0.1	petrogénicas
	> 0.1	pirogénica
BaA/(BaA+CHR)	< 0.2	petrogénicas
	0.2 - 0.35	combustión de carbón
	> 0.35	emisión vehicular
FLA/(FLA+PYR)	< 0.4	petróleo

	0.4 - 0.5	combustión de petróleo
	> 0.5	madera y carbón
IcdP/(IcdP+BghiP)	< 0.2	petrogénicas
	0.2 - 0.5	combustión de petróleo
	> 0.5	madera y carbón
BaP/BghiP	< 0.6	emisiones no vehiculares
	> 0.6	emisiones vehiculares
FLO/(FLO+PYR)	< 0.5	vehículos que funcionan con gasolina
	> 0.5	vehículos que funcionan con Diesel
FL/(FL+PYR)	< 0.5	emisiones de petróleo
	> 0.5	emisiones diésel
\sum LMW / \sum HMW	< 1	pirogénica
	> 1	petrogénicas

*LMW = HAP's de bajo peso molecular (2-3 anillos).

*HMW = HAP's de alto peso molecular (4-5 anillos).

3.5 Estimación del riesgo a la salud humana por Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos

Una vez conocidas las concentraciones de los HAP's presentes en la fracción de PM₁₀, es posible realizar una estimación del riesgo a la salud humana, por la inhalación de HAP's contenidos en la fracción particulada mediante el cálculo de la concentración equivalente de Benzo(a)pireno el cual se obtiene mediante el uso del factor de toxicidad equivalente (TEF) el cual es un valor asignado por la EPA y por La Goy et. Al. Específico para cada uno de los HAP's prioritarios listados por la EPA y la concentración individual de cada HAP, como se muestra en la tabla 9.

Tabla 10. Factor de Toxicidad Equivalente de los HAP's.

Hidrocarburo Aromático Policíclico	TEF – <i>Department of Environmental Wuality, State of Oregon</i>	TEF – EPA 1993	TEF – Nisbet and La Goy
Naftaleno	-	0	0.001
Acenaftileno	NA	0	0.001
Acenafteno	NA	0	0.001
Fluoreno	NA	0	0.001
Fenantreno	-	0	0.001
Antraceno	0	0	0.01
Fluoroantraceno	-	0	0.001
Pireno	0	0	0.001
Benzo(a)antraceno	0.2	1	0.1
Criseno	0.1	1	0.01
Benzo(b)fluoroanteno	0.8	1	0.1
Benzo(a)pireno	1	1	1
Dibenzo(a,h)antraceno		1	1
Indeno(1,2,3-cd)pireno	0.07	1	0.1
Benzo(ghi)perileno	0.009	0	0.01

(Nisbet & La Goy, 1992); (Vargas, Romero, Palencia, Rivero, & Piñero, 2013)

Para el uso de esta metodología es indispensable normalizar las concentraciones de cada uno de los HAP's a una concentración de Benzo(a)pireno, una vez conocida esta concentración la cual se obtiene a partir de la siguiente formula, se obtiene como

resultado el equivalente toxico (TEQ), el cual puede ser comparado con el valor de benzo(a)pireno.

$$BaP_{eq} = \sum C_1 * TEF_1$$

C_1 = *Concentración individual de cada HAP*

TEF = *Factor de toxicidad equivalente*

Estos cálculos y valores (TEF y TEC) se utilizan en función al Benzo(a)pireno, debido a que es el HAP del cual se cuenta con mayor número de estudios, investigaciones y por ende mayor cantidad información disponible sobre sus efectos cancerígenos y no cancerígenos, por lo que también se utiliza su concentración de referencia (RfC) para poder comparar la concentración resultante de la mezcla de los HAP's y tener una referencia sobre el posible riesgo a la salud; el cual es a un RfC de 2×10^{-6} mg/m³, concentración a la cual se protege de efectos en el desarrollo fetal como la disminución en la supervivencia fetal.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

4.1 Concentraciones de partículas suspendidas menores a 10 micrómetros (PM₁₀) y Carbono Negro (CN)

Los datos obtenidos de las concentraciones horarias y diarias de PM₁₀ y CN, se sometieron a un pretratamiento con estadística descriptiva, calculando y registrando los valores mínimos, máximos y la media. De este modo se obtuvo una concentración media diaria de 51.47 µg/m³ y 1.16 µg/m³ de PM₁₀ y CN respectivamente, y alcanzando una concentración máxima de 210 µg/m³ y 3.77 µg/m³ respectivamente. Como complemento se calculó la relación entre ambos contaminantes, resultando una relación de PM₁₀/CN de 2.25 %.

Tabla 11. Concentraciones de PM₁₀ y CN durante el muestreo.

FECHA	PM₁₀ (µG/M³)	CN (µG/M³)
11/10/2018	38.00	0.80
12/10/2018	43.13	1.35
13/10/2018	70.46	3.03
14/10/2018	39.17	0.90
15/10/2018	40.25	0.90
16/10/2018	24.75	0.63
17/10/2018	20.96	0.47
18/10/2018	12.92	0.68
19/10/2018	17.57	0.47
20/10/2018	17.88	0.89
21/10/2018	10.83	0.52
22/10/2018	20.48	0.49
23/10/2018	29.50	0.76
24/10/2018	36.63	0.81
25/10/2018	38.46	1.59
26/10/2018	40.67	1.02
27/10/2018	25.79	0.90
28/10/2018	21.50	0.43
29/10/2018	37.00	0.85
30/10/2018	55.29	1.49
31/10/2018	88.33	3.20
01/11/2018	27.88	0.77
02/11/2018	53.19	2.07
03/11/2018	47.50	2.10
04/11/2018	28.29	0.86
05/11/2018	28.08	0.61
06/11/2018	62.08	2.09
07/11/2018	50.63	1.72
08/11/2018	55.17	1.70
09/11/2018	53.29	1.43
10/11/2018	25.71	0.50
11/11/2018	46.33	1.24
12/11/2018	66.58	2.10
13/11/2018	29.96	1.83
14/11/2018	31.08	1.28
15/11/2018	52.75	2.03
16/11/2018	84.54	2.92
17/11/2018	94.42	3.06
18/11/2018	64.08	1.47
19/11/2018	50.88	1.38
20/11/2018	57.00	1.45
21/11/2018	68.04	2.58
22/11/2018	71.13	2.22
23/11/2018	80.75	2.41
24/11/2018	54.71	1.44
25/11/2018	33.92	0.75

26/11/2018	54.92	1.17
27/11/2018	53.92	1.62
28/11/2018	25.38	1.38
29/11/2018	27.83	1.45
30/11/2018	28.63	0.80
01/12/2018	ND	0.55
02/12/2018	15.58	0.42
03/12/2018	82.42	2.16
04/12/2018	48.83	1.13
05/12/2018	33.79	0.82
06/12/2018	53.92	1.60
07/12/2018	68.21	2.08
08/12/2018	34.04	1.55
09/12/2018	27.08	0.69
10/12/2018	32.79	0.72
11/12/2018	61.00	1.65
12/12/2018	77.92	2.93
13/12/2018	22.13	0.37
14/12/2018	31.58	0.62
15/12/2018	69.76	2.66
16/12/2018	83.37	1.92
17/12/2018	116.82	2.02
18/12/2018	106.67	2.49
19/12/2018	34.45	0.47
20/12/2018	210.00	0.65
21/12/2018	ND	2.21
22/12/2018	ND	3.04
23/12/2018	ND	0.91
24/12/2018	ND	1.25
25/12/2018	ND	3.77
26/12/2018	ND	1.82
27/12/2018	ND	0.43
28/12/2018	ND	0.56
29/12/2018	ND	2.06
30/12/2018	ND	1.49
31/12/2018	ND	0.47
01/01/2019	ND	3.69
02/01/2019	ND	1.06
03/01/2019	ND	1.09
04/01/2019	ND	1.21
05/01/2019	ND	2.45

06/01/2019	ND	1.53
07/01/2019	67.86	1.33
08/01/2019	65.95	1.62
09/01/2019	54.33	1.78
10/01/2019	61.70	2.06
11/01/2019	76.33	2.91
12/01/2019	27.67	1.15
13/01/2019	21.54	0.51
14/01/2019	23.13	0.62
15/01/2019	51.58	2.26
16/01/2019	56.92	2.38
17/01/2019	36.46	0.94
18/01/2019	35.04	0.81
19/01/2019	35.75	1.02
20/01/2019	47.58	0.88
21/01/2019	77.86	1.93
22/01/2019	77.53	2.66
23/01/2019	55.07	1.05
24/01/2019	64.69	2.17
25/01/2019	68.75	2.82
26/01/2019	57.08	1.78
27/01/2019	34.08	0.77
28/01/2019	70.79	1.43
29/01/2019	58.63	0.92
30/01/2019	58.08	1.47
31/01/2019	55.75	1.85
01/02/2019	ND	1.37
02/02/2019	65.17	2.74
03/02/2019	63.79	1.39
04/02/2019	45.79	1.07
05/02/2019	62.21	1.47
06/02/2019	68.35	1.82
07/02/2019	87.96	1.14
08/02/2019	45.17	0.62
09/02/2019	28.88	0.38
10/02/2019	37.04	0.57
11/02/2019	60.21	1.03
12/02/2019	58.17	1.06
13/02/2019	45.54	0.56
14/02/2019	59.38	1.10
15/02/2019	42.38	0.67

16/02/2019	59.42	1.13
17/02/2019	50.33	0.44
18/02/2019	38.96	0.50
19/02/2019	71.88	1.59
20/02/2019	37.71	0.59
21/02/2019	58.29	0.83
22/02/2019	29.71	0.38
23/02/2019	19.00	0.31
24/02/2019	48.04	0.61
25/02/2019	63.46	1.10
26/02/2019	67.83	2.07
27/02/2019	58.25	1.36
28/02/2019	84.88	2.85
01/03/2019	64.17	1.08
02/03/2019	53.29	0.93
03/03/2019	39.29	0.42
04/03/2019	58.04	0.86
05/03/2019	44.83	0.89
06/03/2019	44.04	1.03
07/03/2019	69.92	2.62
08/03/2019	68.50	1.27
09/03/2019	71.13	1.03
10/03/2019	54.04	1.22
11/03/2019	83.21	0.89
12/03/2019	70.75	0.86
13/03/2019	83.58	0.72
14/03/2019	49.79	0.81
15/03/2019	61.63	0.71
16/03/2019	46.17	0.67
17/03/2019	39.58	0.69
18/03/2019	34.00	0.52
19/03/2019	34.58	1.18
20/03/2019	34.42	0.70
21/03/2019	35.88	0.47
22/03/2019	43.00	0.76
23/03/2019	34.92	1.08
24/03/2019	43.46	0.66
25/03/2019	64.33	0.89
26/03/2019	51.21	0.95
27/03/2019	49.08	0.85
28/03/2019	66.75	1.45

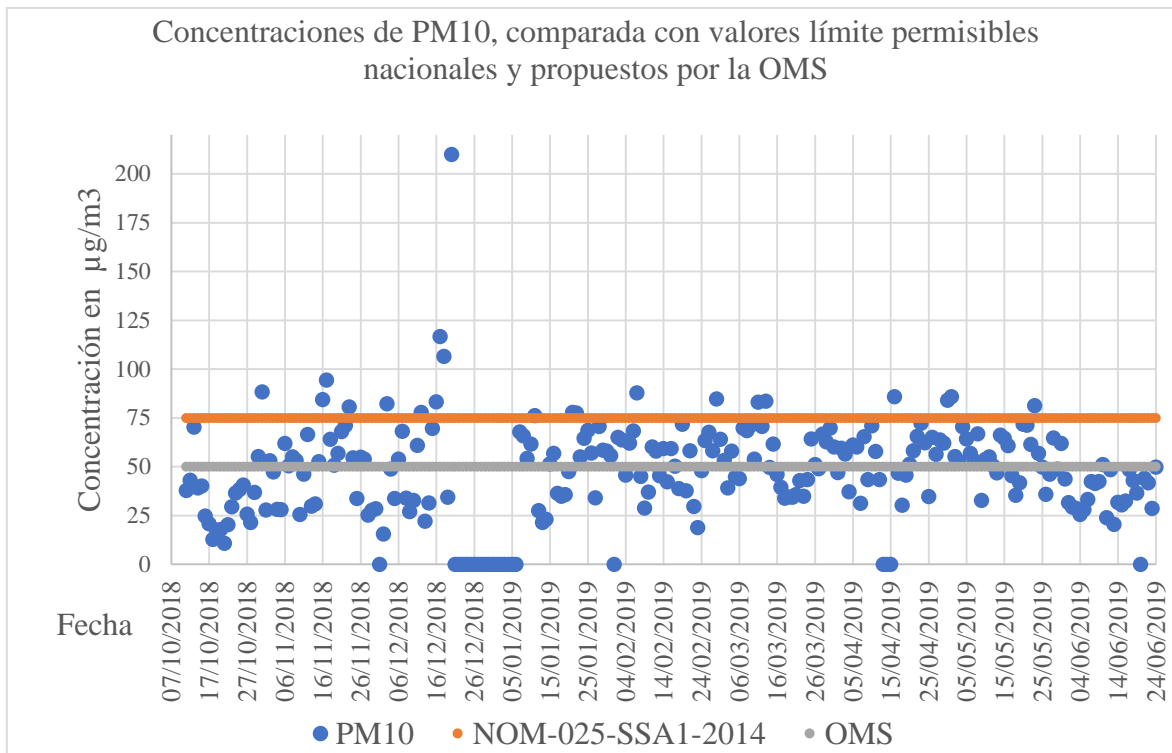
29/03/2019	62.83	1.33
30/03/2019	69.83	1.87
31/03/2019	60.21	0.66
01/04/2019	47.14	0.81
02/04/2019	59.54	1.23
03/04/2019	56.54	0.62
04/04/2019	37.21	0.50
05/04/2019	61.25	0.81
06/04/2019	60.17	0.90
07/04/2019	31.43	0.40
08/04/2019	65.46	0.71
09/04/2019	43.46	0.80
10/04/2019	71.08	1.11
11/04/2019	57.96	0.49
12/04/2019	43.47	0.46
13/04/2019	ND	0.29
14/04/2019	ND	0.63
15/04/2019	ND	0.96
16/04/2019	85.88	1.54
17/04/2019	46.83	0.42
18/04/2019	30.46	0.36
19/04/2019	45.79	0.32
20/04/2019	51.29	0.71
21/04/2019	58.29	0.76
22/04/2019	65.58	0.79
23/04/2019	72.42	1.44
24/04/2019	62.29	0.72
25/04/2019	34.79	0.54
26/04/2019	65.21	0.72
27/04/2019	56.50	0.95
28/04/2019	63.75	1.52
29/04/2019	62.25	0.90
30/04/2019	84.21	2.06
01/05/2019	85.96	2.45
02/05/2019	55.38	1.05
03/05/2019	52.92	0.79
04/05/2019	70.63	2.66
05/05/2019	64.38	0.94
06/05/2019	56.96	0.77
07/05/2019	53.17	0.75
08/05/2019	66.92	0.50

09/05/2019	32.83	0.47
10/05/2019	53.75	0.60
11/05/2019	55.17	0.78
12/05/2019	50.54	0.54
13/05/2019	47.00	1.23
14/05/2019	66.25	1.43
15/05/2019	64.71	0.89
16/05/2019	60.88	0.80
17/05/2019	45.42	0.67
18/05/2019	35.42	0.64
19/05/2019	41.92	0.51
20/05/2019	71.83	1.07
21/05/2019	71.29	1.25
22/05/2019	61.46	0.68
23/05/2019	81.42	0.93
24/05/2019	57.00	0.59
25/05/2019	49.88	0.63
26/05/2019	36.00	0.40
27/05/2019	46.33	0.51
28/05/2019	64.75	0.92
29/05/2019	48.96	0.97
30/05/2019	61.96	0.84
31/05/2019	43.83	0.61
01/06/2019	31.63	0.41

02/06/2019	29.38	0.39
03/06/2019	28.83	0.49
04/06/2019	25.71	0.66
05/06/2019	28.04	0.83
06/06/2019	33.38	0.75
07/06/2019	42.50	0.84
08/06/2019	41.46	0.68
09/06/2019	42.46	0.69
10/06/2019	51.25	1.41
11/06/2019	23.96	0.43
12/06/2019	48.63	1.11
13/06/2019	20.54	0.51
14/06/2019	31.92	0.80
15/06/2019	30.63	0.61
16/06/2019	32.50	0.56
17/06/2019	48.67	1.15
18/06/2019	43.04	0.82
19/06/2019	36.63	0.79
20/06/2019	ND	0.58
21/06/2019	44.08	1.09
22/06/2019	41.79	1.06
23/06/2019	28.71	0.54
24/06/2019	49.92	ND

De los 258 días que comprende el muestreo, solo existen datos de 235 días para las concentraciones de PM₁₀ y 257 para concentraciones de CN.

De estos contaminantes solamente las partículas suspendidas PM₁₀ se encuentran normadas en México por lo que se realizó una gráfica donde se representan las concentraciones diarias que superan los valores propuestos por la normativa nacional (NOM-025-SSA1-2014: 70 µg/m³) e internacional (Guías de calidad del aire de la OMS: 50 µg/m³).



De las concentraciones registradas para las partículas PM₁₀, 21 días de los 235 días registrados (8.9 %) superan el límite establecido por la normativa nacional NOM-025-SSA1-2014 y 113 de los 235 (48 %) superan el límite propuesto por la OMS el cual protege de riesgos a la salud humana ocasionada por este tipo de partículas; sin embargo, se reconoce que el promedio diario puede no ser suficiente para proteger a la salud, pues pueden existir episodios de 3 h o más con concentraciones superiores al valor límite permisible, representando una grave exposición aguda a este contaminante, por ello en la tabla 13, se representan estos episodios durante el periodo de muestreo.

Tabla 12. Registro de episodios de concentraciones superiores al límite permisible de PM₁₀.

Episodios de altas concentraciones de PM₁₀ y CN					
Fecha	Duración del episodio (h)	Velocidad del viento (m/s)	Concentración promedio de PM₁₀ (µg/m³)	Concentración promedio de CN (µg/m³)	Procedencia de los vientos
13/10/2018	3	0.40	89	7.20	NE, E y S
	7	1.03	115.85	4.87	NE, E y SE
24/10/2018	3	1.67	105	2.13	E, SE y SO
31/10/2018	5	0.31	114.17	2.50	E, S y O
	5	0.99	162.67	8.06	E, SE, S y SO
02/11/2018	4	0.74	109.75	6.49	SO y O
03/11/2018	5	2.40	91.20	2.30	SE, SO y NO
06/11/2018	6	1.03	141.83	4.22	E, SE, S y NO
08/11/2018	6	1.21	105.17	3.65	E
09/11/2018	3	0.95	84.67	1.95	S, SO y NO
12/11/2018	5	1.12	135.50	4.43	E, S y NO
16/11/2018	7	0.68	118	3.42	E, SE, SO y N
17/11/2018	8	0.87	92.38	3.12	E, SE y S
	3	0.87	92.38	3.12	SE y SO
18/11/2018	5	0.62	114.40	2.58	E, SE y N
20/11/2018	3	1.14	88.67	1.89	NE y E

21/11/2018	7	1.58	97.13	2.49	NE, E y SE
22/11/2018	4	0.93	163.75	3.51	SE, S y NO
23/11/2018	3	0.53	92.75	2.41	O y NO
	5	0.77	179.40	5.41	N, NE, E y SO
24/11/2018	5	1.79	111.60	2.74	E, S y SO
25/11/2018	3	0.94	89.75	2.23	S y SO
27/11/2018	3	1.66	80	2.82	NE, E y SE
03/12/2018	6	0.98	164.50	4.33	E, y S
06/12/2018	6	1.12	98.50	2.13	NE, SE y S
07/12/2018	7	0.80	103.90	3.40	E, SE y O
11/12/2018	8	1.36	95.30	2.99	E, SE y SO
12/12/2018	9	0.92	128.80	5.80	N, E, SE y SO
17/12/2018	5	1.18	160.60	3.08	E y SE
	4	0.68	85	2.02	S, O y NO
18/12/2018	4	0.56	128.00	4.02	O y NO
07/01/2019	5	0.33	112.40	2.67	E, SE, S y SO
08/01/2019	4	0.19	98.75	3.57	N, NE, E y O
10/01/2019	4	0.53	102.40	4.87	NE, SE, O y NO
11/01/2019	7	0.73	147.14	6.54	NE, E y SO
15/01/2019	3	1.05	101.67	3.23	SE, S y SO

16/01/2019	6	1.01	95	4.31	E, SE, y S
21/01/2019	7	1.46	135.43	2.74	E y SE
22/01/2019	3	4.19	83	0.52	SO y O
25/01/2019	4	1.82	92.25	1.21	E, SE y S
26/01/2019	5	1.87	100.20	4.31	E y O
28/01/2019	5	1.34	164.20	3.81	N, NE, E, SE y O
29/01/2019	4	3.14	122.50	2	E y SE
30/01/2019	5	1.58	118	3.89	E, S y O
31/01/2019	4	2.56	111.20	4.88	NE, E y O
02/02/2019	4	0.68	102.50	7.52	NE, E y NO
	4	1.26	125	5.07	E y SE
03/02/2019	3	1.06	156.33	4.10	NE, E y S
05/02/2019	3	ND	160	4.11	NE y SO
06/02/2019	5	1.21	132.20	4.43	SE, S, SO y NO
07/02/2019	6	1.11	128	2.01	NE, E, SE, S y SO
	4	5.20	161.75	0.84	E
12/02/2019	7	2.74	91	1.62	E, SE y SO
14/02/2019	3	0.26	105.33	1.79	SE y SO
16/02/2019	5	1.27	149.60	2.69	E, SE y S
19/02/2019	4	1.42	112.75	5.99	SE y SO

	4	6.24	156	0.37	SO
21/02/2019	5	5.75	98.80	0.32	SO
25/02/2019	5	1.26	102	1.52	E y SE
	3	2.22	93.67	1.20	E y SE
26/02/2019	6	0.51	136.67	4.08	E, SE, S y O
27/02/2019	4	0.67	101.50	2.51	E y SE
28/02/2019	3	0.85	92.75	3.01	S, O y NO
	7	0.95	147.71	4.28	NE, E, SE, S y SO
01/03/2019	4	1.10	85.50	1.12	SE y S
02/03/2019	3	1.07	97.25	1.50	E y SE
03/03/2019	3	4.83	125	0.55	E
04/03/2019	5	1.87	80	1.01	E, SE y NO
05/03/2019	3	2.14	84.67	1.97	E, SE y S
06/03/2019	5	1.75	97.40	2.33	SE y S
07/03/2019	7	0.80	129	6.51	NE, E y SE
09/03/2019	5	1.15	97.80	1.80	E, SE y S
11/03/2019	13	3.82	102	0.89	E, SE, O y NO
12/03/2019	11	2.94	85.92	1.01	NE, E, SE y S
13/03/2019	8	6.85	138	0.51	SO y O
14/03/2019	3	5.07	144.67	0.77	E

15/03/2019	5	5.87	122.20	0.55	E
18/03/2019	3	3.25	95	0.88	S y O
22/03/2019	5	1.74	93.80	1.61	NE, SE y SO
27/03/2019	3	2.24	79.33	1.27	E y SE
28/03/2019	6	1.37	101.83	2.05	E y SE
29/03/2019	4	0.75	104	2.83	E y SE
30/03/2019	6	0.98	106.83	3.78	E, SE, S y O
31/03/2019	3	4.43	94	0.56	E
01/04/2019	4	2.47	85.20	1.52	SE, S y O
02/04/2019	5	1.34	115.80	3.45	E, SE y S
05/04/2019	3	0.74	102.33	1.45	SE y SO
06/04/2019	4	5.20	87	0.44	SO
10/04/2019	4	1.59	188	1.78	E y S
11/04/2019	4	5.18	79.75	0.41	SO
15/04/2019	6	2.86	119.17	1.31	E y SE
	3	4.35	90	0.52	E
16/04/2019	7	0.79	137.86	3.09	NE, E, S y SO
21/04/2019	3	1.77	94.67	1.03	E y S
22/04/2019	5	1.59	108.60	1.34	E y SE
23/04/2019	5	1.17	119.60	3.21	E, SE y SO

24/04/2019	3	5.15	81	0.37	SO
27/04/2019	3	1.03	96.67	1.39	SE y SO
28/04/2019	3	0.84	113	2.54	SO, O y NO
	4	1.61	90	1.54	E y SO
30/04/2019	8	1.09	140	3.29	N, E, SE, S, SO y O
01/05/2019	5	0.82	164.60	4.81	E, SE
02/05/2019	3	1.10	90.300	1.02	SE y S
03/05/2019	3	1.72	85	1	S y SO
04/05/2019	8	0.80	128	6.71	E, SE, S y SO
06/05/2019	4	1.94	112.75	1.62	E, S y SO
07/05/2019	3	1.04	98	1.42	S, O y NO
08/05/2019	4	6.21	190	0.45	SO
11/05/2019	3	1.89	77	1.04	NE y SE
	4	0.83	86.50	1.43	SO, O y NO
13/05/2019	4	0.93	98.50	2	E, SE y S
14/05/2019	5	1.20	113.80	3.02	NE, E y SO
15/05/2019	4	2.88	79.25	0.85	E
16/05/2019	7	1.43	85.57	1	NE, E, SE, S y SO
20/05/2019	7	1.04	109.14	1.25	SE, S y O

22/05/2019	3	5.15	104.67	0.98	E y SE
23/05/2019	9	1.34	110.56	1.26	NE, E, SE, S y O
24/05/2019	3	2.28	85	0.55	E
27/05/2019	3	1.70	80.67	0.61	E y SE
28/05/2019	6	1.35	108.67	1.68	E, SE, S y O
07/06/2019	3	0.62	82.33	1.71	E, SE y O
10/06/2019	3	1.76	119.33	5.52	E y S
17/06/2019	3	1.35	78.50	1.27	E y SE

Se reportaron episodios de 3 h o más con concentraciones superiores a $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 110 días (46.8 %) del muestreo, durante los cuales se registraron episodios con concentraciones entre los $77 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en un episodio de 3 h el día 11 de mayo de 2019 y los $190 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en un episodio de 4 h el día 8 de mayo de 2019. Mientras que en duración se registraron episodios desde 3 h (38 episodios) hasta un episodio de 13 h el día 11 de marzo de 2019 con concentración media de $102 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Para representar la distribución temporal de estos episodios, se clasificaron según el número de episodios registrados por mes, así como el promedio de su duración y de la concentración de PM_{10} y CN,

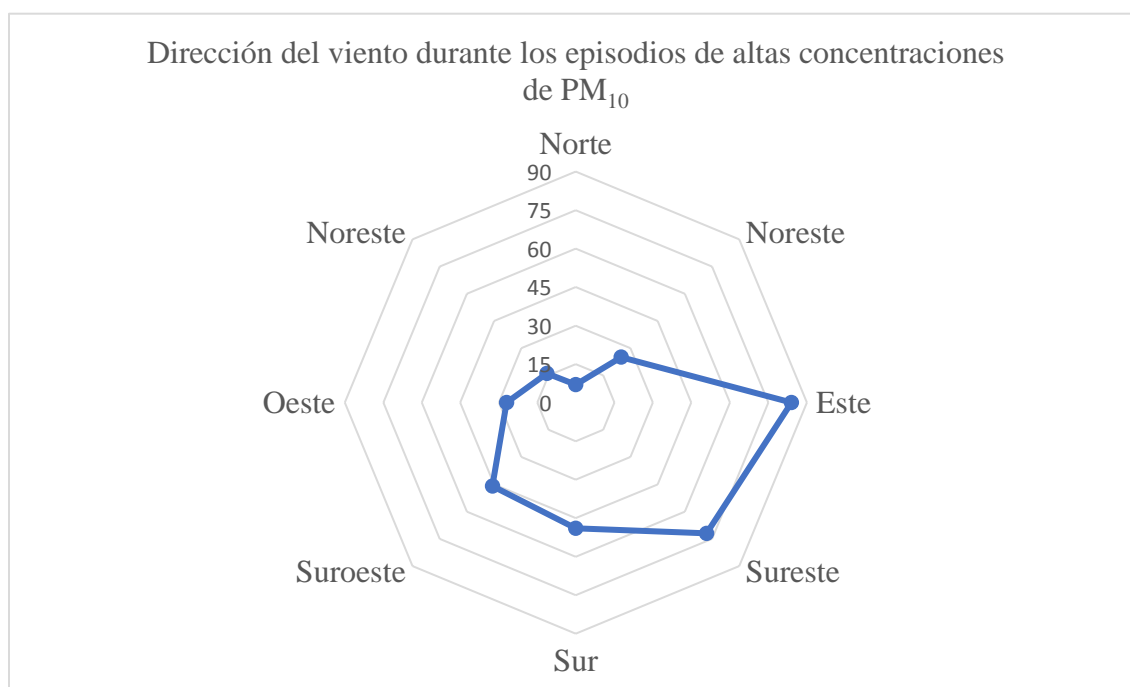
Tabla 13. Características de los episodios de altas concentraciones de PM_{10} por mes.

Mes	Número de eventos	Media de duración (h)	Concentración media PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	concentración media CN ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Octubre 2018	3	4.6	117.34	4.95
Noviembre 2018	16	4.7	110.46	3.27
Diciembre 2018	7	6.1	120.58	3.47
Enero 2019	14	4.7	113.15	3.47
Febrero 2019	14	4.4	123.87	3.02
Marzo 2019	20	5.2	103.21	1.68
Abril 2019	15	4.3	108.74	1.69
Mayo 2019	18	4.6	105.68	1.72
Junio 2019	3	3	93.39	2.83

Octubre y junio fueron los meses con menor cantidad de episodios registrados, siendo junio también el que reporto los de menor duración con una media de 3 h, al igual que la concentración media más bajas de PM_{10} ($93.39 \mu\text{g}/\text{m}^3$); mientras que marzo fue el mes que presento mayor número de episodios con 20; diciembre fue el mes con los episodios de mayor duración, con una media de 6 h con una concentración media de PM_{10} de $120.58 \mu\text{g}/\text{m}^3$; sin

embargo el mes con los episodios de mayor concentración media fue febrero con una media de $123.87 \mu\text{g}/\text{m}^3$ por episodio.

Dentro del registro de concentraciones de igual manera se identificó la dirección del viento durante los episodios de altas concentraciones, demostrando que la mayoría de los episodios suceden cuando la dirección del viento es Este y Sureste principalmente.

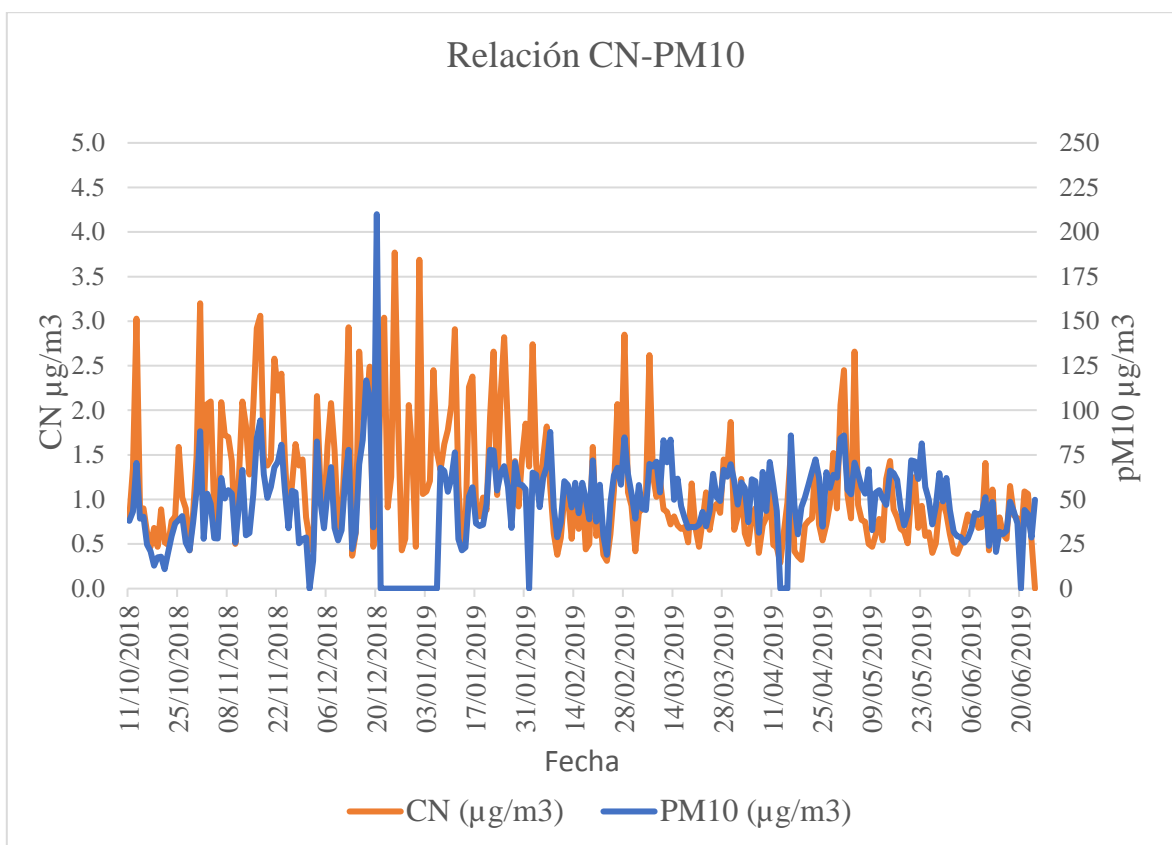


Recurriendo a la ubicación espacial del sitio de monitoreo, se determinó la fuente principal de este contaminante, la cual aporta a las altas concentraciones de PM_{10} ($\geq 75 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Se registraron 107 (86.99 %) episodios con dirección del viento NE y E, siendo la principal fuente asociada a esta dirección la actividad ladrillera; 139 episodios (96.74 %) con dirección SE y S, la principal fuente asociada en esta dirección es la actividad industrial y el tránsito vehicular; 43 episodios (34.95 %) con dirección SO, la principal fuente asociada en esta dirección es el tránsito vehicular, otra fuente que aportó gran cantidad de este contaminante en esta dirección fue el incendio de la Sierra de San Miguelito, el cual comenzó el 17 de abril de 2019 y fue mitigado el día 23 de mayo de 2019 (PMPCA, 2019); 29 episodios (23.57 %)

con dirección del viento O, la principal fuente emisora asociada es la planta de Industrial Minera México (IMMSA).

4.2 Comportamiento ambiental con base a la temporalidad de PM₁₀ y CN

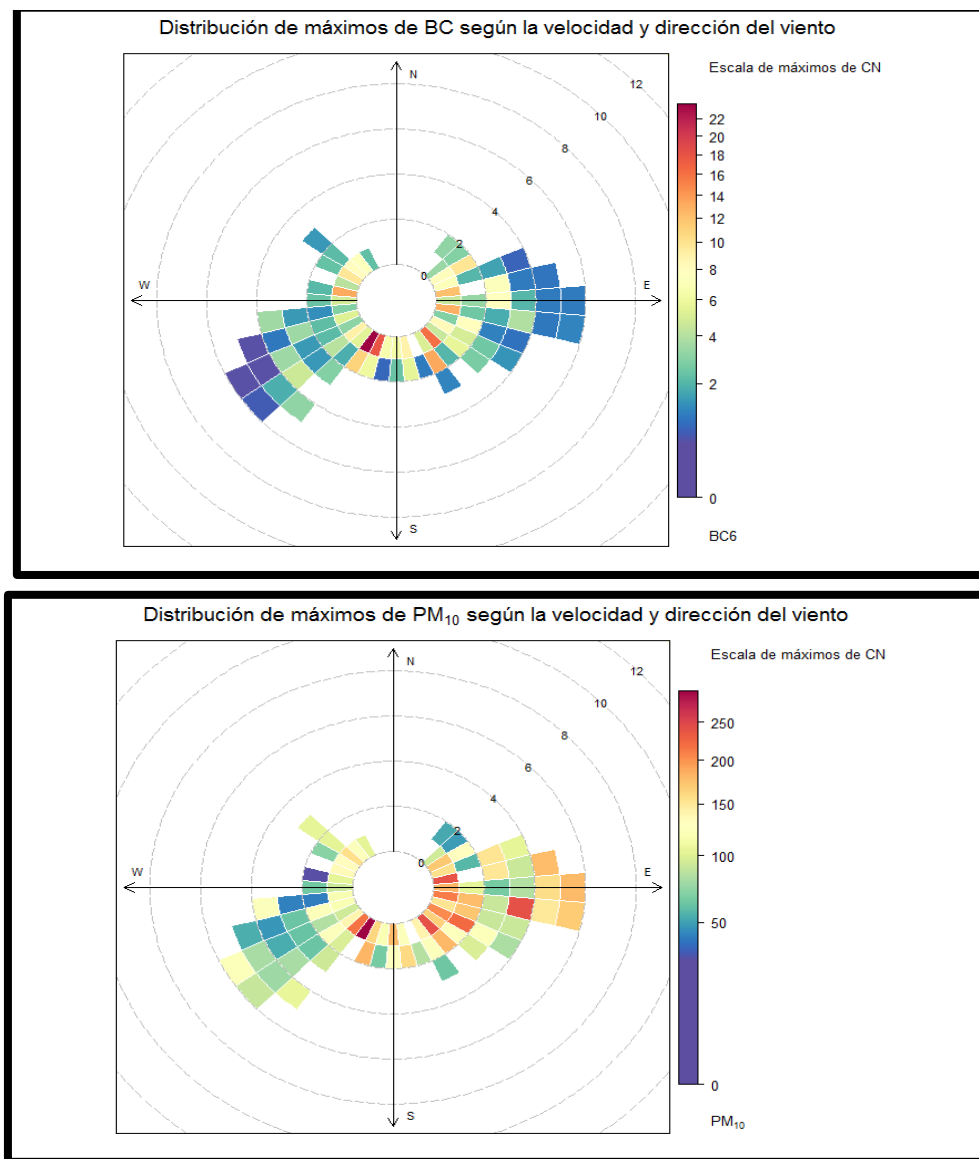
Con los datos diarios obtenidos de las partículas suspendidas PM₁₀ y del carbono negro, se realizó una gráfica como representación visual de la relación CN/ PM₁₀



La relación identificada entre ambos tipos de partícula revela que comparten el mismo comportamiento por parte de las fuentes que comparten, pues se aprecia claramente como con el incremento en las concentraciones de PM₁₀ las concentraciones de CN tienden a aumentar en la mayoría de los incrementos de PM₁₀, corroborando la hipótesis que comparten el mismo tipo de fuentes, las cuales figuran como principal la actividad ladrillera.

En cuanto a la distribución y procedencia de las partículas PM_{10} y CN se realizó un gráfico de distribución para identificar la dirección de procedencia de estos contaminantes en función a la velocidad del viento presente durante el muestreo, de esta manera se logró observar un comportamiento similar en ambos contaminantes atmosféricos, indicando una similitud dentro de sus fuentes de emisión y comportamiento sobre el área de estudio.

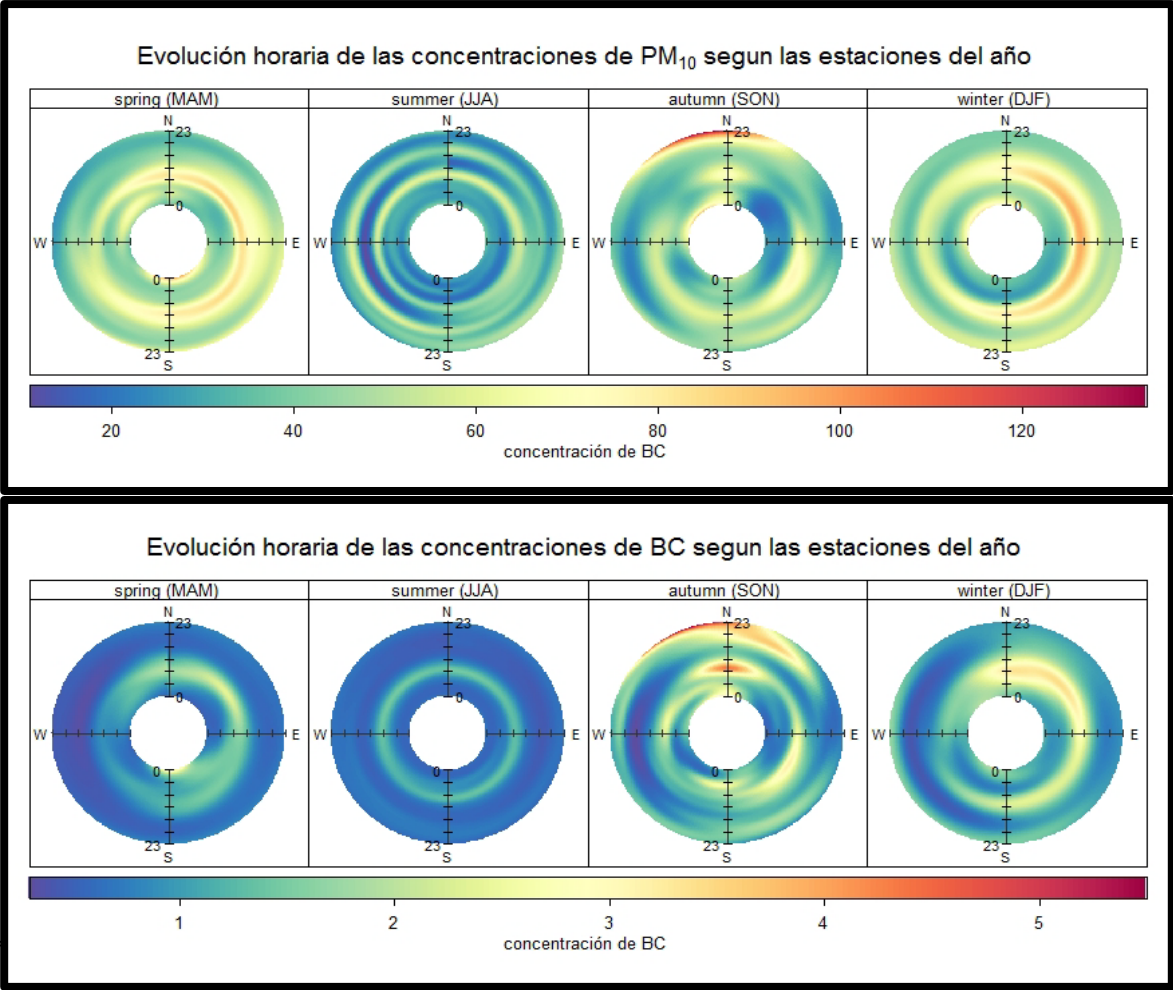
Figura 15. Gráficas polares de frecuencias para PM_{10} y CN.



Las gráficas polares muestran la dirección del viento predominante de la cual provienen los contaminantes (SO, E y SE), al igual de la velocidad del viento presente, de lo registrado se encontró que las mayores concentraciones se registran a velocidades entre los 2 y 4 ms, identificando las condiciones que dominan sobre las concentraciones ambientales de partículas suspendidas PM_{10} y CN en la ciudad de San Luis Potosí.

Las mismas similitudes se mantiene constantes durante los diferentes meses del muestreo, mediante a la gráfica temporal polar se puede observar el comportamiento horario de las concentraciones de PM_{10} y CN, su comportamiento de emisión al señalar las direcciones donde se orinan mayores concentraciones.

figura 17. Gráficas polares temporal para PM_{10} y CN



*JJA: Junio, Julio y Agosto

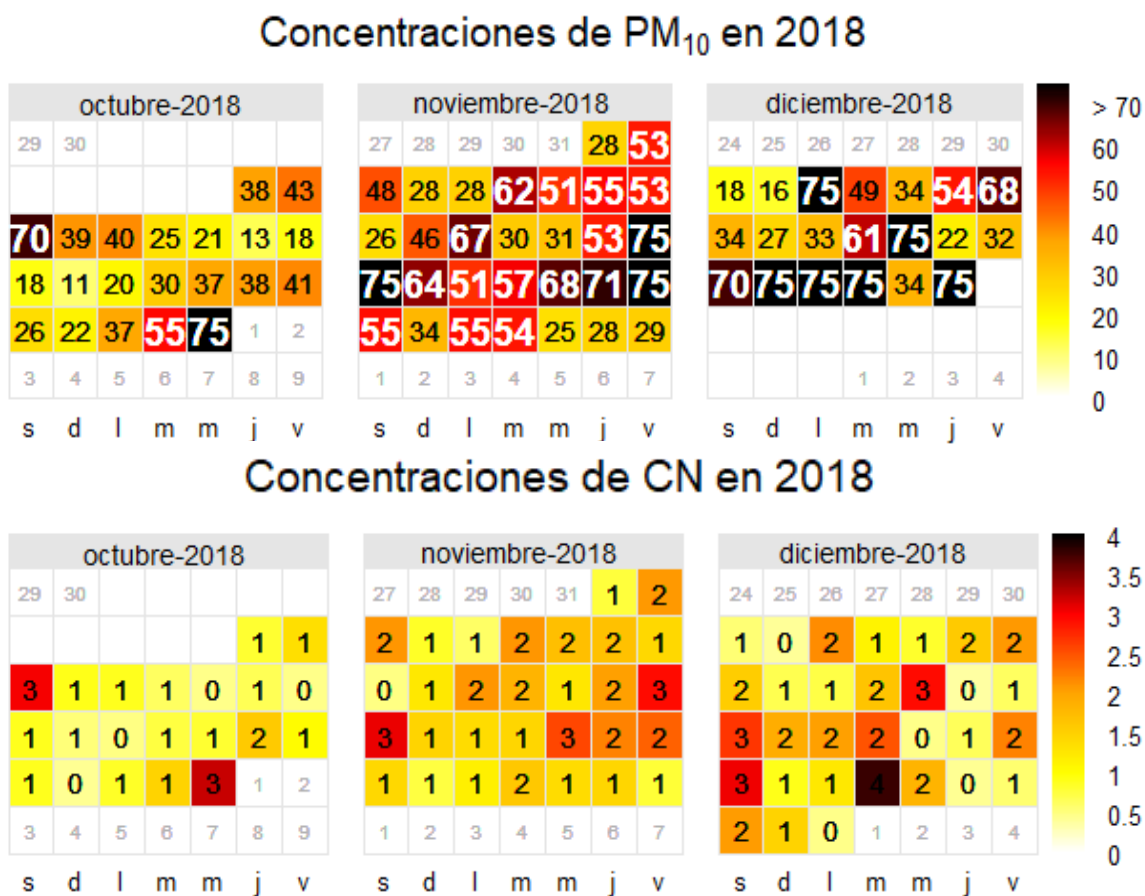
*SON: Septiembre, Octubre y Noviembre

*DJF: Diciembre, Enero y Febrero

Con las gráficas polares temporales, se identificó como el comportamiento ambiental de las partículas para cada hora del día y como estas condiciones, las fuentes y el comportamiento varían según la estación del año, identificando que los contaminantes provienen del norte, noreste y este principalmente en horarios entre las 8:00 – 12:00 h y 20:00 – 24:00 h, alcanzando mayores concentraciones durante el otoño e invierno.

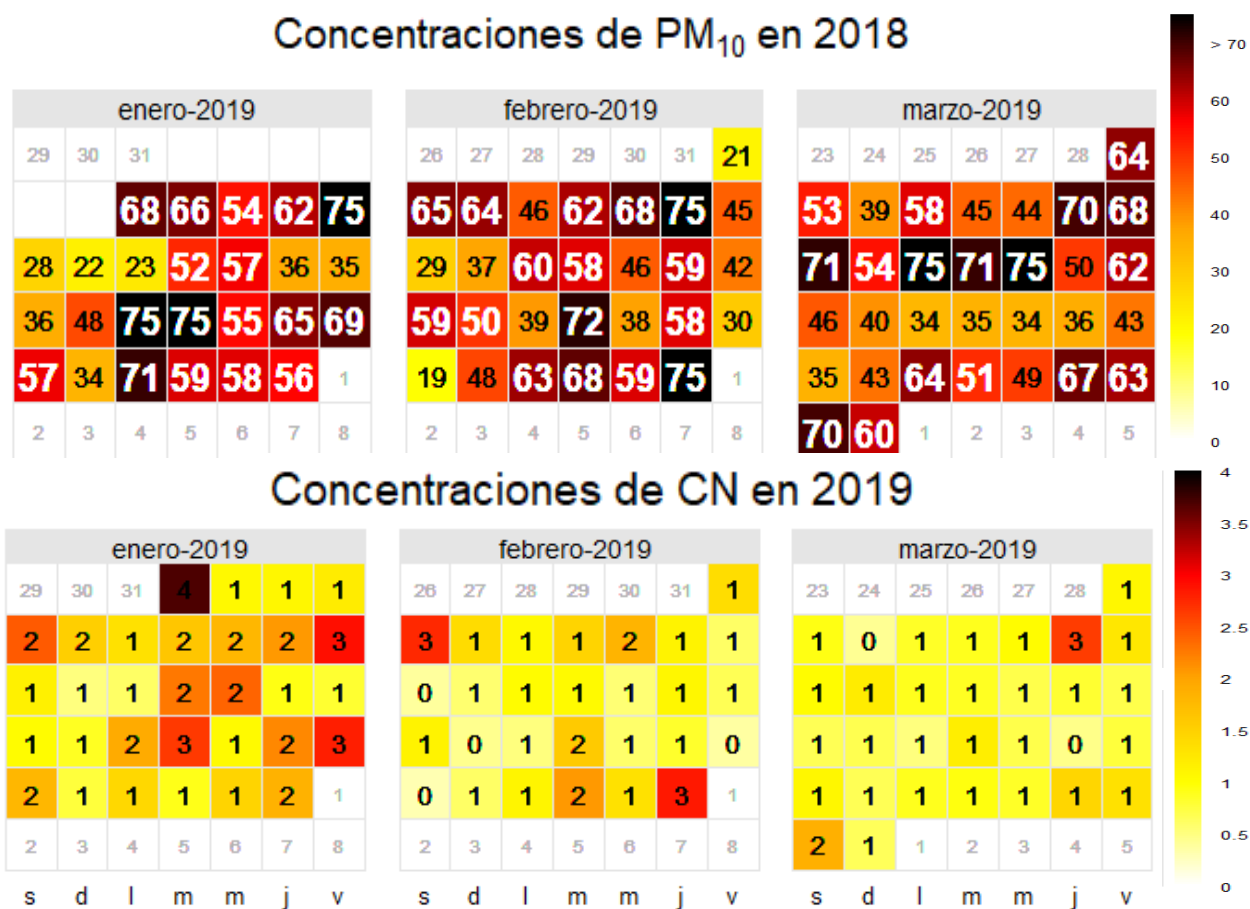
A su vez, las concentraciones diarias de PM₁₀ y CN se representaron dentro de un calendario donde se identifica de manera visual los días con mayores concentraciones.

figura 18. Gráficas de calendario de PM₁₀ y CN, durante el último trimestre de 2018



Las graficas calendario nos permiten ver de maera visual la diferencia entre los niveles de concentración del contaminantes en cuestión y como varian a traves de los días y meses del muestreo, en este caso permiten corroborar las graficas anteriores mostrando como los días con mayor concecntración de PM₁₀, son los días con mayores concentraciones de carbono negro evidenciando la relación entre este tipo de partículas en la ciudad de San Luis Potosí.

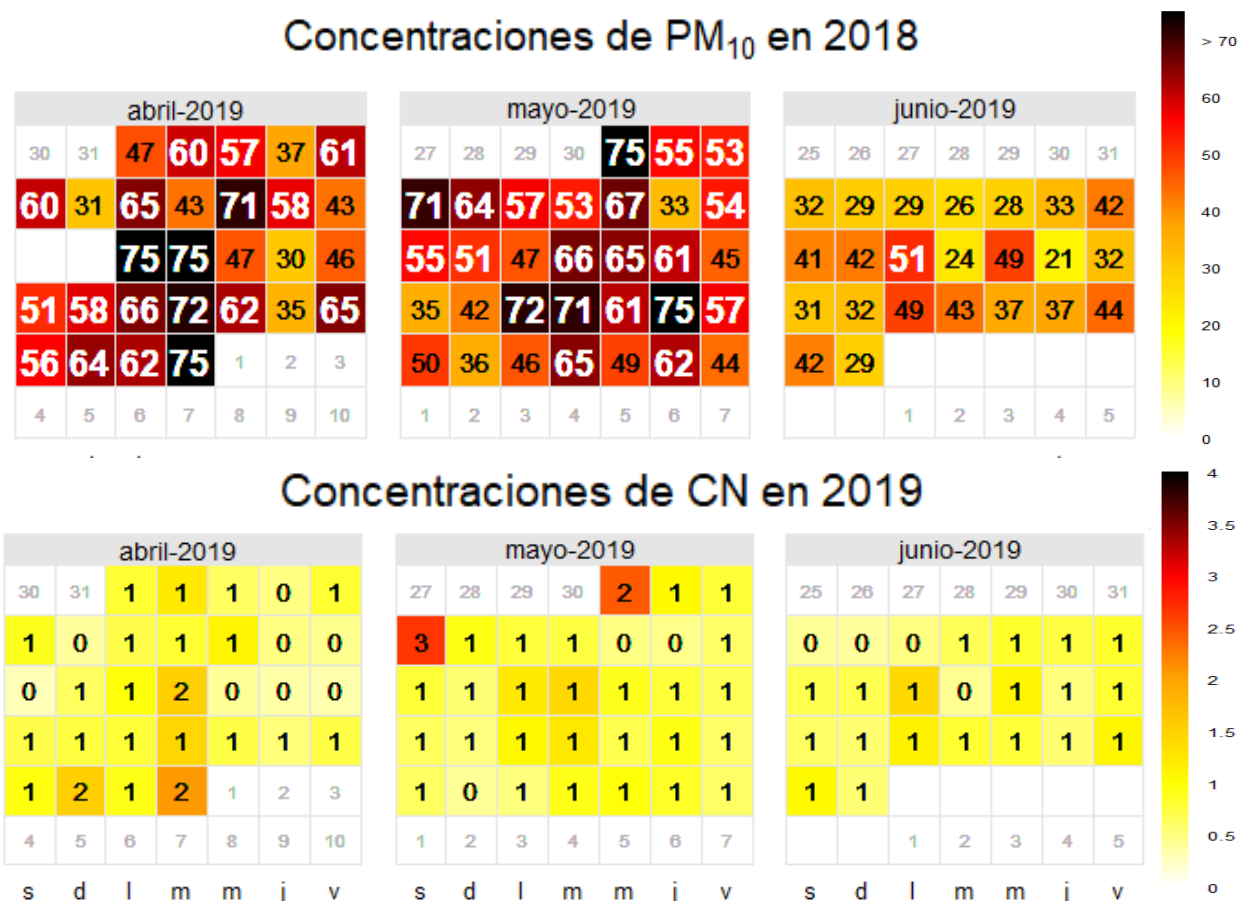
figura 19. Gráficas de calendario de PM₁₀ y CN, durante el primer trimestre de 2019



Durante el primer trimestre del año 2019, la relación entra las partículas PM₁₀ y el carbono negro sigue siendo visible y observable gracias a este tipo de gráfico, aunque en algunos días la relación no es tan fuerte como en meses anteriores, pues aunque días como el 07/febrero/2019 que existe una alta concentración de PM₁₀ la concentración de CN no es tan alta como en días anteriores, indicando que días como estos la fuente principal no es la misma

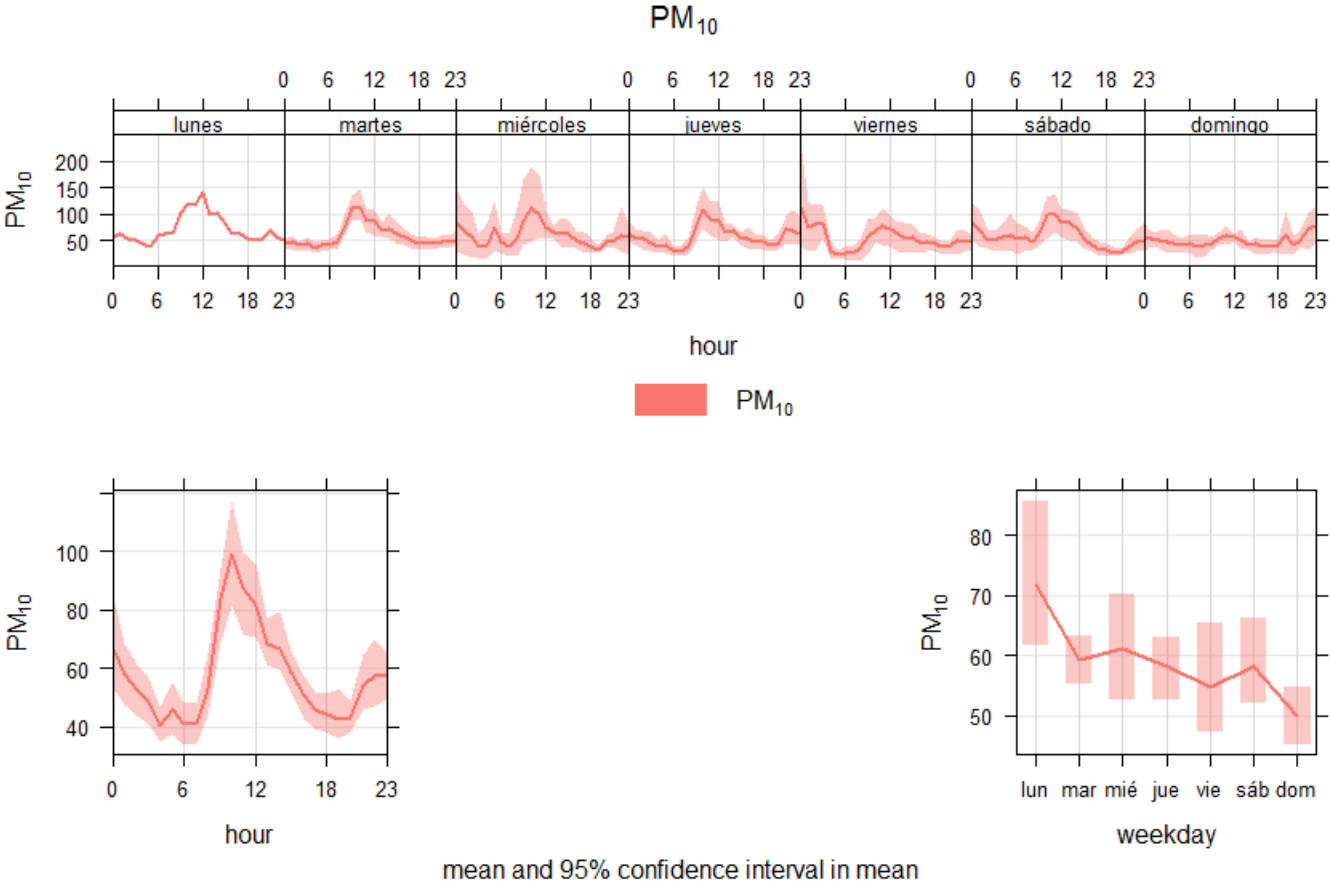
para ambos contaminantes, o posiblemente otra fuente que proviene de otra dirección gracias a los vientos predominantes de ese día pudo ser superior a las fuentes habituales.

figura 20. Gráficas de calendario de PM_{10} y CN, durante el segundo trimestre de 2019



Durante el segundo trimestre del año 2019 la asociación entre las concentraciones de PM_{10} con las de carbono negro es visiblemente decreciente en la ciudad de San Luis Potosí, lo que sugiere algún cambio en las fuentes emisoras, como cambios en los combustibles, cambios en la dirección de los vientos predominantes resaltando otro tipo de fuentes o simplemente los cambios ambientales modifican la interacción de los contaminantes presentes en la zona.

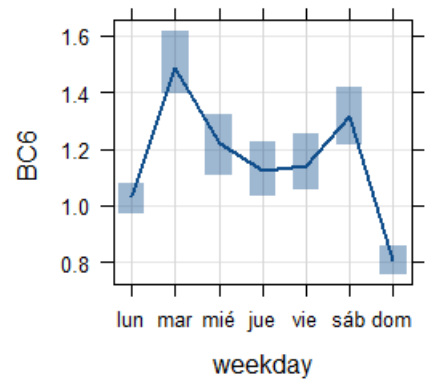
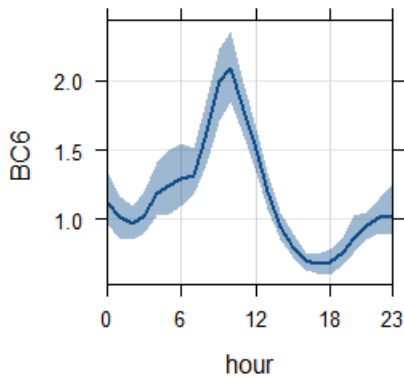
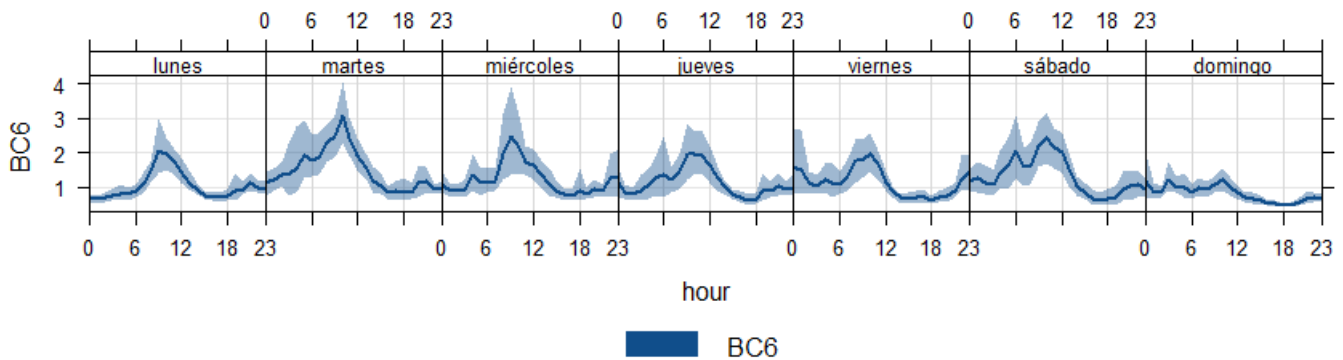
De manera integral se graficó el comportamiento de las concentraciones de ambos contaminantes por hora para cada día de la semana, por día de la semana y mensualmente; con el objetivo de tener un registro sobre su comportamiento temporal.



mean and 95% confidence interval in mean

Con este tipo de gráficos se aprecia el comportamiento temporal de las contaminantes, en el caso de las partículas PM₁₀ en la escala por día y semana así como para cada día de la semana, permitiendo identificar los horarios en los cuales las concentraciones tienden a aumentar, los cuales son entre las 8:00 am, alcanzando las máximas concentraciones poco antes del mediodía 11:00 am, para comenzar a decrecer; lo que resalta que las fuentes emisoras mantienen mayor actividad durante estos lapsos de hora, pero este comportamiento varía según el día de la semana, siendo mayor entre semana específicamente el día lunes con una disminución gradual conforme pasan los días.

Carbono negro



mean and 95% confidence interval in mean

El mismo gráficos se realizó para registrar el comportamiento del carbono negro en la escala por día y semana así como para cada día de la semana, permitiendo identificar los horarios en los cuales las concentraciones tienden a aumentar, los cuales son entre las 8:00 am, alcanzando las máximas concentraciones poco antes del mediodía 11:00 am, para comenzar a decrecer; lo que resalta que las fuentes emisoras mantienen mayor actividad durante estos lapsos de hora, pero este comportamiento varía según el día de la semana, el cual a diferencia de las PM_{10} , se registró que los días martes son los que se registraron mayores concentraciones, disminuyendo los días subsecuentes, hasta llegar a los días sábados, donde se registró un segundo repunte de las concentraciones de CN.

4.3 Concentración de Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos contenidos en fase de partícula PM₁₀.

Del total de 43 filtros cargados con partículas PM₁₀, solamente se lograron analizar 11 filtros para la caracterización de los HAP's presentes en esta fracción de partículas.

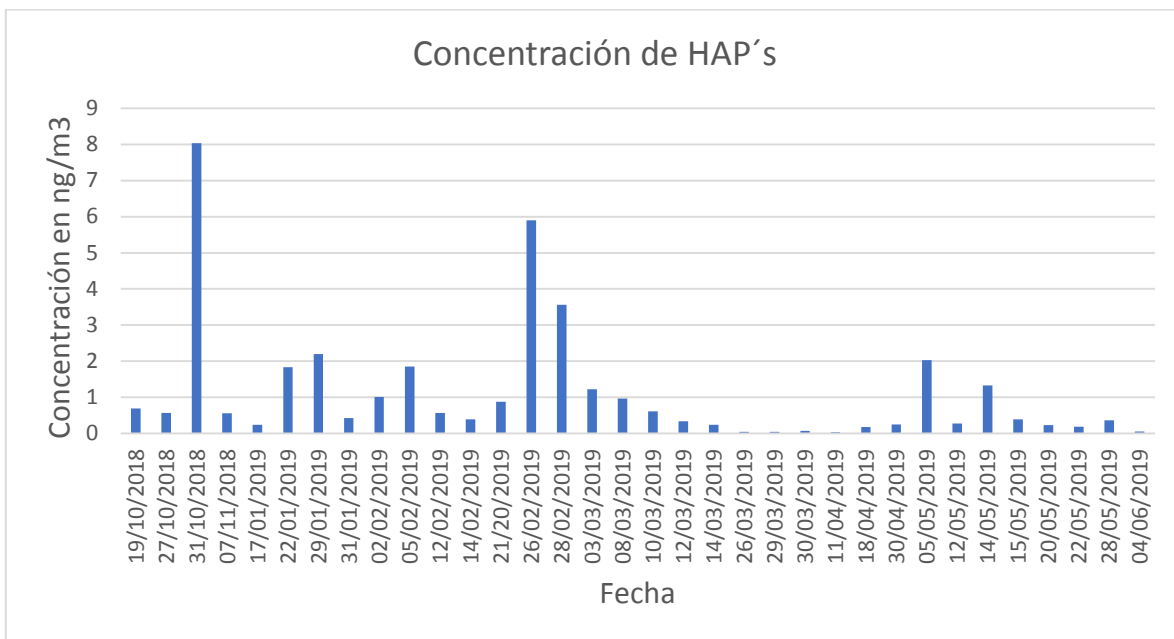
Tabla 14. Concentraciones de la mezcla de HAP's contenidos en la fracción PM₁₀.

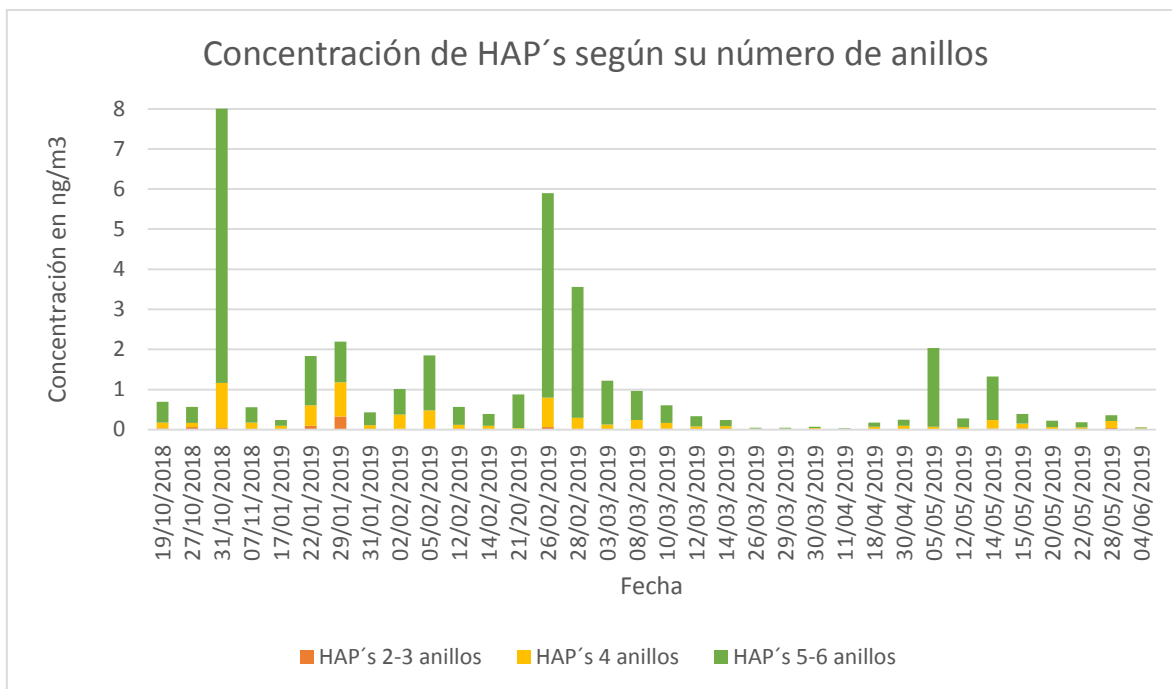
Fecha de muestreo	Número de filtro	PM₁₀ (µg/m³)	Carbono negro (µg/m³)	Σ 15 HAP'S (ng/m³)
13/10/2018	1	70.46	3.03	-
16/10/2018	2	24.75	0.63	-
19/10/2018	3	17.57	0.47	0.69
27/10/2018	4	25.79	0.90	0.57
31/10/2018	5	88.33	3.20	8.03
07/11/2018	6	50.63	1.72	0.56
17/01/2019	7	36.46	0.94	0.24
22/01/2019	8	77.53	2.66	1.84
25/01/2019	9	68.75	2.82	-
29/01/2019	10	58.63	0.92	2.19
31/01/2019	11	55.75	1.85	0.43
02/02/2019	12	65.17	2.74	1.01
05/02/2019	13	62.21	1.47	1.85
07/02/2019	14	87.96	1.14	-
12/02/2019	15	58.46	1.06	0.57

14/02/2019	16	59.38	1.10	0.39
19/02/2019	17	71.88	1.59	-
21/02/2019	18	58.29	0.83	0.88
26/02/2019	19	67.83	2.07	5.90
28/02/2019	20	84.88	2.85	3.56
03/03/2019	21	39.29	0.42	1.22
06/03/2019	22	44.04	1.03	-
08/03/2019	23	68.50	1.27	0.96
10/03/2019	24	54.04	1.22	0.61
12/03/2019	25	70.75	0.86	0.34
14/03/2019	26	49.79	0.81	0.24
26/03/2019	27	51.21	0.95	0.05
29/03/2019	28	62.83	1.33	0.05
30/03/2019	29	69.83	1.87	0.07
11/04/2019	30	60.17	0.90	0.03
18/04/2019	31	57.96	0.49	0.17
30/04/2019	32	30.46	0.36	0.25
05/05/2019	33	84.21	2.06	2.03
07/05/2019	34	64.38	0.94	-
12/05/2019	35	53.17	0.75	0.27
14/05/2019	36	50.54	0.54	1.33
15/05/2019	37	66.25	1.43	0.39

19/05/2019	38	41.92	0.51	-
20/05/2019	39	71.83	1.07	0.23
22/05/2019	40	61.46	0.68	0.18
28/05/2019	41	64.75	0.92	0.36
30/05/2019	42	61.96	0.84	-
04/06/2019	43	25.71	0.66	0.05

De los 36 filtros analizados para la caracterización de 15 de los 16 HAP's prioritarios por la EPA, se registró una concentración media de 1.13ng/m³ y una concentración máxima de 8.03 ng/m³.





Se identificó que el día 31 de octubre de 2018 como el que presentó mayor cantidad de HAP's contenidos en partículas PM_{10} , siendo los HAP's de 5 y 6 anillos los más abundantes dentro de la muestra analizada.

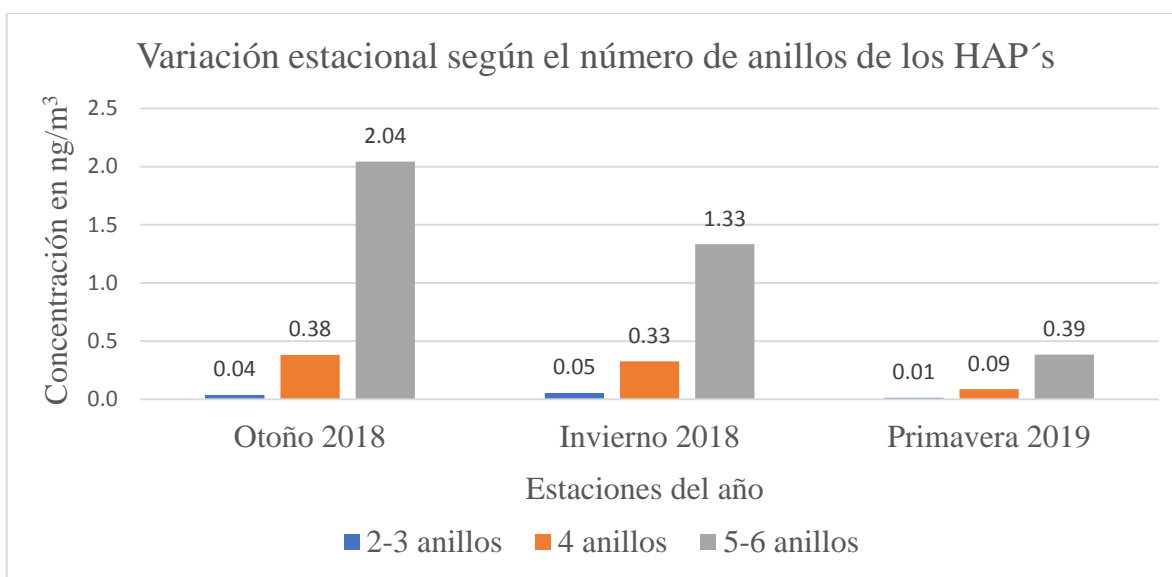
Durante el muestreo se abarcaron 3 estaciones del año, otoño 2018, invierno 2018 y primavera 2019; para observar si existen cambios en la composición de la mezcla de los HAP's se promediaron sus concentraciones para cada una de las estaciones muestreadas, los resultados se observan en la tabla 16.

Tabla 15. Concentraciones de HAP's en partículas PM₁₀

HAP's	OTOÑO (N=4)		INVIERNO (N=11)		PRIMAVERA (N=18)		MUESTREO (34)	
	(ng/m ³) – (%)		(ng/m ³) – (%)		(ng/m ³) – (%)		(ng/m ³) – (%)	
Naftaleno	0.009	0.36	0.025	1.46	0.003	5.10	0.011	1
Acenaftileno	0.010	0.40	0.002	0.12	0.002	0.41	0.003	0.27
Acenafteno	0.0004	0.01	0.002	0.12	0.0004	0.08	0.001	0.09
Fluoreno	0.002	0.08	0.005	0.29	0.002	0.41	0.003	0.27
Fenantreno	0.014	0.56	0.017	0.99	0.007	1.43	0.011	1
Antraceno	0.002	0.08	0.003	0.18	0.001	0.20	0.002	0.18
Fluoroanteno	0.050	2.03	0.033	1.93	0.013	2.65	0.023	2.09
Pireno	0.060	2.43	0.040	2.34	0.014	2.86	0.028	2.54
Benzo(a) Antraceno	0.177	6.91	0.179	10.47	0.035	7.14	0.098	8.90
Criseno	0.095	3.86	0.074	4.33	0.026	5.31	0.049	4.45
Benzo(b) fluoranteno	0.564	22.92	0.389	22.75	0.103	21.02	0.247	22.45
Benzo(a) pireno	0.542	22.03	0.619	36.20	0.157	32.04	0.347	31.54
Dibenzo(a,h)antraceno	0.028	1.13	0.009	0.53	0.004	0.82	0.008	0.72
Indeno(1,2,3-c,d) pireno	0.533	21.66	0.187	10.94	0.060	12.24	0.155	14.09
Benzo(g,h,i) pirileno	0.377	15.32	0.129	7.54	0.061	12.45	0.119	10.81
∑ HAP'S	2.46	100	1.71	100	0.49	100	1.10	100
B(a)P_{eq}	0.70	-	0.71	-	0.18	-	0.41	-

Se observó que los HAP's dominantes durante el otoño presentes en partículas PM₁₀, fueron el indeno(1,2,3-c,d)pireno, benzo(b)fluoroanteno y benzo(a)pireno con un 21.66 %, 22.92 % y 22.03 %; durante el invierno fue el benzo(a)pireno el que presentó mayor abundancia con un 36.20 % de la mezcla, al igual que en la primavera de 2019, donde representó un 31.54 % de la mezcla.

Al tener una composición ligeramente diferente entre las estaciones, la toxicidad de la mezcla de los 15 HAP's también se ve modificada, siendo el invierno la estación que presentó mayor toxicidad con una concentración promedio de 0.71 ng/m³ en benzo(a)pireno equivalente.



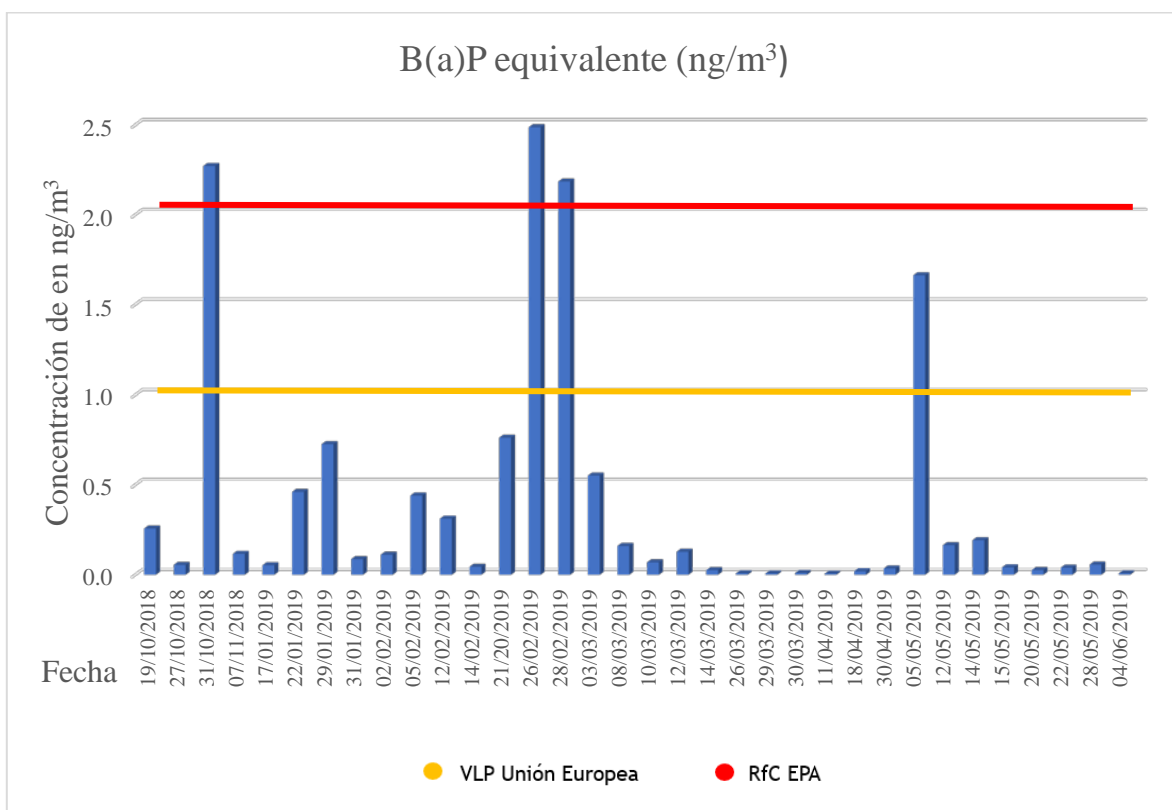
4.4 Estimación del riesgo a la salud humana por Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos.

Además de estimar los principales tipos de fuentes y sus combustibles se realizó una estimación del riesgo no cancerígeno asociado a salud para las concentraciones de los HAP's de estos se consideró la mayor concentración registrada bajo la premisa precautoria de las evaluaciones de riesgo que asume máximo riesgo, la cual se registró el día 31 de octubre de 2018.

Tabla 16. Equivalencia a B(a)P de cada uno de los HAP's caracterizados

HAP	Concentración ng/m ³	TEF	BaP _{eq}
Naftaleno	0.002	0.001	0.000002
Acenaftileno	0.007	0.001	0.000007
Acenafteno	0.0002	0.001	0.0000002
Fluoreno	0.002	0.001	0.000002
Fenantreno	0.027	0.001	0.000027
Antraceno	0.004	0.01	0.000040
Fluoroantraceno	0.153	0.001	0.000153
Pireno	0.188	0.001	0.000188
Benzo(a)antraceno	0.487	0.1	0.0487
Criseno	0.290	0.01	0.0029
Benzo(b)fluoroanteno	1.788	0.1	0.1788
Benzo(a)pireno	1.840	1	1.840
Dibenzo(a,h)antraceno	0.101	1	0.101
Indeno(1,2,3-CD)pireno	1.880	0.1	0.1880
Benzo(GHI)perileno	1.262	0.01	0.01262
∑ 15 HAP's	8.03		2.3724

El valor obtenido se comparó con la concentración de referencia (RfC) propuesto por la EPA que es de 2 ng/m³ el cual protege contra efectos en el desarrollo embrionario y el de la Unión Europea que es de 1 ng/m³ (EPA, 2017). El valor obtenido de la mezcla de los 15 HAP's caracterizados en equivalencia a bezo(a)pireno fue de 2.37 ng/m² el cual supera al valor de referencia de la EPA, lo cual es un indicador del posible riesgo y efectos en la salud que se pueden percibir en la población de esta zona de la ciudad, dando un cociente de peligro de 1.18.

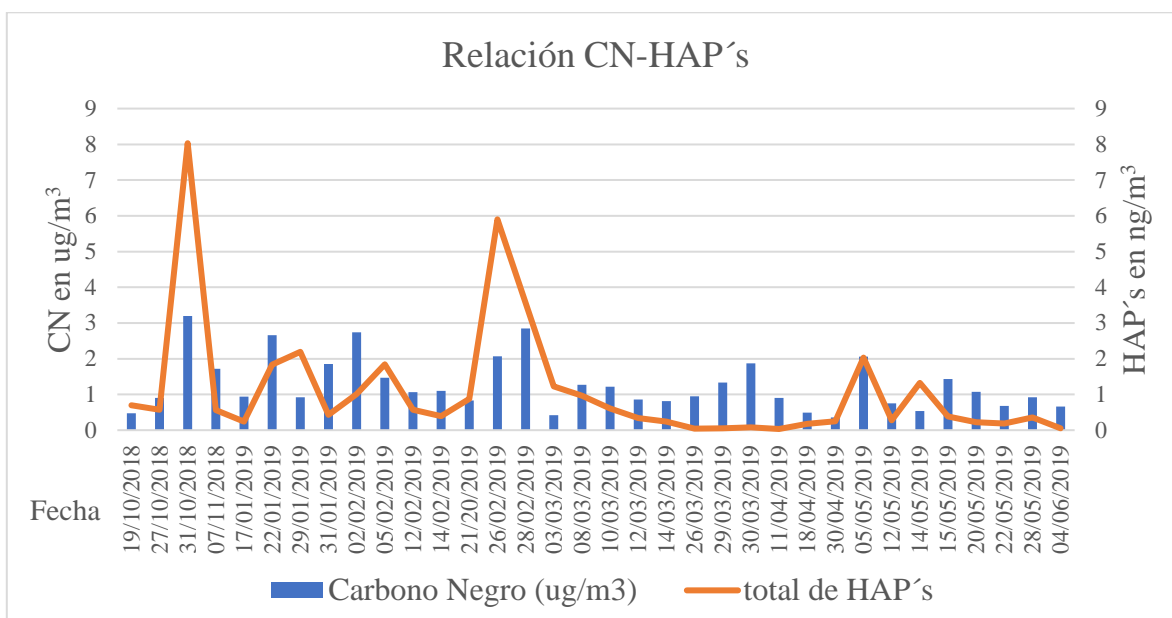


Pese a que para el cálculo de la estimación se utilizó el día con mayor concentración de HAP's, se graficaron los demás datos de los días restantes, comparando contra el valor de concentración de referencia de la EPA de 2 ng/m³ y el valor límite permisible de la Unión Europea para Benzo(a)pireno contenido en partículas PM₁₀ de 1 ng/m³, el cual es un valor el cual se estableció en base a un indicador del riesgo carcinogénico de los HAP's (Directiva 2004/107/CE, 2004). De esta manera se reportó que 3 muestras de las 34 (8.82 %) superan

esta concentración de referencia y 4 muestras de las 34 (11.76 %) superan el valor límite permisible de la Unión Europea, evidenciando el mal estado de la calidad del aire presente en la ciudad de San Luis Potosí, el cual puede representar un riesgo a la salud por las concentraciones de HAP's contenidos en partículas PM₁₀.

4.5 Relación de HAP's con carbono negro

Al igual que se graficó la relación presente entre las partículas PM₁₀ con el carbono negro, a su vez se realizó el mismo procedimiento para identificar la relación entre el carbono negro y los HAP's presentes en partículas PM₁₀, con la modificación de que no se usaron datos horarios, debido a que solo se cuenta con la concentración diaria de los HAP's.



Se identificó que el comportamiento para ambos contaminantes es similar mostrando que los días que presentan mayor concentración de CN son los que presentan una mayor concentración de HAP's reafirmando lo mencionado por otros autores que los refieren como contaminantes co-emitidos al compartir el mismo tipo de fuente (Bocanegra, 2013); (Wang, y otros, 2017).

4.6 Identificación de fuentes y combustibles predominantes con base al tipo de emisión de Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos.

Mediante la revisión bibliográfica es posible poder conocer sus fuentes de emisión en base a estudios previos de identificación de estas.

De igual manera se realizó el cálculo de las interacciones entre los HAP's para identificar las fuentes y combustibles con los que se asocian. Dichos cálculos se realizaron para el total de los HAP's durante el muestreo y de igual manera para cada día de muestreo.

Tabla 17. Cálculo para identificar la fuente y tipo de combustión predominante en el aporte de HAP's durante el muestreo registrado en la zona NE de San Luis Potosí

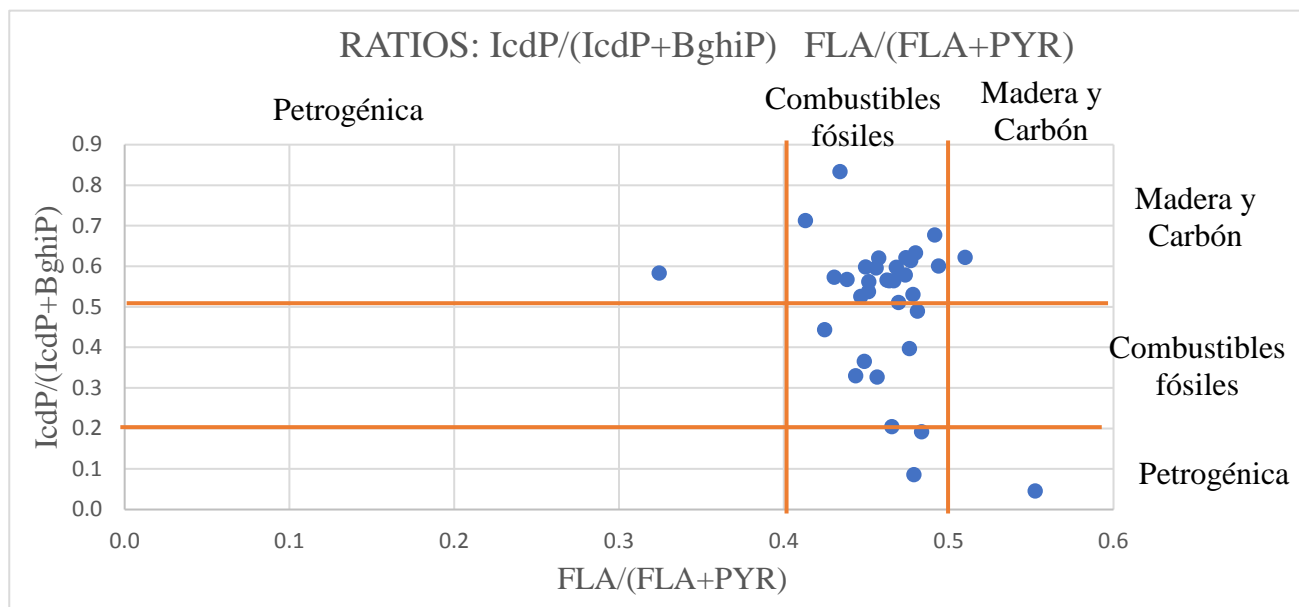
Ratios	Valor	Rango de valores	Fuente
ANT/(ANT+PHE)	0.14	< 0.1	petrogénicas
		> 0.1	pirogénica
BaA/(BaA+CHR)	0.67	< 0.2	petrogénicas
		0.2 - 0.35	combustión de carbón
		> 0.35	emisión vehicular
FLA/(FLA+PYR)	0.46	< 0.4	petróleo
		0.4 - 0.5	combustión de petróleo
		> 0.5	madera y carbón
IcdP/(IcdP+BghiP)	0.54	< 0.2	petrogénicas
		0.2 - 0.5	combustión de petróleo
		> 0.5	madera y carbón

BaP/BghiP	2.93	< 0.6	emisiones no vehiculares
		> 0.6	emisiones vehiculares
FLO/(FLO+PYR)	0.09	< 0.5	vehículos que funcionan con gasolina
		> 0.5	vehículos que funcionan con Diesel
Σ LMW / Σ HMW	0.04	< 1	pirogénica
		> 1	petrogénicas

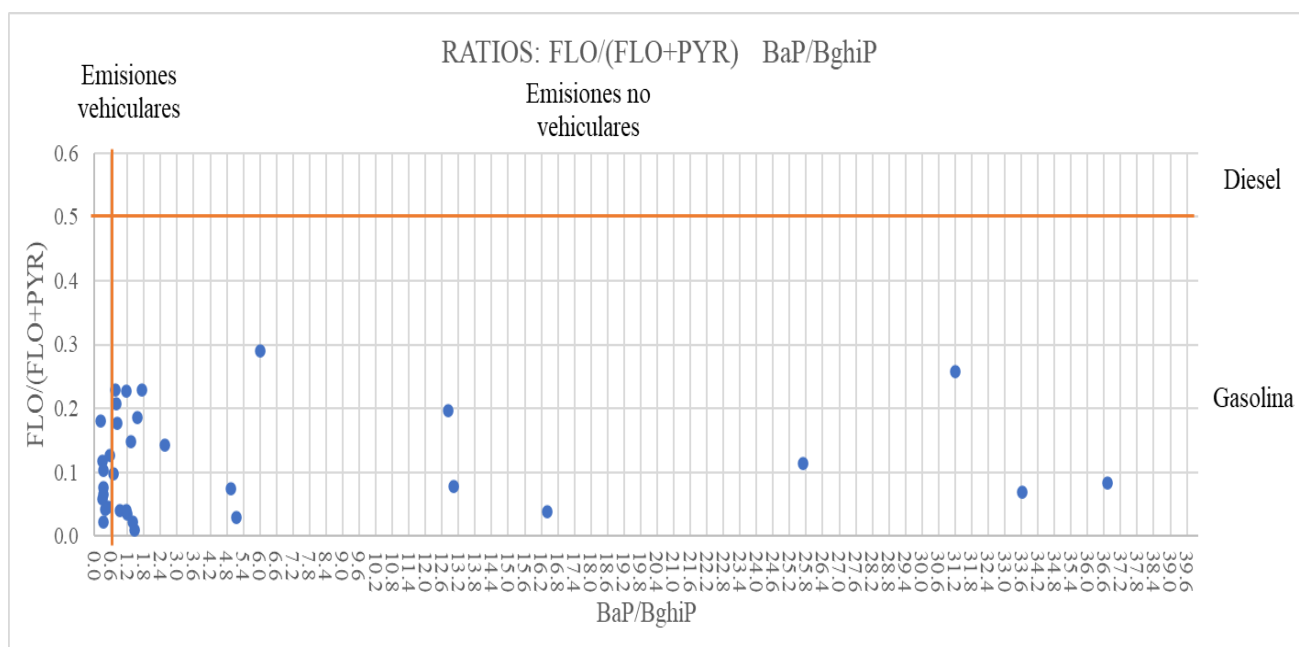
*LMW = HAP's de bajo peso molecular (2-3 anillos)

*HMW = HAP's de alto peso molecular (4-5 anillos)

Mediante el cálculo de las interacciones de los hidrocarburos según las concentraciones registradas se puede estimar cual es la fuente y tipo de combustible predominante que aporta la mayor cantidad de hidrocarburos en esta zona de la ciudad, para representar estas interacciones se graficaron de la siguiente manera, al igual que lo realizaron otros autores como Wu y colaboradores & Finardi y colaboradores (Finardi, y otros, 2015); (Wu, y otros, 2018).



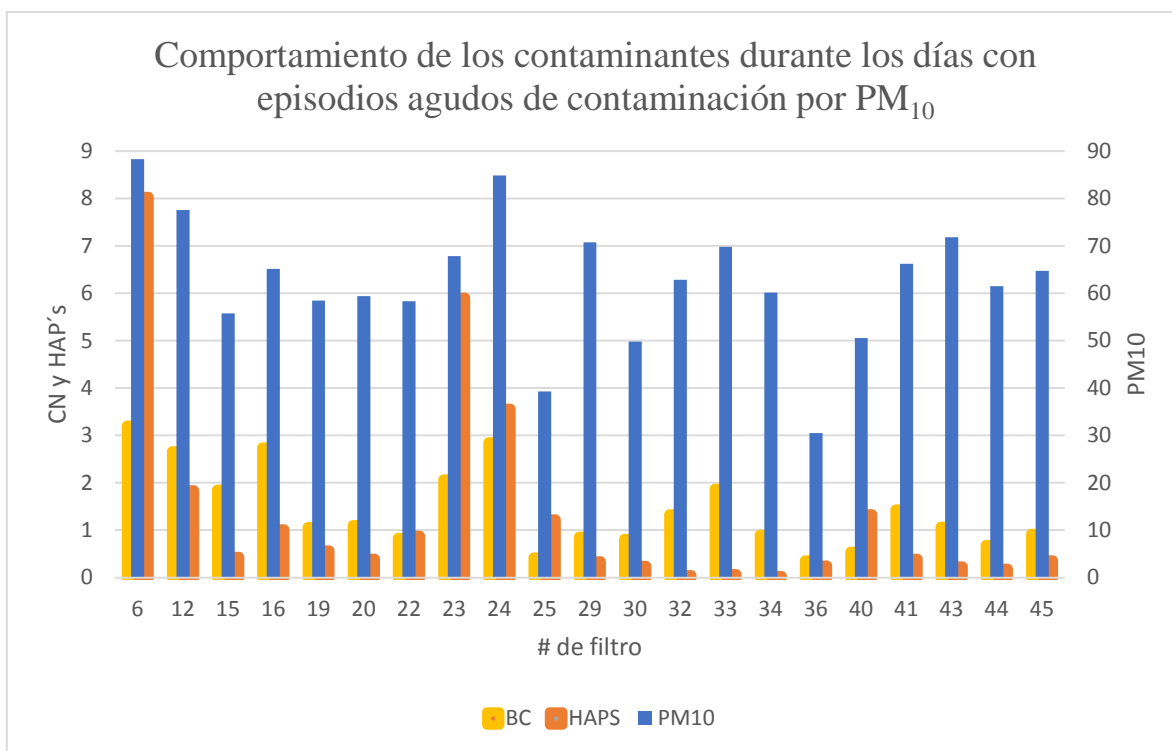
Con estas interacciones entre $IcdP/(IcdP+BghiP)$ y $FLA/(FLA+PYR)$ se logró identificar como principal combustible utilizado por las principales fuentes emisoras de HAP's la combustión de combustibles fósiles principalmente, pues 30 (88.23 %) de las muestras presentan gran contribución de la combustión de este combustible, seguido por la combustión de madera y carbón, con 24 (70.58 %) de las muestras con contribución de la combustión de este combustible, ambos siendo combustibles de fuentes pirogénicas. Para identificar la influencia de otras fuentes reconocidas en la literatura como el tránsito vehicular se graficaron las interacciones $FLO/(FLO+PYR)$ y $BaP/BghiP$.



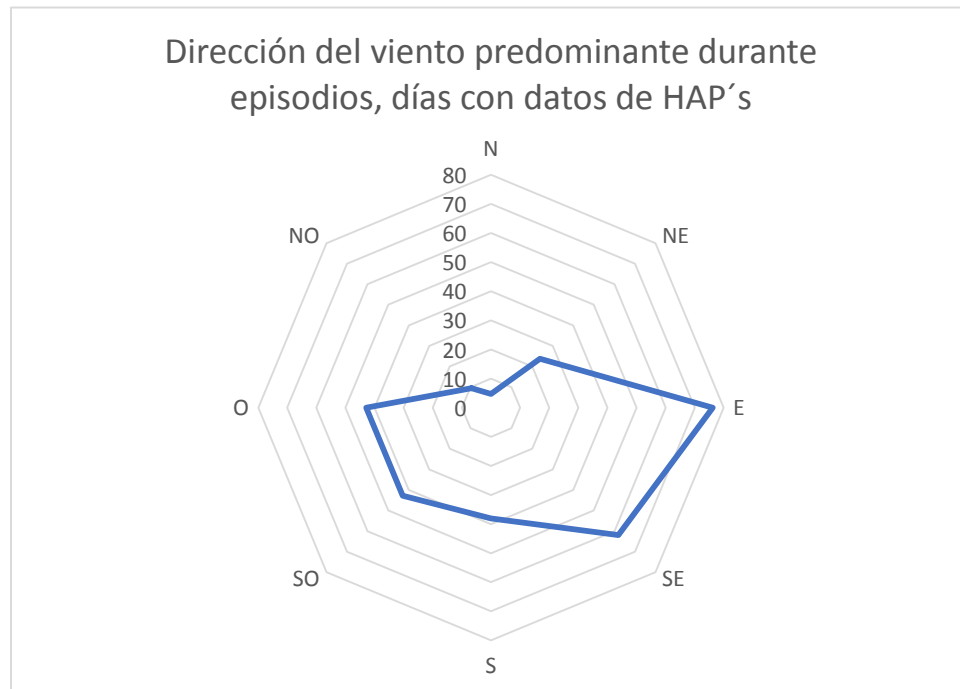
Para determinar la influencia de las fuentes móviles (tránsito vehicular) en las concentraciones de HAP's detectadas, se utilizó el cálculo de la relación $BaP/BghiP$ y para determinar el combustible utilizado por esta fuente se calculó la relación $FLO/(FLO+PYR)$, obteniendo que solamente 10 de las muestras (29.41 %) cuentan con influencia del tránsito vehicular, de las cuales todas son por vehículos que utilizan gasolina.

Este cálculo de las interacciones de los HAP's reflejan una similitud con las fuentes de emisión del CN y de las PM_{10} , de este modo la principal fuente que cuenta con quema de

combustibles fósiles y de materia orgánica en común con los otros dos contaminantes es la actividad ladrillera, por lo que se graficó la relación de estos contaminantes durante los picos de mayor concentración (días con episodios agudos de contaminación por PM₁₀)



De esta manera se evidenció de manera gráfica la relación de estos contaminantes los días que reflejan episodios agudos de altas concentraciones de PM₁₀ reflejan un comportamiento similar. Para estos días los promedios de las concentraciones de PM₁₀, CN, HAP's y benzo(a)pireno_{eq} son 62.55 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 1.40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 1.3 ng/m^3 y 0.48 ng/m^3 respectivamente.



De los 111 días que cuentan con algún episodio agudo de la concentración de PM_{10} , 21 de estos cuentan con datos sobre la concentración de HAP's, de estos 21 datos se graficó la velocidad del viento, de los cuales 16 (76.19 %) tienen una dirección predominantes NE – E dirección en la cual se encuentra la actividad ladrillera

Tabla 18. Comparación de resultados obtenidos de HAP's con otros estudios.

Ciudad	Número de habitantes	Periodo de muestreo	PM ₁₀ (μg/m ³)	HAP's (ng/ m ³)	Referencia
San Luis Potosí, México	824'229	Octubre 2018 – Junio 2019	58	1.13 0.38**	Este estudio
Taichung, China	2.8 millones	Junio 2014 – Enero 2015	45.2	3.76	(Zhu, y otros, 2019)
			44.1	3.58	
Dalian, China	7 millones	Noviembre 2016 – Noviembre 2017	70.3	52.4*	(Wang, y otros, 2019)
Arequipa, Perú	1 millón	Enero 2018 – Noviembre 2018	116	1.4**	(Larrea, Reyes, Salcedo, & Wannaz, 2019)
Tandil, Argentina	116'917	Marzo 2013 – Septiembre 2014	35.7	10**	(Sosa, Porta, Colman, Banda, & L., 2017)
Naples, Italia	3.1 millones	Octubre 2012 – Julio 2013	37.6	4.46	(Di Vaio, y otros, 2016)
Islamabad, Pakistan	1.015 millones	Enero 2017 – Septiembre 2017	102.79	40.07	(Mehmood, Zhu, Ahmad, & Li, 2020)

San José, Costa Rica	339'581	Enero 2013 – Noviembre 2013	34	29.08	(Herrera, Chaves, Rojas, Beita, & Solórzano, 2017)
Zagreb, Croacia	806'341	Enero 2013 – Diciembre 2013	28.61	12.59	(Jakovljevic, y otros, 2018)
Shiraz, Irán	1.5 millones	Primavera 2015	62.73	19.28	(Shahsavani, Hoseini, Dehghani, & Fararouei, 2017)
CDMX, México	8.9 millones	Febrero 2005 – Enero 2006	90.33	5.07	(Mugica, Hernández, Torres, & Rocio, 2010)
CDMX, México	8.9 millones	Enero 1993 – Diciembre 1993	150	11.6 (Σ 10 HAP's)	(Amador, y otros, 2001)
Zaragoza, España	968'049	2003 - 2004	32.24	14.3	(Callén, de la Cruz, López, & Mastral, 2011)
Cuernavaca, México	338'650	Enero 2016 – Noviembre 2017	22.88	1.96	(Valle-Hernández, Lugo-Cruz, Rodríguez, Figueroa-Lara, & Múgica-Álvarez, 2019)
Córdoba, México	140'896	Abril 2013 – Julio 2013	91	6.17	(Mugica-Álvarez, Ramos-Guizar, Santiago-de la Rosa, Torres-Rodríguez, & Noreña-Franco, 2016)

*Fase gaseosa

**Benzo(a)pireno equivalente

Tabla 19. Comparación de resultados obtenidos de CN con otros estudios.

Ciudad	Número de habitantes	Periodo de muestreo	PM ₁₀ (µg/m ³)	BC (µg/m ³)	Referencia
San Luis Potosí, México	824'229	Octubre 2018 – Junio 2019	58	1.30	Este estudio
Los Ángeles, E.U.A.	3.9 millones	-	-	1.67	(Delfino, y otros, 2011)
Shanghái, China	7 millones	Abril 2007 – diciembre 2008	-	3.9	(Geng, y otros, 2013)
CDMX, México	8.9 millones	Enero 2015 – Diciembre 2015	-	2.73	(Peralta, y otros, 2019)
Monterrey, México	1.2 millones		-	2.45	
Juriquilla, México	13'309		-	0.73	
CDMX, México	8.9 millones	Marzo 2013 – Marzo 2014	-	2.15	(Retama, Baumgardner, Raga, McMeeking, & Walker, 2015)
El Paso, Estados Unidos	682'669	Enero 2008 – Mayo 2008	34.16	0.49	(Raysoni, y otros, 2011)
Ciudad Juárez, México	1.3 millones		63.8	2.14	
Monterrey, México	1.2 millones	Septiembre 2012 – Octubre 2012	76	1.6	(Lopez-Reyes, Orozco-Rivera, Acuna-Askar, Villarreal-Chiu, & Alfaro-Barbosa, 2016)

Córdoba, México	140'896	Abril 2013 – Julio 2013	91	4.9	(Mugica-Álvarez, Ramos-Guizar, Santiago-de la Rosa, Torres-Rodríguez, & Noreña-Franco, 2016)
Guadalajara, México	1.49 millones	Enero 2007 – Diciembre 2007	-	3.2	(Hernández-Mena, y otros, 2011)
Copenhagen, Dinamarca	602'481	Enero 1979 – Diciembre 2015	25.1	0.92	(Hvidtfeldt, y otros, 2019)
Vitoria, Brasil	1.7 millones	Junio 2013 – Marzo 2014	25.5	0.90	(Nascimineto, y otros, 2020)
Barcelona, España	5.57 millones	Febrero 2020 – Marzo 2020	22.4	1.1	(Tobías, y otros, 2020)
		Marzo 2020	16.2	0.6	
Mexicali, México	689'775	2009	137		(OMS, 2010)

CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

5.1 Discusión:

De los contaminantes muestreados solamente existe normatividad en México para las partículas suspendidas menores a 10 micrómetros (NOM-025-SSA1-2014 y NOM-172-SEMARNAT-2019), durante el muestreo se obtuvo una concentración promedio diaria de 58 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, el cual no supera el valor normado, sin embargo se registraron 21 muestras (8.9 %) que si superan el valor normado, así mismo el promedio diario registrado supera a la concentración de referencia propuesta por la OMS de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, que protege contra efectos de la salud de la población.

Además de la comparación con la normativa, se realizó la comparación con otras ciudades mexicanas (CDMX, Monterrey, Córdoba, Cd. Juárez, Cuernavaca y Mexicali) (Raysoni, y otros, 2011); (Mugica, Hernández, Torres, & Rocio, 2010); (Lopez-Reyes, Orozco-Rivera, Acuna-Askar, Villarreal-Chiu, & Alfaro-Barbosa, 2016); (Mugica-Álvarez, Ramos-Guizar, Santiago-de la Rosa, Torres-Rodríguez, & Noreña-Franco, 2016); (Valle-Hernández, Lugo-Cruz, Rodríguez, Figueroa-Lara, & Múgica-Álvarez, 2019) (OMS, 2010) como se aprecia en las tablas 19 y 20, de las cuales sola la ciudad de Cuernavaca cuenta con concentraciones menores a las registradas en San Luis Potosí, lo cual puede deberse en mayor medida a la diferencia en el tamaño poblacional de cada ciudad, mientras que Cd. Juárez, CDMX y Monterrey son ciudades de mayor número de habitantes, por lo cual es de esperar los niveles de contaminación sean mayores, mientras que Córdoba y Mexicali son ciudades de menor tamaño poblacional en comparación a San Luis Potosí, 140'896 y 689'775 habitantes respectivamente presentan mayores niveles de contaminación por PM_{10} , los cuales en el caso de Córdoba se deben a la presencia de quema de caña de azúcar y a la cercanía con la fuente de emisión del muestreo, a diferencia del muestreo realizado en este estudio el cual se llevó a cabo a 2.12 km de distancia del horno ladrillero más cercano y 278 m de una avenida de alto afluente vehicular.

Al realizar una comparación con ciudades medianas de otros países, como lo es la ciudad de Sao José do Rio Preto, Brasil, que en un estudio durante el 2020, registró concentraciones promedio de $24.54 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Franzin, y otros, 2020) o la ciudad de Volos, Grecia, que a pesar de su amplia industrialización, se registraron concentraciones de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Emmanouil, y otros, 2016), otras ciudades medianas latinoamericanas de tamaño similar como la ciudad de Guatemala, registra una concentración anual de $48 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Callao en Perú reportó una concentración media de $37 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Montevideo en Uruguay con una concentración de $39 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y la ciudad de Maracay en Venezuela la cual registró una concentración de $44 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (OMS, 2010), evidenciando que la calidad del aire de San Luis Potosí tiene es de peor calidad por contaminación por PM_{10} a la de otras ciudades medianas latinoamericanas con condiciones similares de tamaño poblacional y actividad industrial.

Algo a evidenciar es que incluso aunque no se excedan los valores normados, las concentraciones de PM_{10} aún conservan la capacidad de ocasionar algún efecto adverso en la salud de la población, lo que se debe en gran parte a la heterogeneidad de su composición, contando con la presencia de otros contaminantes que afecta a diferentes partes del organismo de distintas maneras, por lo que pueden producir un aumento o cambio en la toxicidad de las partículas suspendidas combinando y/o potenciando los efectos tóxicos a la salud humana (Hildemann, 1996), (EPA, 2003), (Kim, y otros, 2017).

En el caso del carbono negro se registraron concentraciones diarias de entre los 0.29 y $3.77 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con concentración media de $1.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$, como se mencionó no existe normativa nacional para comparar estas concentraciones, pero si se cuentan con algunos estudios realizados en diferentes ciudades e incluso estudios epidemiológicos los cuales han encontrado evidencia estadísticamente significativa de efectos a la salud humana a determinadas concentraciones. Comparando con otras ciudades mexicanas CDMX, Juriquilla, Monterrey, Cd. Juárez, Córdoba y Guadalajara (Hernández-Mena, y otros, 2011); (Lopez-Reyes, Orozco-Rivera, Acuna-Askar, Villarreal-Chiu, & Alfaro-Barbosa, 2016); (Mugica-Álvarez, Ramos-Guizar, Santiago-de la Rosa, Torres-Rodríguez, & Noreña-Franco, 2016); (Peralta, y otros, 2019), todas las ciudades con las que se compararon superan al menos por el doble de la concentración, a excepción de Juriquilla, lo cual se debe en gran

medida al bajo número de habitantes de la ciudad, los cuales no son suficientes para considerarla una ciudad mediana. Otra comparación se realizó con ciudades de diferentes países de talla mediana como lo es Londrina en Brasil (Krecl, Targino, Ketznel, Cipoli, & Charres, 2019), donde se registraron concentraciones de CN entre los 0.58 – 3.43 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ las cuales son muy similares a las registradas en San Luis Potosí. Sin embargo para saber si puede existir algún riesgo de padecer algún efecto a la salud humana por parte de las concentraciones de este contaminante, se recurrió a la comparación de las concentraciones registradas en otros estudios epidemiológicos como el caso de la ciudad de Los Ángeles en el año 2011 (Delfino, y otros, 2011) donde se registraron concentraciones promedio entre 1.59 y 1.76 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de carbono negro, se encontraron efectos adversos en la presión sanguínea y cambios en la frecuencia cardiaca de la población expuesta; En otro estudio realizado en la ciudad de Shanghai, China en el año 2013 (Geng, y otros, 2013) registraron concentraciones de 3.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de carbono negro, a dicha concentración lograron asociarla con un incremento en la mortalidad por padecimientos cardiovasculares; En otro estudio realizado en la región del Río Delta de las Perlas en China (Lin, y otros, 2019), encontraron que con concentraciones promedio entre los 3.33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y los 4.33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en las ciudades de Huizhou y Jiangmen resultaron en un incremento de 4.82 muertes por cada 10'000 adultos atribuibles a cáncer teniendo un riesgo cancerígeno por CN mayor al de otras ciudades chinas. Por lo que las concentraciones registradas de algunos días que superan 1.50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ son preocupantes pues a esas concentraciones se reportan efectos adversos a la salud.

Del cálculo de la relación CN/PM₁₀ se obtuvo un 2.2 %, lo cual es considerado como un valor esperado, pues comparado con otros estudios, en ciudades mexicanas como Monterrey, Cd. Juárez y Córdoba presentaron una relación CN/PM₁₀ de 2.1 %, 3.35 % y 5.38 % respectivamente, por lo que se puede inferir que la relación registrada en San Luis Potosí entra dentro de los estándares de otras ciudades mexicanas, aunque en comparación con otras ciudades de otros países la relación tiende a ser un tanto menor como lo fue reportado en un estudio similar, donde se calculó la relación entre las partículas PM₁₀ y la fracción carbonácea al norte de Rhine-Westphalia, Alemania (Küpper, y otros, 2019); obteniendo valores de 9.5 % en una zona urbana y 7.2 % en una zona de alto nivel de tráfico vehicular; En otro estudio en la ciudad de Patna, India (Arif, Kumar, Kumar, Eric, & Gourav, 2018), se midieron las

concentraciones de PM_{10} , $PM_{2.5}$ y CN, se encontró una relación superior al 10 % entre el PM_{10} y CN, dentro de este mismo estudio se atribuyen como principales fuentes emisoras, a las fuentes domésticas, quema de biomasa y el tráfico vehicular, seguidos por la actividad ladrillera y la industria. Las diferencias pueden atribuirse debido a que las mediciones en ambos estudios fueron cercanos a la fuente que ellos atribuyen a las concentraciones de ambos contaminantes, mientras que la distancia del sitio de muestro al horno ladrillero más cercano es de 2.12 km y la avenida de alto tráfico vehicular más cercana a 278 m (INEGI, 2020), aunado a esto la baja velocidad del viento presente durante la mayor parte del tiempo mantienen esta clase de contaminantes estáticos cercanos al área de su fuente de emisión por lo que la relación reportada podría incrementarse en un monitoreo más próximo a dichas fuentes emisoras señaladas como las más probables.

En la mayoría de los estudios no solo se registran las concentraciones o efectos asociados a la salud de los contaminantes atmosféricos, si no que de manera más integradora se caracteriza el comportamiento temporal de los contaminantes, esto mediante el registro de las tendencias horarias y por estación del año las cuales se encuentran definidas por las condiciones únicas de cada región, dentro de las cuales las más relevantes son la dirección y velocidad de viento, la humedad relativa, la temperatura, las actividades antropogénicas presentes en la zona y la cercanía a zonas de alto tráfico vehicular, producción agrícola, zonas de quema, zonas industriales o ladrilleras, etc. (Cheng, y otros, 2015); (Arif, Kumar, Kumar, Eric, & Gourav, 2018). En el caso de la zona noreste de San Luis Potosí se logró identificar el comportamiento de los niveles de PM_{10} y CN para cada hora del día, día de semana y mes durante el periodo de muestreo, identificando un comportamiento uniforme entre semana (de lunes a viernes), el cual registra un pico máximo de concentración que inicia a partir de las 8:00 h, alcanzando el punto máximo de concentración a las 10:00 h y una disminución a las 13:00 h; una disminución de las concentraciones durante los fines de semana; mientras que por estación se registró un leve incremento en la concentración de PM_{10} y CN conforme la temperatura aumentaba y la presencia de una disminución de días con lluvia. De esta forma se logró corroborar que las concentraciones de estos contaminantes están determinadas en factor a las variables anteriormente mencionadas principalmente las actividades antropogénicas de la zona como la actividad industrial, ladrilleras cercanas a la zona de

estudio y al tránsito vehicular, las cuales inician y mantienen actividad durante este periodo de horas y días; por su parte dirección de los vientos, temperatura y la presencia de lluvias características de las estaciones de Otoño e Invierno fueron determinantes en disminuir las concentraciones registradas durante esos periodos; tal cual es reflejado por numerosos estudios (Cheng, y otros, 2015); (Arif, Kumar, Kumar, Eric, & Gourav, 2018); (Hvidtfeldt, y otros, 2018); (Larrea A. L., 2019).

En el caso de los HAP's que fueron colectados e identificados en la fracción de partícula PM₁₀, se caracterizaron 34 muestras para la identificación de 15 de los 16 HAP's prioritarios por la EPA, con los datos obtenidos de las concentraciones se realizaron diversos cálculos y gráficos para determinar la composición de la mezcla, su toxicidad y su principal fuente así asociada durante el muestreo y las estaciones del año que abarca, pues diversos autores señalan que durante el invierno los HAP's de menor número de anillos tienden a aumentar y a su vez estos disminuyen conforme aumentan las temperaturas y radiación solar, ya que estas condiciones favorecen su transición a la fase gaseosa, mientras que los de mayor número de anillos (5-6) se encontraran con mayor facilidad en las partículas (Samburova, Zielinska, & Khlystov, 2017); (Larrea, Reyes, Salcedo, & Wannaz, 2019) (Paloluoglu, Bayraktar, Aktan, Turalioglu, & Eftade, 2016); (Dat & Chang, 2017); (Wang, y otros, 2018).

La concentración promedio registrada de los HAP's en partículas PM₁₀ fue de 1.13 ng/m³ y una máxima de 8.03 ng/m³, siendo los HAP's de 5 y 6 anillos los más abundantes, a su vez para darse un aproximado de su toxicidad se utilizaron los TEF's a benzo(a)pireno obteniendo un promedio de 0.38 ng/m³ y una máxima de 2.50 ng/m³. De igual manera que el CN no existe normativa nacional, sin embargo existen valores límite permisibles de carácter internacional como el de la Unión Europea, que establece un valor límite permisible de la concentración de benzo(a)pireno o su equivalencia de 1 ng/m³ dicho valor se estipuló con la finalidad de proteger la salud de la población del riesgo de padecer cáncer por exposición a HAP's (Directiva 2004/107/CE, 2004), aunque bien la concentración promedio en la zona NE de la ciudad de San Luis Potosí no supera este valor, se presentaron 4 muestras (11.76 %) que superaron este valor, sin embargo para poder comprobar si existe algún riesgo a la salud de la población en esta zona, se realizó una estimación del riesgo a la salud humana

para efectos no cancerígenos, por lo que para realizar esta estimación para la mezcla de los 15 HAP's caracterizados, se procedió a realizar el cálculo para obtener la equivalencia toxica a benzo(a)pireno mediante el uso del TEF, para la realización del cálculo se realizó con el día que presento la mayor concentración de HAP's (31/10/2018) con una concentración de 8.03 ng/m^3 , esto basándose en la premisa precautoria de las evaluaciones de riesgo donde se asume máximo riesgo. De las concentraciones registradas para los HAP's el valor total de la equivalencia a benzo(a)pireno fue de 2.37 ng/m^3 , dicha concentración estimada es comparada con el RfC del propio benzo(a)pireno propuesta por la EPA que es de 2 ng/m^3 , el cual protege para efectos en el desarrollo fetal, pues a concentraciones superiores existe un riesgo por disminución en la supervivencia fetal (EPA, 2017), el cálculo del índice de peligro fue de 1.18, lo cual indica que existe un riesgo de padecer efectos en la salud de la población en la zona noreste de la ciudad de San Luis Potosí, sin embargo este resultado podría ser aún mayor debido a que no se incluyen los HAP's en fase de vapor y solo se utilizan 15 del total de los HAP's, pues al considerar los 16 HAP's prioritarios del total de más de 100 contenidos en la fracción de partículas, permite identificar entre un 21 % a 58 % de la mezcla total de los HAP's presentes en el aire ambiente, mientras que la evaluación de estos en ambas fases (gas y partícula) permite identificar entre un 34 % a 86 % de la toxicidad total de los HAP's (Samburova, Zielinska, & Khlystov, 2017), por lo que el riesgo estimado podría ser mucho mayor al calculado, esto siguiendo a la vez las recomendaciones de otro estudio (Jin, y otros, 2018). Existe un estudio que evaluó directamente el efecto ocasionado por los HAP's y otros contaminantes en el ambiente en niños que viven en escenarios que incluyen a la actividad ladrillera, encontrando una correlación significativa entre la exposición a HAP's y otros contaminantes con daño al ADN, concluyendo que existe un riesgo a la salud en esta población (Jasso-Pineda, Díaz-Barriga, Yáñez-Estrada, Pérez-Vázquez, & Pérez-Maldonado, 2015).

Comparando estas concentraciones con otras registradas con sus propias estimaciones de riesgo está un estudio en la región de Arequipa, Perú (Larrea, Reyes, Salcedo, & Wannaz, 2019) donde difieren entre las concentraciones de HAP's por zonas reportan una concentración equivalente a Benzo(a)pireno de 3.6 ng/m^3 en su zona industrial, mientras que en el centro de la ciudad 1.4 ng/m^3 encontrando un riesgo mucho mayor en la zona industrial

en comparación a su zona urbana y rural; mientras que en la ciudad de Valencia, Venezuela (Vargas, Romero, Palencia, Rivero, & Piñero, 2013) registraron una concentración equivalente de Benzo(a)pireno de 0.08 ng/m³; ambos estudios reflejan concentraciones similares a las encontradas en esta zona de la ciudad de San Luis Potosí, y pese a que los estudios evidencian una mayor concentración en las zonas industriales cabe resaltar que la actividad industrial se distribuye por toda la ciudad de San Luis Potosí, pese que los complejos de mayor tamaño se encuentran alejados al sitio de estudio, al igual que las fuentes señaladas, lo que refleja que esta estimación del riesgo podría ser mayor en zonas que cuenten con mayor presencia industrial y/o actividad ladrillera.

Si bien se reconoce existen múltiples fuentes emisoras de los HAP's, se identificó como la de mayor aportación la actividad ladrillera gracias, esto en función a los factores evaluados, como la dirección de los vientos, la relación que guarda con en CN ya que ambos son co-emitidos a la atmósfera por fuentes en común y ser co-emitidos por las mismas fuentes como lo son la actividad ladrillera e industrial de la zona, así como el tráfico vehicular, tal como lo señalan estudios previos, las mayores concentraciones de HAP's suelen coincidir con otros contaminantes como el carbono negro (Bocanegra, 2011), esto debido a esta característica de los HAP's que se dificulta su degradación, pues los que se adhieren a otras partículas como las de la fracción carbonácea, en especial al CN, les proveen cierta protección contra la fotooxidación, por lo que (Wang, y otros, 2017) propone un modelo de predicciones de las concentraciones de HAP's en las concentraciones de CN, de esta manera resulta viable comprobar este modelo predictor de HAP's en la ciudad de San Luis Potosí, brindando una estimación sobre las concentraciones que podrían existir con determinado nivel de precisión, gracias a la capacidad de algunos de los HAP's de adherirse a estas partículas, tal es el caso del benzo(a)antraceno y el criseno que tienen una vida media de 650 h a 690 h en partículas de carbono negro (Behymer & Hites, 1985) y el cálculo de las interacciones de los HAP's (*PAH ratios -en inglés*), los cuales son ampliamente utilizados en otros estudios para identificar las principales fuentes y combustibles que originan los HAP's, aunque se reconocen sus debilidades identificadas por (Tobiszewski & Namiesnik, 2012) como que solo se identificaron HAP's en fase de partículas y no en la fase gaseosa, por las interacciones entre los HAP's de menor número de anillos, son afectadas, pues estos HAP's son más

abundantes en la fase gaseosa, por lo que al dejar de lado esta fase, el ratio resultante de esta interacción será menor; de igual modo no se evaluaron los HAP's en ninguna otra matriz ambiental por lo que el panorama integral de las fuentes de los HAP's no es visualizado, sin embargo para el objetivo de esta investigación se priorizan los resultados obtenidos de los HAP's en fase de partículas, por lo que al calcular las interacciones se identifican como fuente principal en 30 (88.23 %) de las muestras a las fuentes de origen pirogénico (combustión incompleta) donde se utilizan como combustibles materia orgánica y combustibles fósiles, dichos combustible cumple con la descripción de los combustibles utilizados en el proceso de elaboración de ladrillos en unos 148 hornos ladrilleros contabilizados por (Börner, Torrico-Albino, Nieto-Caraveo, & Cubillas-Tejeda, 2017), lo cual sucede en , el cual consta de basura de todo tipo, destacando plásticos y llantas pues es de fácil acceso al carecer de costo pues se obtiene de acuerdo realizados por los dueños de los hornos con particulares (López, 2017), e inclusive se han documentado casos donde se utilizan residuos peligrosos y de manejo especial como en el 2019 donde se decomisaron 15 toneladas de estos residuos (La Orquesta, 2019). Otra fuente reportada, aunque de menor influencia fue el tránsito vehicular que funciona con gasolina en la esta zona, identificada en un 10 (29.41 %) de las muestras.

La ciudad de San Luis Potosí cuenta con más de 15 años en la búsqueda de una solución al problema de la contaminación originada por la actividad ladrillera, dentro de los cuales han surgido diversos estudios sociales, ambientales y de salud para sustentar las propuestas ante esta problemática, los cuales proponen como solución la reubicación, el cambio de combustible, mejorar las tecnologías implementadas e incluso se han abordado medidas sociales como el acercamiento la población para concientizar, comunicar y educar sobre los riesgos asociados, pero dichas intervenciones no son continuas, por lo que su eficacia se ha visto comprometida, sin embargo ninguna propuesta ha reflejado éxito controlando la problemática debido a los costos requeridos, permisos otorgados y participación de la comunidad ladrillera (Börner, Torrico-Albino, Nieto-Caraveo, & Cubillas-Tejeda, 2017), (Palacios-Ramírez, y otros, 2018); (Estrada, 2020).

5.2 Conclusiones

Este es el primer estudio en la ciudad de San Luis Potosí para evaluar los componentes de la fracción carbonácea de las partículas atmosféricas PM_{10} , así como en medir la contribución de sus principales fuentes de emisión en la zona NE de la ciudad de San Luis Potosí, para los contaminantes evaluados en esta fracción (HAP's y CN). De este modo se reportaron concentraciones promedio de $51.47 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con una máxima de $210 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM_{10} , una concentración promedio de $1.16 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con una máxima de $3.77 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de CN y una concentración promedio de $1.13 \text{ng}/\text{m}^3$, con una máxima de $8.03 \text{ng}/\text{m}^3$ de la mezcla de 15 de los 16 HAP's prioritarios por la EPA.

Con los datos obtenidos de la mezcla de 15 de los 16 HAP's prioritarios por la EPA, se reportó que el 8.82 % de los datos, superan la concentración de referencia de la EPA y 11.76 % el valor límite permisible de la Unión Europea, por lo que se hace especial énfasis en atender la necesidad de establecer valores límite permisibles de la concentración en aire del CN y los HAP's, con la finalidad de cuidar y proteger la salud de los habitantes de esta zona, en especial las poblaciones más vulnerables (población infantil, mujeres en edad reproductiva, personas con comorbilidades y personas con sistema inmunológico comprometido).

En base a estos resultados encontrados se continúa evidenciando la situación de una mala calidad del aire en la ciudad, que a pesar de que las concentraciones promedio de PM_{10} no superar los valores normados constantemente, los niveles reportados de este y los otros contaminantes evaluados (CN y HAP's) pueden representar un riesgo a la salud humana de la población que habita en la zona noreste de la ciudad de San Luis Potosí, esto en base a los resultados obtenidos por esta y otras investigaciones que señalan ya algún efecto o riesgo asociado a concentraciones similares.

En función de que la principal fuente contaminante señalada en esta zona de la ciudad es la actividad ladrillera, se recomienda que las medidas pertinentes deben enfocarse a dicha fuente, no solo para mejorar la calidad del aire y salud de los habitantes de la zona NE de la

ciudad de San Luis Potosí, sino también de la población que radica, labora y estudia en la zona núcleo y periférica de la actividad ladrillera. Al observar las propuestas señaladas por otros estudios, sus aciertos y fracasos se reconoce el problema en cuestión debe abordarse de manera multidisciplinaria pues la solución debe incluir abordajes económicos, sociales, legales y ambientales para fortalecer las estrategias propuestas.

Se identificaron como las principales causas que originan la problemática con la fuente de emisión de las ladrilleras al uso de tecnologías poco eficientes, los combustibles utilizados, la ubicación de los hornos y el contexto socio-económico que envuelve este ambiente, dichos problemas se originan hace más de un siglo y se acompañan de otros problemas rezagados y actuales, por lo que se propone la búsqueda de una solución integral donde el gobierno con todas sus facultades y autoridad ejerza las medidas correspondientes, se acompañe a la comunidad desde un proceso de comunicación, concientización e invitación a adoptar las propuestas, así como su acompañamiento para una reubicación, se cuente con mayor vigilancia y control de esta actividad y por subsecuente regular los combustibles utilizados, juntando algunas de las propuestas que se han planteado con la finalidad de fortalecerse y tener mayor éxito en beneficio económico y a la salud del sector ladrillero, de las personas que vivan en sus cercanías y como se demostró en este estudio el resto de la zona NE de la ciudad de San Luis Potosí.

En base a la dinámica de los contaminantes observados dentro del periodo de muestreo, se puede decir que es necesario realizar reformas y modificaciones a las normas existentes en cuestión de contaminantes atmosféricos y protección a la salud como lo es la NOM-025-SSA1-2014 realizando un cambio en el valor límite permisible de PM_{10} pues las concentraciones registradas representan riesgos a la salud humana en función a su caracterización; de igual manera a la NOM-172SEMARNAT-2019 la cual establece promedios de 8 horas para dar avisos y comunicación del riesgo alcanzado por contaminación por PM_{10} , pues se evidenció que existen episodios agudos que alcanzan concentraciones catalogadas como de riesgo o de alto riesgo en intervalos de 4 a 5 horas de exposición continúa. Así mismo se reconoce la importancia y se recomienda establecer un valor límite permisible a exposición a HAP's en aire, el cual proteja a la salud de la población.

Se requiere de estudios más completos para cuantificar el riesgo asociado a la exposición a estos contaminantes en esta zona de la ciudad, de igual manera se recomendaría realizar para la ciudad en su totalidad o bien priorizar en los sitios de mayores niveles de contaminación los cuales se señalan en esta investigación como la zona donde se presenta la actividad ladrillera y sus cercanías más próximas así como lugares con mayor afluente vehicular; contemplando e hipotetizando que los niveles para los 3 contaminantes en esa zona son mayores a los registrados en el sitio de muestreo y por ende el riesgo a la salud de estas poblaciones será mayor.

5.3 Recomendaciones:

- Es necesario la toma de acción enfocada a políticas públicas que ayuden a la disminución de los contaminantes atmosféricos, con el uso de técnicas y tecnologías especializadas en la reducción de emisiones.
- Se recomienda una continuación con un estudio de la evaluación del riesgo a la salud humana por contaminantes atmosféricos y en el caso de los HAP's incluir la fase gaseosa de estos en el aire ambiente, así como un muestreo más exhaustivo en la ciudad de San Luis Potosí.
- De igual manera se reconoce que para que estas medidas funcionen a largo plazo es esencial que la población se encuentre concientizada al respecto, pues es un derecho y un deber de la población tomar acción en el cuidado de su salud, así como un debido acompañamiento con la comunidad, donde se brinde apoyo, asesorías y mejoras resultantes.
- Fusionando propuestas anteriores es viable la reubicación de los hornos ladrilleros, contando con un apoyo legal por parte del gobierno que facilite la adquisición de terrenos aptos para esta actividad, la vigilancia sobre los combustibles utilizados, la

continuación del acompañamiento de la población para la aceptación y mantenimiento de estas medidas.

- El cambio no se da de manera inmediata por lo que un avance progresivo y escalonado iniciando con un acercamiento, concientización, comunicación y trabajo en conjunto a la población es crucial para el enrolamiento de estas propuestas y así tengan mayor aceptación y el cambio ocurra de manera coordinada y efectiva.
- Fortalecer a normas, leyes y sanciones respecto a las actividades y personas que contribuyan al deterioro de la calidad del aire como lo son la NOM-025-SSA1-1994 y la NOM-172-SEMARNAT-2019, pues esta situación y problemática no son exclusivas de la ciudad de San Luis Potosí.
- La vigilancia de las estaciones de monitoreo de la calidad del aire en la ciudad de San Luis Potosí con la finalidad de garantizar su óptimo funcionamiento y por ende mejorar el procesamiento de datos y agilidad con la que se comparten para la comunicación de riesgos en salud, para monitorear el resto de las fuentes que aportan a la contaminación atmosférica de la ciudad.
- Mejorar el sistema de vigilancia y comunicación del riesgo asociado a los altos niveles de estos contaminantes con la finalidad de poder actuar a tiempo y poder disminuir la exposición a altas concentraciones de estos contaminantes, así como poder frenar o disminuir las actividades de las principales fuentes que contribuyen a estos altos niveles. Especialmente en zonas donde se aglomeran poblaciones vulnerables como escuelas, asilos, clínicas y zonas residenciales.

Referencias

- Álvarez, G. (2011). Estructura y temporalidad urbana de las ciudades intermedias en México. *Frontera norte*, 23(46), 91-124.
- Amable, I., Méndez, J., Bello, B., Benítez, B., Escobar, L., & Zamora, R. (2017). Influencia de los contaminantes atmosféricos sobre la salud. *Revista Médica Electrónica*, 39(5), 1160-1170.
- Andreae, M. G. (2006). Black carbon or brown carbon? The nature of light-absorbing carbonaceous aerosols. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 3131-3148.
- Arif, M., Kumar, R., Kumar, R., Eric, Z., & Gourav, P. (2018). Ambient black carbon, PM2.5 and PM10 at Patna: Influence of anthropogenic emissions and brick kilns. *Science of the Total Environment*, 1387-1400. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.12227
- ATSDR. (06 de 2012). *Resumen de Salud Pública*. Recuperado el 12 de 05 de 2020, de Monóxido de Carbono: https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs201.pdf
- ATSDR. (06 de 05 de 2016). *Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPSs)[Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs)]*. Recuperado el 26 de 09 de 2019, de https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts69.html
- ATSDR. (06 de 05 de 2016). *Óxidos de nitrógeno (monóxido de nitrógeno, dióxido de nitrógeno, etc.)(Nitrogen Oxides)*. Recuperado el 12 de 05 de 2020, de https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts175.html#bookmark2
- Bachmann, J. (2009). *BLACK CARBON: A Science / Policy Primer*. Arlington.
- Barrera, V. (2005). *Caracterización elemental de PM15 y PM2.5 para la identificación de fuentes contaminantes en la ZMCM (Maestría)*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Bocanegra, M. (2011). *Muestreo pasivo de Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos en las hojas de la especie vegetal Eriobotrya japonica (Doctorado)*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Bollinger, K. (2008). Records of natural fires and the Sorption of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) by Black Carbon and Carbon Chars in sediments from Oriole Lake (Sequoia National Park). *Senior Honors Projects*, 1-22.
- Bond, T., Doherty, S., Fahey, D., Forster, P., Berntsen, T., DeAngelo, B., . . . Bellouin, N. (2013). Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118, 5380-5552. doi:10.1002/jgrd.50171
- Börner, S., Torrico-Albino, J., Nieto-Caraveo, L., & Cubillas-Tejeda, C. (2017). Living with everyday environmental risks: giving a voice to young people in the design of

- community-based risk communication programs in the city of San Luis Potosí, México. *Children's Geographies*. doi:10.1080/14733285.2017.1310369
- Brook R, R. S.-R. (2010). Particulate Matter Air Pollution and Cardiovascular Disease: An Update to the Scientific Statement From the American Heart Association. *Circulation*, 2331-2378. doi:10.1161/CIR.0b013e3181dbee1
- Carslaw, D., *The openair manual open-source tools for analyzing air pollution data*, London (2015)
- Castilla, J. (2015). Tragedia de los recursos de uso común y ética ambiental individual responsable frente al calentamiento global. *Acta Bioética*, 65-71.
- CeMCAQ. (2020). *Centro de Monitoreo de la Calidad del Aire del Estado de Querétaro*. Obtenido de Material Particulado: <http://www.cemcaq.mx/contaminacion/particulas-pm>
- CENAPRED. (16 de 05 de 2019). *El ozono como contaminante del aire y riesgo para la salud*. Recuperado el 12 de 05 de 2020, de <https://www.gob.mx/cenapred/articulos/el-ozono-como-contaminante-del-aire-y-riesgo-para-la-salud>
- Chen, Y. Z. (2006). Measurements of emissions factors for primary carbonaceous particles from residential raw-coal combustion in China. *Geophysical Research Letters*.
- Cheng, Y., Cheng, S., Gao, Y., Cui, L., Deng, W., Cao, J., . . . Sun, J. (2015). Real-time measurements of PM_{2.5}, PM_{10-2.5}, and BC in an urban street canyon. *Particuology*, 134-140. doi:10.1016/j.partic.2014.08.006
- Chrysikou, L., Gemenetzi, P., Kouras, A., Manoli, E., Terzi, E., & Samara, C. (2007). Distribution of persistent organic pollutants, polycyclic aromatic hydrocarbons and trace elements in soil and vegetation following a large scale landfill fire in northern Greece. *Environment International*, 34(2), 210-225. doi:10.1016/j.envint.2007.08.007
- COFEPRIS. (31 de 12 de 2017). *Clasificación de los contaminantes del aire ambiente*. Recuperado el 12 de 05 de 2020, de <https://www.gob.mx/cofepris/acciones-y-programas/2-clasificacion-de-los-contaminantes-del-aire-ambiente>
- Dat, N., & Chang, M. (2017). Review on characteristics of PAHs in atmosphere, anthropogenic sources and control technologies. *Science of the Total Environment*, 682-693. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.07.204
- Dat, N., & Chang, M. (2017). Review on characteristics of PAHs in atmosphere, anthropogenic sources and control technologies. *Science of the total Environment*, 682-693. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.07.204
- Delfino, R., Gillen, D., Tjoa, T., Staimer, N., Polidori, A., & Arhami, M. (2011). Electrocardiographic ST-segment depression and exposure to traffic-related

- aerosols in elderly subjects with coronary artery disease. *Environmental Health Perspectives*, 119(2), 196-202. doi:10.1289/ehp.1002372
- Díaz, C. (2016). *Estudio del Carbono Negro (Black Carbon) contenido en partículas suspendidas en ambientes urbanos* (Maestría). Centro de Investigación en Materiales Avanzados.
- Directiva 2004/107/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 15 de diciembre de 2004.
- Emmanouil, C., Drositi, E., Vasilatou, V., Diapouli, E., Krikonis, K., Eleftheriadis, K., & Kungolos, A. (2016). Study on particulate matter air pollution, source origin, and human health risk based of PM10 metal content in Volos City, Greece. *Toxicological & Environmental Chemistry*, 99(4), 691-709. doi:10.1080/02772248.2016.1242005
- EPA. (1999). *Compendium Method TO-13A Determination of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Ambient Air Using Gas Chromatography/Mass Spectrometry (GC/MS)*. Cincinnati.
- EPA. (09 de 2001). *La disminución de la capa de ozono*. Obtenido de <https://www.epa.gov/sites/production/files/documents/ozono.pdf>
- EPA. (2003). *Particle Pollution and your health*. Office of Air and Radation.
- EPA. (2012). *Report to Congress on Black Carbon*.
- EPA. (23 de 02 de 2016). *Evaluación de Riesgo para Contaminantes Tóxicos del aire: Guía de un ciudadano*. Recuperado el 26 de 09 de 2019, de https://www3.epa.gov/ttn/atw/3_90_024sp.html
- EPA. (28 de 07 de 2017). *IRIS*. Obtenido de Benzo[a]pyrene (BaP): https://cfpub.epa.gov/ncea/iris2/chemicalLanding.cfm?substance_nmbr=136
- EPA. (28 de 07 de 2017). *IRIS*. Recuperado el 20 de 02 de 2020, de Benzo[a]pyrene (BaP): https://cfpub.epa.gov/ncea/iris2/chemicalLanding.cfm?substance_nmbr=136
- EPA. (19 de 01 de 2017). *NAAQS Table*. Recuperado el 13 de 05 de 2020, de <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table>
- EPA. (05 de 06 de 2019). *Descripción general de los gases de efecto invernader*. Recuperado el 25 de 08 de 2019, de <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/descripcion-general-de-los-gases-de-efecto-invernadero>
- Estrada, M. (17 de 02 de 2020). Combatir contaminación de ladrilleras, tema costo y complejo: SEGAM. *El Universal*.
- Ewing, S., Christensen, J., Vancuren, R., Cliff, S., & Depaolo, D. (2010). Pb isotopes as an indicator of the asian contribution to particulate air pollution urban california. *Environ. Sci. Technol.*

- Finardi, S., Radice, P., Cecinato, A., Gariazzo, C., Gherardi, M., & Romagnoli, P. (2015). Seasonal variation of PAHs concentrations and source attribution through diagnostic ratios analysis. *Urban Climate*. doi:10.1016/j.uclim.2015.12.001
- Flood-Garibay, J., Méndez-Rojas, M., & Pérez-Cortés, E. (2019). Sistema inmune respiratorio y consecuencias de contaminación aérea por materia particulada. *Revista Médica del Instituto Mexicano del Seguro Social*, 57(3), 170-180.
- Fox, D., & Riebau, A. (2013). A Review of Wildland Fire and Air Quality Management. En J. Qu, W. Sommers, R. Yang, & Riebau, *Remote Sensing and Modeling Applications to Wildland Fires* (págs. 55-66).
- Franzin, B., Guizzellini, F., de Babos, D., Hojo, O., Pastre, I., Marchi, M., . . . Oliveira, C. (2020). Characterization of atmospheric aerosol (PM10 and PM2.5) from a medium sized city in Sao Paulo state, Brazil. *Journal of Environmental Sciences*, 89, 238-251. doi:10.1016/j.jes.2019.09.014
- GBD. (2016). *Lancet*, 388, 1659-1724. doi:10.1016/S0140-6736(16)31679-8.
- Geng, F., Hua, J., Mu, Z., Peng, L., Xu, X., Chen, R., & Kan, H. (2013). Differentiating the association of black carbon and fine particle with daily mortality in a Chinese city. *Environmental Research*, 27-32. doi:10.1016/j.envres.2012.08.007
- Gong, T., Sun, Z., Zhang, X., Zhang, Y., Wang, S., Han, L., . . . Zheng, C. (2019). Associations of black carbon and PM2.5 with daily cardiovascular mortality in Beijing, China. *Atmospheric Environment*, 1-8. doi:10.1016/j.atmosenv.2019.116876
- González-Estrada, A., & Camacho, M. (2017). Emisión de gases de efecto invernadero de la fertilización nitrogenada en México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 8(8), 1733-1745. doi:10.29312/remexca.v8i8.698
- Hildemann, L. R. (1996). Contribution of primary aerosol emissions from vegetation-derived sources to fine particle concentrations in Los Angeles. *Journal of Geophysical Research*, 19541-19549.
- Hvidtfeldt, U., Ketzel, M., Sorensen, M., Hertel, O., Khan, J., Brandt, J., & Raaschou, O. (2018). Evaluation of the Danish AirGIS air pollution modeling system against measured concentrations of PM2.5, PM10, and black carbon. *Environmental Epidemiology*. doi:10.1097/EE9.000000000000014
- INECC. (15 de 11 de 2007). *Tipos y fuentes de contaminantes atmosféricos*. Recuperado el 22 de 05 de 2020, de <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/396/tipos.html>
- INECC. (2017). *Evaluación de Contaminantes Orgánicos Persistentes e Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos en la Ciudad de Salamanca, Guanajuato*. Delegación Coyoacán.

- INECC. (2017). *Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (INEGIyCEI)*. Recuperado el 22 de 05 de 2020, de <https://datos.gob.mx/busca/dataset/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero-inegycei>
- INECC. (2019). *Informe Nacional de la Calidad del Aire*. Ciudad de México.
- INECC. (2020). *SINAICA*. Obtenido de Normas Oficiales Mexicanas (NOM) - Medición: <https://sinaica.inecc.gob.mx/>
- INEGI. (2020). *DENUE*. Recuperado el 11 de 05 de 2020, de <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/denue/>
- INEGI. (11 de 07 de 2020). *Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas*. Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/denue/>
- IPCC. (08 de 2018). *Glosario*. Recuperado el 16 de 05 de 2020, de https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/08/WGI_AR5_glossary_ES.pdf
- IPCC. (2019). *Working Group I: The Scientific Basis*. Obtenido de <https://archive.ipcc.ch/ipccreports/tar/wg1/016.htm>
- Jasso-Pineda, Y., Díaz-Barriga, F., Yáñez-Estrada, L., Pérez-Vázquez, F., & Pérez-Maldonado, I. (2015). DNA damage in Mexican children living in high-risk contaminates scenarios. *Science of The Total Environment*, *15*, 38-48. doi:10.1016/j.scitotenv.2015.02.073
- Jin, T., Han, M., Han, K., Fu, X., Xu, L., & Xu, X. (2018). Health Risk of Ambient PM10-bound PAHs at Bus Stops in Spring and Autumn in Tianjin, China. *Aerosol and Air Quality Research*, 1828-1838. doi:10.4209/aaqr.2017.11.0461
- Johnse, A., & Karlson, U. (2007). Diffuse PAH contamination of surface soils: environmental occurrence, bioavailability, and microbial degradation. *Applied Microbiology and Biotechnology*, *76*(3), 533-543. doi:10.1007/s00253-007-1045-2
- Johnse, A., & Karlson, U. (2007). Diffuse PAH contamination of surface soils: environmental occurrence, bioavailability, and microbial degradation. *Appl Microbiol Biotechnoology*, 533-543.
- Kim, S., Bell, M., Hashizume, M., Honda, Y., Kan, H., & Kim, H. (2017). Associations between mortality and prolonged exposure to elevated particulate matter concentrations in East Asia. *Environment International*. doi:10.1016/j.envint.2017.10.010
- Kolhe, A., Aher, G., Ralegankar, S., & Safai, P. (2018). Investigation of aerosol black carbon over semi-urban and urban locations in south-western India. *Atmospheric Pollution Research*, 1111-1130.

- Krecl, P., Targino, A., Ketzel, M., Cipoli, Y., & Charres, I. (2019). Potential to reduce the concentrations of short-lived climate pollutants in traffic environments: A case study in a medium-sized city in Brazil. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 69, 51-65. doi:10.1016/j.trd.2019.01.032
- Küpper, M., Quass, U., John, A., Kaminski, H., Leinert, S., Breuer, L., . . . Kuhlbusch, T. (2019). Contributions of carbonaceous particles from fossil emissions and biomass burning to PM10 in the Ruhr area, Germany. *Atmospheric Environment*, 174-186. doi:10.1016/j.atmosenv.2018.06.039
- La Orquesta. (05 de 03 de 2019). Decomisan 15 toneladas de residuos prohibidos en ladrilleras de SLP. Obtenido de <https://laorquesta.mx/decomisan-15-toneladas-de-residuos-prohibidos-en-ladrilleras-de-slp/>
- Lack, D., Moosmüller, H., & McMeeking, G. (2014). Characterizing elemental, equivalent black, and refractory black carbon aerosol particles: a review of techniques, their limitations, and uncertainties. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 99-122.
- Larrea, A. L. (2019). Health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH's) adsorbed in PM2.5 and PM10 in a region of Arequipa, Peru. *Environmental Science and Pollution Research*, 3065-3075. doi:10.1007/s11356-019-07185-5
- Larrea, A., Reyes, J., Salcedo, J., & Wannaz, E. (2019). Health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) adsorben in PM2.5 and PM10 in a region of Arequipa, Peru. *Environmental Science and Pollution Research*, 3065-3075. doi:10.1007/s11365-019-07185-5
- Li, Z., Wen, Q., & Zhang, R. (2017). Sources, health effects and control strategies of indoor fine particulate matter (PM2.5): A review. *Science of the Total Environment*. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.02.029
- Lin, W., Dai, J., Liu, R., Zhai, Y., Yue, D., & Hu, Q. (2019). Integrated assessment of health risk and climate effects of black carbon in the Pearl River Delta region, China. *Environmental Research*. doi:10.1016/j.envres.2019.06.003
- Loera, S. (2016). *Fluorescencia de Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAPs) en agua de mar* (Maestría). Instituto Politécnico Nacional.
- López, C. (2017). *La Tercera chica: los usos y prácticas del agua entre cultivos, ladrillos y viviendas* (Maestría). Colegio de San Luis.
- Lund, M., Samset, B., Skeie, R., Watson-Parris, D., Katich, J., Schwarz, J., & Weinzierl, B. (2018). Short Black Carbon lifetime inferred from a global set of aircraft observations. *npj Clim Atmos Sci*, 1(31). doi:10.1038/s41612-018-0040-x
- Martínez, E. (2004). *Contaminación Atmosférica*. Ediciones de la Universidad de Castilla-La Mancha.

- Matandrea, C., Chichizola, C., Ludueña, B., Sánchez, H., Álvarez, H., & Gutiérrez, A. (2005). Hidrocarburos aromáticos policíclicos. Riesgos para la salud y marcadores biológicos. *Acta Bioquímica Clínica Latinoamericana*, 39(1), 27-36.
- Molina, M., & Rowland, F. (1974). Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom-catalysed destruction of ozone. *Nature*, 249(5460), 810-812.
- Mukherjee, A., & Agrawal, M. (2017). World air particulate matter: sources, distribution and health effects. *Environmental Chemistry Letter*, 15, 283-309.
doi:10.1007/s10311-017-0611-9
- Ngo, N., Bao, X., & Zhong, N. (2018). Local pollutants go global: The impacts of intercontinental air pollution from China on air quality and morbidity in California. *Environmental Research*. doi:10.1016/j.envres.2018.04.027
- Núñez, V., Rodríguez, R., Gómez, C., Herrera, I., & Morales, M. (2019). Emisiones de dióxido de azufre a la atmósfera por fuentes fijas del MINAG y su influencia en la calidad del aire en la provincia de Villa Clara. *Centro Agrícola*, 46(3), 86-95.
- OMS. (2005). *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre*. Ginebra.
- OMS. (2010). *Public health, environmental and social determinants of health (PHE)*. Obtenido de Database: outdoor air pollution in cities:
https://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/databases/cities-2011/en/
- OMS. (2012). *Health effects of Black Carbon*. Copenhagen.
- OMS. (2016). Obtenido de <http://www.who.int/sustainable-development/news-events/breath-life/en/>.
- OMS. (2017). *BreatheLife: air pollution is an invisible killer*. Recuperado el 20 de 06 de 2019, de <https://www.who.int/sustainable-development/news-events/breath-life/about/en/>
- OMS. (12 de 10 de 2018). *Air pollution*. Recuperado el 14 de 09 de 2020, de Air Pollution infographics: <https://www.paho.org/en/documents/infographic-air-pollution-silent-killer-2018>
- OMS. (23 de 07 de 2019). *Intoxicación por plomo y salud*. Recuperado el 12 de 05 de 2020, de <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/lead-poisoning-and-health>
- OMS. (2019). *Reducción de los riesgos sanitarios mundiales mediante la mitigación de los efectos de los contaminantes climáticos de vida corta*. Recuperado el 22 de 08 de 2019, de https://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/climate-reducing-health-risks-faq/es/

- Orru, H., Ebi, K., & B., F. (2017). The Interplay of Climate Change and Air Pollution on Health. *Current Environmental Health Reports*, 504-513. doi:10.1007/s40572-017-0168-6
- Ortiz, R., Cram, S., & Sommer, I. (2012). Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) en suelos de la llanura aluvial baja del Estado de Tabasco, México. *Universidad y Ciencia*, 28(2), 131-144.
- Palacios-Ramírez, A., Flores, R., Pérez-Vázquez, F., Rodríguez-Aguilar, M., Schilmann, A., Riojas-Rodríguez, H., . . . Díaz-Barriga, F. (2018). Evaluación de la exposición a hidrocarburos aromáticos policíclicos y partículas en suspensión (PM_{2,5}) por quema de biomasa en una zona indígena del Estado de San Luis Potosí, México. *Revista de Salud Ambiental*, 18(1), 29-36.
- Paloluoglu, C., Bayraktar, H., Aktan, M., Turalioglu, F., & Eftade, E. (2016). Atmospheric concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in an urban traffic site in Erzurum, Turkey. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 1223-1234. doi:10.1007/s00477-015-1110-9
- Peralta, O., Ortíz, A., Basaldud, R., Santiago, N., Alvarez, H., de la Cruz, K., . . . Gavián, A. (2019). Atmospheric black carbon concentrations in Mexico. *Atmospheric Research*, 230. doi:10.1016/j.atmosres.2019.104626
- PMPCA. (2019). *Programa Multidisciplinario 2019*. Obtenido de Diagnóstico Socioambiental de la Sierra de San Miguelito: <https://multi2019.wixsite.com/diagnosticossm>
- PNUD. (16 de 01 de 2020). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Obtenido de <https://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals.html>
- PRTR. (2017). *CH4 (Metano)*. Obtenido de <http://www.prtr-es.es/CH4-metano,15588,11,2007.html>
- PRTR. (2017). *CO2 (Dióxido de carbono)*. Recuperado el 05 de 05 de 2020, de <http://www.prtr-es.es/CO2-Dioxido-de-carbono,15590,11,2007.html>
- PRTR. (24 de 10 de 2019). *Naftaleno*. Obtenido de <http://www.prtr-es.es/Naftaleno,15655,11,2007.html>
- PRTR. (2020). *N2O (ÓXIDO NITROSO)*. Recuperado el 08 de 20 de 2020, de <http://www.prtr-es.es/N2O-oxido-nitroso,15592,11,2007.html>
- Quijano, A., & Meléndez, I. (2014). Identificación de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPS) en el aire de Cúcuta-Colombia: Efecto gen tóxico. *Escuela de Ingeniería de Antioquia*, 11(21), 79-87. doi:10.14508/reia.2014.11.21.79-87
- Quijano, A., & Meléndez, I. (2014). Identificación de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPS) en el aire de Cúcuta-Colombia: Efecto gen tóxico. *Escuela de Ingeniería de Antioquia*, 79-87.

- Riojas, H. (2017). Efectos en la salud por la contaminación atmosférica en México. *Día Interamericano de calidad del aire*.
- Roca, B., Beltrán, M., & Gómez, R. (2019). Cambio climático y salud. *Revista Clínica Española*, 260-265. doi:10.1016/j.rce.2019.01.004
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, K., Chapin, F., Lambin, E., . . . Folke, C. (24 de 09 de 2009). A safe operating for humanity. *Nature*, 461, 472-475. doi:10.1038/461472a
- Rojas, L. G. (2003). Las partículas suspendidas, aeropartículas o aerosoles: ¿hacen daño a la salud?; ¿podemos hacer algo? *Gaceta Ecológica*, 29-44.
- Samburova, V., Zielinska, B., & Khlystov, A. (2017). Do 16 Policyclic Aromatic Hydrocarbons Represent PAH Air Toxicity? *Toxics*. doi:10.3390/toxics5030017
- Samburova, V., Zielinska, B., & Khlystov, A. (2017). Do 16 Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Represent PAH Air Toxicity? *Toxics*, 5(17). doi:10.3390/toxics5030017
- SEGAM. (2015). *Programa de gestión para mejorar la calidad del aire en la zona metropolitana de San Luis Potosí - Soledad de Graciano Sánchez 2013-2021*. San Luis Potosí. Recuperado el 09 de 10 de 2019, de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/250972/ProAire_SLP.pdf
- SEMARNAT. (2011). *Guía metodológica para la estimación de emisiones de PM2.5* (Primera ed.). Ciudad de México, México.
- SEMARNAT. (2013). *Calidad del aire: Una práctica de vida*. CDMX.
- SEMARNAT. (2017). *Informe Nacional de Calidad del Aire 2016, México*. Ciudad de México.
- SEMARNAT. (10 de 12 de 2019). *Documentacion relacionada al Inventario Nacional de Emisiones*. Recuperado el 12 de 05 de 2020, de <https://www.gob.mx/semarnat/documentos/documentos-del-inventario-nacional-de-emisiones>
- SEMARNAT. (22 de 03 de 2019). *Inventario Nacional de Emisiones de Contaminantes Criterio (INEM)*. Recuperado el 22 de 05 de 2020, de <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/inventario-nacional-de-emisiones-de-contaminantes-criterio-inem>
- Song, Y. L. (2017). Exposure to nanoparticles is related to pleural effusion, pulmonary fibrosis and granuloma. *European Respiratory Journal*, 559-567.
- Stadel, C. (2000). Ciudades medianas y aspectos de la sustentabilidad urbana en la región andina. *Espacio y Desarrollo*.

- Suarez, L., Torres, C., Helmig, D., & Hueber, J. (2017). Medición y análisis del aerosol de carbono negro en el observatorio de Huancayo, Perú. *Revista Boliviana de Física*, 7-15.
- Tribunal de Cuentas Europeo. (14 de 12 de 2018). *Contaminación atmosférica: nuestra salud no tiene todavía la suficiente protección*. Luxemburgo. Obtenido de https://www.google.com/search?rlz=1C1CHBF_esMX807MX807&sxsrf=ALeKk03rcmAH068YddJwK_2XGFHFImPYIQ%3A1589846426040&ei=miHDXvT7AfCMtgXb0YXgDw&q=normas+pm10+europa&oq=normas+pm10+europa&gs_lcp=CgZwc3ktYWlQAzIFCAAQzQIyBQgAEM0COgQIABBHOgYIABAWEB5Q_HZY-YMBYPaLAWg
- Ubilla, C., & Yohannessen, K. (2017). Contaminación atmosférica efectos en la salud respiratoria en el niño. *Revista Médica Clínica Las Condes*, 111-118. doi:10.1016/j.rmcl.2016.12.003
- Vargas, M., Romero, G., Palencia, A., Rivero, E., & Piñero, S. (2013). Equivalentes tóxicos de hidrocarburos aromáticos policíclicos en particulado atmosférico en Valencia, Venezuela. *Acta Toxicológica Argentina*, 69-77.
- Vargas, M., Romero, G., Palencia, A., Rivero, E., & Piñero, S. (2013). Equivalentes tóxicos de hidrocarburos aromáticos policíclicos en particulado atmosférico en Valencia, Venezuela. *Acta Toxicológica Argentina*, 21(2), 69-77.
- Wang, C. Z. (2017). Developing a Black Carbon-Substitute Multimedia Model for Simulating the PAH Distributions in Urban Environments. *Nature*. doi:DOI:10.1038/s41598-017-14789-9
- Wang, C., Zhou, S., He, Y., Wang, J., Wang, F., & S., W. (2017). Developing a Black Carbon-Substitute Multimedia Model for Simulating the PAH Distributions in Urban Environments. *Nature*. doi:DOI:10.1038/s41598-017-14789-9
- Wang, X., Shen, Z., Zeng, Y., Liu, F., Zhang, Q., Lei, Y., . . . Yang, L. (2018). Day-Night Differences, Seasonal Variations and SOURCE Apportionment of PM10-Bound PAHs over Xi'an, Northwest China. *Atmosphere*, 9(2). doi:10.3390/atmos9020062
- Wang, X., Shen, Z., Zeng, Y., Liu, F., Zhang, Q., Lei, Y., . . . Yang, L. (2018). Day-Night Differences, Seasonal Variations and Source Apportionment of PM10-Bound PAHs over Xián, Northwest China. *Atmosphere*, 9(62). doi:10.3390/atmos9020062
- Wang, Y., Zhan, Q., Zhang, Y., Zhao, H., Tan, F., Wu, X., & Chen, J. (2019). Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the air of Dalian, China: Correlations with six criteria air pollutants and meteorological conditions. *Chemosphere*, 216, 516-523. doi:10.1016/j.chemosphere.2018.10.184
- Wang, Y., Zhang, Q., Zhang, Y., Zhao, H., Tan, F., Wu, X., & Chen, J. (2019). Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the air of Dalian,

- China: Correlations with six criteria air pollutants and meteorological conditions. *Chemosphere*, 216, 516-523. doi:10.1016/j.chemosphere.2018.10.184
- Wark, K., & Warner, C. (2002). *Contaminación del Aire, origen y control*. Ciudad de México: Limusa.
- Wiseman, C., & Zereini, F. (2011). Airbone Particulate Matter: Sources, Composition and Concentration. En F. Zereini, & C. Wiseman, *Urban Airbone Particulate Matter* (págs. 3-18). Berlin, Alemania: Springer. doi:10.1007/978-3-642-12278-1
- Zhan, C., Wan, D., & Han, Y. (2019). Historical variation of black carbon and PAHs over the last ~200 years in central North China: eVIDENCE FROM LAKE SEDIMENT RECORDS. *Science of the Total Environment*, 891-899.
- Zhang, Q., Jiang, X., Tong, D., Davis, S., Zhao, H., Geng, G., . . . Guan, D. (2017). Transboundary health impacts of transported global air pollution and international trade. *Nature*, 705-709. doi:10.1038/nature21712
- Zhang, R., Liu, C., Zhou, G., Sun, N., Liu, N., Hsu, P., . . . Cui, Y. (2018). Morphology and property investigation of primary particulate matter particles from different sources. *Nano Research*, 3182 - 3192. doi:10.1007/s12274-017-1724-y
- Zhao, S. Y. (2019). PM1 carbonaceous aerosols during winter in a typical valley city of western China: Vertical profiles and the key influencing factors. *Atmospheric Environment*, 75-92.
- Zhu, J., Hsu, C., CHOU, w., Chen, M., Chen, J., Yang, T., . . . Chen, Y. (2019). PM2.5- and PM10-bound polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH's) in the residential area near coal-fired power and steelmaking plants of Taichung City, Taiwan: In vitro-based health risk and source identification. *Science of the Total Environment*, 670, 439-447. doi:10.1016/j.scitotenv2019.03.198