

UNIVERSIDAD ESTATAL DE SONORA
UNIDAD ACADÉMICA HERMOSILLO
MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES



**CARACTERIZACIÓN DE COMPUESTOS QUÍMICOS ASOCIADOS A
PLÁSTICOS EN PARTÍCULAS RESPIRABLES PM₁₀ EN LA ZONA
NORTE DE LA CIUDAD DE HERMOSILLO, SONORA, MÉXICO.**

TESIS

**QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS AMBIENTALES**

PRESENTA:

AILIN BUSTAMANTE JUVERA

HERMOSILLO, SONORA.

OCTUBRE 2023

UNIVERSIDAD ESTATAL DE SONORA
UNIDAD ACADÉMICA HERMOSILLO
MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES

TESIS

**CARACTERIZACIÓN DE COMPUESTOS QUÍMICOS ASOCIADOS A
PLÁSTICOS EN PARTÍCULAS RESPIRABLES PM₁₀ EN LA ZONA
NORTE DE LA CIUDAD DE HERMOSILLO, SONORA, MÉXICO.**

COMITÉ REVISOR

Director

Dr. Martín Eusebio Cruz Campas

Secretario

Vocal

Dr. Roberto Ramírez Leal

Dr. Alberto Macías Duarte

HERMOSILLO, SONORA.

OCTUBRE 2023

AGRADECIMIENTO

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por darme la oportunidad de estudiar un posgrado en el programa de Ciencias Ambientales.

A la Universidad Estatal de Sonora, por aceptarme como alumna en la maestría, y a todos y cada uno de los docentes por sus enseñanzas y apoyo, en especial al Dr. Roberto Ramírez Leal por sus consejos y al Dr. Alberto Macías Duarte por el apoyo en los análisis estadísticos, a ambos por su interés, sus recomendaciones y al tiempo dedicado en mi proyecto.

Quiero agradecer especialmente al Dr. Martín Eusebio Cruz Campas, por todo su apoyo, tiempo, enseñanzas, dirección y consejos en estos años, por creer y confiar en mi para el desarrollo de este trabajo de investigación.

Al Instituto Municipal de Ecología del H. Ayuntamiento de Hermosillo por participar y permitirme trabajar con las tomas de muestras de PM₁₀. A la Comisión de Ecología y Desarrollo Sustentable del Estado de Sonora por el financiamiento para llevar a cabo los análisis de Cromatografía de gases / Espectrometría de masas (GC-MS).

Al Dr. Jesús Manuel Quiroz Castillo y al Dr. Pedro Amado Hernández Abril por sus asesorías, tiempo, capacitación y aportaciones en los análisis de Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier con Reflectancia Total Atenuada (FT-IR-ATR).

A la Dra. Diana Meza Figueroa y al Departamento de Geología de la Universidad de Sonora por su apoyo en la realización de los análisis por Microscopia de barrido, Espectroscopía de rayos X de dispersión de energía (SEM-EDS). Particularmente a la Dra. Belem González Grijalva, por tus consejos, acompañamiento, por hacerme

ver todo de manera más sencilla y apoyarme siempre, pero sobre todo por tu amistad, mi eterno agradecimiento.

A mi esposo Daniel, ejemplo de perseverancia, paciencia y comprensión, gracias por todo tu amor. A mis niños Benjamín y Emilia, por interesarse en mi trabajo, por preguntar, por acompañarme, pero sobre todo por comprender y motivarme a continuar.

DEDICATORIA

*A mi esposo **Daniel** por su incondicional apoyo e infinita paciencia.*

*A mis hijos **Benjamín y Emilia** quienes me motivan a superarme diariamente.*

*A mis padres **Alberto y Mahua**, por siempre estar y creer en mí.*

CONTENIDO

I. INTRODUCCIÓN	13
II. MARCO TEÓRICO	16
II.1 Calidad del aire	16
II.2 Principales contaminantes atmosféricos	16
II.3 Normatividad	17
II.4 Plásticos	17
<i>II.4.1 Polietileno (PE)</i>	18
<i>II.4.2 Polipropileno (PP)</i>	19
<i>II.4.3 Poli(cloruro de vinilo) (PVC)</i>	19
<i>II.4.4 Poliestireno (PS)</i>	20
<i>II.4.5 Poli(tereftalato de etileno) (PET)</i>	20
<i>II.4.6 Bisfenoles</i>	22
<i>II.4.7 Ftalatos</i>	22
<i>II.4.8 Compuestos perfluorados</i>	23
<i>II.4.9 Bromados</i>	23
<i>II.4.10 Triclosán</i>	23
II.5 Microplásticos	24
II.6 Determinación de microplásticos en el aire ambiente	26
II.7 Efectos en la salud poblacional	27
II.8 Estudios de calidad del aire en Hermosillo	29
III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	31
IV. JUSTIFICACIÓN	32
V. HIPÓTESIS	33
VI. OBJETIVO	33
VI.1 Objetivo General	33
VI.2 Objetivos Específicos	33
VII. METODOLOGÍA	34
VII.1 Área de estudio	34
VII.2 Muestreo	34

VII.3 Determinación de PM ₁₀	34
VII.4 Procesos analíticos	37
<i>VII.4.1 Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier con Reflectancia Total Atenuada (FT-IR-ATR).</i>	37
<i>VII.4.2 Análisis por microscopia de barrido (SEM)</i>	38
<i>VII.4.3 Espectroscopía de rayos X de dispersión de energía (SEM-EDS)</i>	39
<i>VII.4.4 Clasificación de la distribución de tamaño de partículas</i>	39
<i>VII.4.5 Cromatografía de gases / Espectrometría de masas (GC-MS)</i>	39
VII.5 Análisis estadísticos	42
VIII. RESULTADOS	43
VIII.1 Concentración de PM ₁₀	43
VIII.2 Muestras para Procesos Analíticos	43
<i>VIII.2.1 Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier con Reflectancia Total Atenuada (FT-IR-ATR).</i>	45
<i>VIII.2.2 Análisis por microscopia electrónica de barrido (SEM) - Espectroscopía de rayos X de dispersión de energía (SEM-EDS)</i>	48
<i>VIII.2.3 Análisis por microscopia electrónica de barrido (SEM) – estimación de distribución de tamaño de partículas.</i>	54
<i>VIII.2.4 Cromatografía de gases / Espectrometría de masas (GC-MS)</i>	61
VIII.3 Clasificación y etiquetado de la Agencia Europea de Sustancias Químicas (ECHA).	69
VIII.4 Concentración en el aire ambiente de compuestos químicos identificados y asociados a plásticos.	69
VIII.5. Determinación de relación de la concentración de compuestos químicos asociados a plásticos entre los días analizados.	71
VIII.6 Determinación de la relación entre concentración de compuesto químicos asociados a plásticos y la concentración de PM ₁₀	73
IX. DISCUSIONES	76
IX.1 Concentraciones de PM ₁₀	76
IX.2 Muestras para Procesos Analíticos	77

<i>IX.2.1 Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier con Reflectancia Total Atenuada (FT-IR-ATR)</i>	<i>77</i>
<i>IX.2.2 Análisis por microscopia electrónica de barrido (SEM) - Espectroscopía de rayos X de dispersión de energía (SEM-EDS)</i>	<i>78</i>
<i>IX.2.3 Análisis por microscopia electrónica de barrido (SEM) - distribución de tamaño de partículas</i>	<i>79</i>
<i>IX.2.4 Cromatografía de gases / Espectrometría de masas (GC-MS).....</i>	<i>81</i>
<i>IX.2.5 Clasificación y etiquetado de la Agencia Europea de Sustancias Químicas (ECHA).....</i>	<i>83</i>
<i>IX.2.6 Concentración ($\mu\text{g}/\text{Std}\text{m}^3$) de compuestos químicos identificados y asociados a polímeros en partículas PM_{10} del aire ambiente.....</i>	<i>84</i>
IX.5 Limitaciones de la Investigación	85
X. CONCLUSIONES	86
XI. RECOMENDACIONES.....	87
XII. LITERATURA CITADA.....	88
XIII. ANEXOS	101

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Estructura molecular del polietileno (PE).....	18
Figura 2.- Estructura molecular del polipropileno (PP).....	19
Figura 3.- Estructura molecular del policloruro de vinilo (PVC).....	19
Figura 4.- Estructura molecular del poliestireno (PS).....	20
Figura 5.- Estructura molecular del tereftalato de polietileno (PET).....	21
Figura 6.- Ubicación geográfica del área de estudio.....	35
Figura 7.- Imagen de un equipo un muestreador Hi Vol PM ₁₀	36
Figura 8.- Liner con muestra de PM ₁₀	41
Figura 9.-Concentración de PM ₁₀ en la zona norte de la ciudad de Hermosillo durante el año 2021, con línea roja el nivel máximo permisible vigente en México.	44
Figura 10.- Espectros FT-IR, de las muestras analizadas de PM ₁₀ en la estación UES en Hermosillo, Sonora.	47
Figura 11.- Micrografía de la muestra de PM ₁₀ , Trim. I (27/02/2021).....	50
Figura 12.- Micrografía de la muestra de PM ₁₀ , Trim. II (10/04/2021).....	51
Figura 13.- Micrografía de la muestra de PM ₁₀ , Trim. III (13/09/2021).....	52
Figura 14.- Micrografía de la muestra de PM ₁₀ , Trim. IV (06/11/2021).....	53
Figura 15.- Micrografía y frecuencia por tamaño de partículas (μ), muestra de PM ₁₀ , Trim. I (27/02/2021).....	55
Figura 16.- Micrografía y frecuencia por tamaño de partículas (μ), muestra de PM ₁₀ , Trim. II (10/04/2021).....	56
Figura 17.- Micrografía y frecuencia por tamaño de partículas (μ), muestra de PM ₁₀ , Trim. III (13/09/2021).....	57
Figura 18.- Micrografía y frecuencia por tamaño de partículas (μ), muestra de PM ₁₀ , Trim. IV (06/11/2021).	58
Figura 19.- Concentración de compuestos químicos asociados a polímeros, identificados en partículas del aire ambiente en su fracción respirable PM ₁₀ en Hermosillo, Sonora, muestra Trim. I (27/02/2021).	65
Figura 20.- Concentración de compuestos químicos asociados a polímeros, identificados en partículas del aire ambiente en su fracción respirable PM ₁₀ en Hermosillo, Sonora, muestra Trim. II (10/04/2021).	66
Figura 21.- Concentración de compuestos químicos asociados a polímeros, identificados en partículas del aire ambiente en su fracción respirable PM ₁₀ en Hermosillo, Sonora, muestra Trim. III (13/09/2021).	67

Figura 22.- Concentración de compuestos químicos asociados a polímeros, identificados en partículas del aire ambiente en su fracción respirable PM ₁₀ en Hermosillo, Sonora, muestra Trim. IV (06/11/2021).	68
Figura 23.- Grafica de ordenación por un análisis de correspondencia de compuestos químicos asociados a plásticos (números arábigos) en muestras de PM ₁₀ de aire ambiente con relación a los días muestreados (números romanos). 72	72
Figura 24.- Grafica de ordenación por un análisis de correspondencia de compuestos químicos asociados a plásticos (números arábigos) con riesgo a la salud en muestras de PM ₁₀ de aire ambiente con relación a los días muestreados (números romanos).	74
Figura 25.- Correlación entre la concentración de compuestos químicos asociados a plásticos y la concentración de PM ₁₀ en el aire ambiente en la ciudad de Hermosillo, Sonora.	75

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Máximos permisibles en Normas Oficiales Mexicanas en materia de calidad del aire.	18
Tabla 2.- Muestras de PM ₁₀ seleccionadas para análisis químicos (considerando la muestra con mayor concentración de cada trimestre).	45
Tabla 3.- Resumen de resultados de FT-IR de muestras de PM ₁₀ y comparación con resultados del blanco o filtro de muestreo.	49
Tabla 4.- Análisis químico elemental de muestra PM ₁₀ , Trim. I (27/02/2021).	50
Tabla 5.- Análisis químico elemental de muestra PM ₁₀ , Trim. II (10/04/2021).	51
Tabla 6.- Análisis químico elemental de muestra PM ₁₀ , Trim. III (13/09/2021).	52
Tabla 7.- Análisis químico elemental de muestra PM ₁₀ , Trim. IV (06/11/2021).	53
Tabla 8.- Resumen de número probable de partículas N(PM _x μ)/m ³ según su tamaño en la fracción respirable PM ₁₀ en la estación UES en Hermosillo, Sonora.	59
Tabla 9.- Estimación del peso de partículas en la fracción respirable, considerando menores y mayores a 2.5 μ por metro cubico en el aire ambiente en la estación UES en Hermosillo, Sonora, México.	60
Tabla 10.- Compuestos químicos asociados a plásticos identificados en muestras de partículas del aire ambiente en su fracción respirable PM ₁₀ en la estación UES en Hermosillo, Sonora, México.	61
Tabla 11.- Compuestos químicos asociados a plásticos identificados en muestras de partículas del aire ambiente en su fracción respirable PM ₁₀ en muestras trimestrales en Hermosillo, Sonora, México.	62
Tabla 12.- Concentración (μg/m ³) de compuestos químicos asociados a plásticos identificados en muestras de PM ₁₀ de aire ambiente en la ciudad de Hermosillo, Sonora.	69
Tabla 13.- Concentración en aire de compuestos químicos asociados a plásticos identificados en muestras de PM ₁₀ en la estación UES en Hermosillo, Sonora y su porcentaje respecto de la concentración de las partículas respirables PM ₁₀	71

RESUMEN

Los contaminantes del aire afectan de manera adversa la salud de humanos, animales, plantas o vida microbiana, dañan materiales o interfieren con la calidad de vida. Además de los contaminantes criterio (SO_2 , NO_2 , O_3 , CO , Pb , PM) (SEMARNAT, 2019), en los últimos años, se han añadido nuevos contaminantes al aire, entre ellos los microplásticos, convirtiéndose en una preocupación emergente en todo el mundo. El presente trabajo busca Identificar y clasificar compuestos químicos asociados a plásticos presentes en las partículas respirables PM_{10} y la posible relación con su concentración en el aire ambiente de la Ciudad de Hermosillo, Sonora. Para el periodo anual 2021 se obtuvieron 51 muestreos de PM_{10} , en un muestreador de alto volumen del tipo manual. Para realizar los procesos analíticos se tomó una muestra por trimestre aplicando los análisis por FT-IR y GC-MS. En los estudios de GC-MS se identificaron 74 compuestos químicos asociados a los siguientes tipos de plásticos: Poli(etileno-metil acrilato), Poliamida, Poliéter y Polietileno, además dos compuestos químicos relacionados a plastificantes. Los compuestos químicos identificados se compararon con las bases de clasificación y etiquetado de la Agencia Europea de Sustancias Químicas, encontrando que el 43% de estos están bajo algún tipo de clasificación de daño a la salud.

I. INTRODUCCIÓN

Los contaminantes del aire son sustancias que cuando están presentes en la atmósfera afectan de manera adversa la salud de humanos, animales, plantas o vida microbiana, dañan materiales o interfieren con la calidad de vida (SEMARNAT, 2019). En todo el mundo se ha puesto énfasis en el control de las concentraciones atmosféricas de los contaminantes en el aire, buscando niveles en los cuales no se observen efectos en la salud. La ciencia y la tecnología del control de la contaminación del aire tiene una antigüedad de solo unas cuantas décadas, no obstante, se han producido cambios en las características de los contaminantes logrando avances significativos en el desarrollo tecnológico para su medición y control.

La contaminación en el aire ha conducido a la caracterización de contaminantes como: partículas, dióxido de azufre, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, compuestos orgánicos volátiles y ozono, conocidos también como contaminantes criterio (Henry & Heinke, 1999).

Actualmente, existe suficiente evidencia científica para señalar que la exposición a contaminantes atmosféricos ocasiona daños a la salud de las personas, a la productividad sostenible de los ecosistemas y a la economía de los países (ENCA, 2017).

La norma oficial mexicana NOM-156-SEMARNAT-2012 (SEMARNAT, 2012) relacionada al monitoreo de contaminantes del aire es de importancia fundamental para proveer la información necesaria a fin de evaluar la calidad del aire de cada región y sus tendencias, así como para desarrollar estrategias de prevención, control y políticas ambientales integrales, entre otras aplicaciones.

Los índices de calidad del aire representan una de las herramientas de gestión mayormente utilizadas por gobiernos en el mundo para facilitar la comunicación

permanente del riesgo por la exposición a altos niveles de contaminación. Así mismo, en la norma oficial mexicana NOM-172-SEMARNAT-2019 (SEMARNAT, 2019), requiere que no sólo se le informe a la población sobre el estado de la calidad del aire, sino también sobre el nivel de riesgo asociado a probables daños a la salud y las recomendaciones para reducir la exposición.

Por otro lado, es importante asumir que además de los contaminantes criterio (SO_2 , NO_2 , O_3 , CO , Pb , PM), en los últimos años, se han añadido nuevos contaminantes al aire, entre ellos los microplásticos, convirtiéndose en una preocupación emergente en todo el mundo (Gaspéri *et al.*, 2018).

De acuerdo a la Organización Mundial de la Salud (2021) Los riesgos para la salud asociados a las partículas en suspensión de diámetro igual o inferior a 10 y 2.5 μ (PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$, respectivamente) son de especial relevancia para la salud pública. Debido a que son capaces de penetrar en los pulmones, incluso las $\text{PM}_{2.5}$ pueden entrar en el torrente sanguíneo, pudiendo afectar principalmente al sistema cardiovascular y respiratorio, así como a otros órganos.

El presente trabajo explora la hipótesis que la fracción respirable (tamaño de partícula menor a 10 μ) de las partículas del aire contiene microplásticos, debiendo entonces considerarse un nuevo contaminante del aire ambiente que representa riesgo a la salud de la población.

Debido a su ubicuidad, los microplásticos se consideran una seria amenaza. Su contaminación tiene una distribución global y, aunque es difícil determinar de forma fehaciente de donde provienen los plásticos, diversos estudios apuntan a que las ciudades son la fuente más importante. El origen de los tejidos sintéticos, el desgaste de neumáticos y la fragmentación de materiales plásticos de mayor tamaño son naturalmente más abundantes en entornos urbanos (González-Pleiter *et al.*, 2021).

Los microplásticos son un problema medioambiental global que contamina los entornos acuáticos y terrestres, la presencia de éstos en el aire interior y exterior es una preocupación para la salud pública debido a los efectos que pueda ocasionar la constante exposición a los mismos. El conocimiento de las cantidades, características y formas de transporte de los microplásticos en el aire es escaso. Sin embargo, existe certeza que los microplásticos pueden ser ingeridos y/o inhalados por los humanos y animales. Esta evidencia establece la necesidad de llevar a cabo estudios que consideren los impactos que generan los microplásticos en el medio ambiente y la salud humana en general (Wright *et al.*, 2020).

No obstante, los microplásticos presentan desafíos analíticos, como el separar partículas del medio que las rodea, el poder llevar a cabo una caracterización, pues pueden contener químicos adheridos, y hasta la misma naturaleza orgánica y tamaño de estas partículas plásticas representan un reto; acentuándose especialmente para los de nano escala (Lenz *et al.*, 2016).

II. MARCO TEÓRICO

II.1 Calidad del aire

La calidad de aire se define como el estado de la concentración de los diferentes contaminantes atmosféricos, en un período de tiempo y lugar determinado, de acuerdo con la NOM-156-SEMARNAT-2012 (SEMARNAT, 2012). De acuerdo con las estimaciones de 2016 de la Organización Mundial de la Salud, (2021), la contaminación atmosférica en las ciudades y zonas rurales de todo el mundo provoca cada año más de 4.2 millones de muertes prematuras.

II.2 Principales contaminantes atmosféricos

En México, la Secretaría de Salud es el órgano responsable de evaluar la evidencia de los impactos de la contaminación atmosférica en la salud y establecer los límites permisibles de concentración de los contaminantes en la atmósfera y las autoridades ambientales las responsables de la gestión de la calidad del aire y de establecer las metodologías de muestreo o medición, por lo que, en virtud de su competencia directa, se han centrado en controlar las fuentes de emisión de contaminantes (COFEPRIS, 2017).

La Norma Oficial Mexicana NOM-156-SEMARNAT-2012, Establecimiento y operación de sistemas de monitoreo de la calidad del aire, prevé que todas las ciudades que cuentan con más de 500 mil habitantes o con una determinada carga industrial y automovilística, deben monitorear la concentración de emisiones a la atmósfera y generar informes periódicos. Para la gestión integral de la calidad del aire resulta fundamental la observancia de las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) y el uso de los estándares, antes Normas Mexicanas (NMX). Las NOM sobre contaminación atmosférica relacionadas con la salud fijan límites máximos de concentración de diferentes contaminantes que, de ser rebasados, provocan daños en la salud de la población. Otras NOM y estándares se refieren a métodos y procedimientos para medir la contaminación de la atmósfera, por lo que generan la información necesaria para evaluar el cumplimiento de las primeras (ENCA, 2017).

De acuerdo con la OMS (2021), los contaminantes criterio, son los concernientes a: Partículas (PM por sus siglas en inglés), Monóxido de carbono (CO), Ozono (O₃), Dióxido de nitrógeno (NO₂) y Dióxido de azufre (SO₂).

II.3 Normatividad

Existen seis Normas Oficiales Mexicanas (NOM) que establecen los máximos permisibles para seis contaminantes criterio (Tabla 1). Estas NOM enuncian además el tipo de dato base que se utiliza en el cálculo y el tiempo para calcular la métrica, el tipo de exposición, la frecuencia tolerada, los valores límite, y los criterios de suficiencia de información.

Aunadas a las normas de contaminantes criterio, y como se ha mencionado en párrafos anteriores, en México se cuenta con norma para el Establecimiento y operación de sistemas de monitoreo de la calidad del aire, y para los Lineamientos para la obtención y comunicación del Índice de Calidad del aire y riesgos a la Salud.

II.4 Plásticos

De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, FAO (2019), plástico es un término genérico que abarca numerosos materiales a base de polímeros con variadas propiedades físicas y químicas. Estos polímeros se mezclan con diferentes aditivos para mejorar su rendimiento, según las propiedades requeridas en el producto final (plastificantes, antioxidantes, estabilizadores UV, lubricantes y colorantes).

Aunque en la industria los términos polímero y plástico se utilizan indistintamente, estrictamente hablando solo los polímeros que se pueden fundir por un aumento de temperatura son llamados plásticos (Cabra, 2018). Entre los plásticos de mayor producción se encuentran:

Tabla 1.- Máximos permisibles en Normas Oficiales Mexicanas en materia de calidad del aire.

Contaminante	Concentración	Año 1 ^a	Año 3a	Año 5 ^a	Valor límite Indicador con el que se evalúa	Norma Oficial Mexicana
Monóxido de carbono (CO)	Promedio móvil de 8 hora				9.0 ppm	NOM-021-SSA1-2021
Dióxido de azufre (SO ₂)	Promedio de 24 horas				0.04 ppm	NOM-022-SSA1-2019
	Dato horario				0.075 ppm	
Ozono (O ₃)	Dato horario	176 µg/m ³	0.090 ppm	176 µg/m ³	0.090 ppm	NOM-020-SSA1-2021
	Promedio móvil de 8 hora	127 µg/m ³	0.065 ppm	118 µg/m ³	0.060 ppm	
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	Dato horario	200 µg/m ³	0.106 ppm			NOM-023-SSA1-2021
	Promedio anual	40 µg/m ³	0.021 ppm			
Partículas PM ₁₀	Promedio 24 horas	70 µg/m ³ Máximo	60 µg/m ³ Máximo	50 µg/m ³ Máximo		NOM-025-SSA1-2021
	Promedio anual	36 µg/m ³	28 µg/m ³	20 µg/m ³		
Partículas PM _{2.5}	Promedio 24 horas	41 µg/m ³	33 µg/m ³	25 µg/m ³		
	Promedio anual	10 µg/m ³	10 µg/m ³	10 µg/m ³		
Plomo (Pb)	Valor anual				0.50 µg/m ³	NOM-026-SSA1-2021

(a) Los años se contarán a partir de la entrada en vigor de esta Norma

II.4.1 Polietileno (PE)

Es un material termoplástico blanquecino, de transparente a translúcido, y es frecuentemente fabricado en finas láminas transparentes (Figura 1). Este material tiene un uso intenso en la industria, incluyendo tuberías, fibras, películas, aislamiento eléctrico, revestimientos, envases, utensilios caseros, aparatos quirúrgicos, juguetes y artículos de fantasía (Flores, 2009). Se conocen dos tipos fundamentales, de alta y de baja densidad.

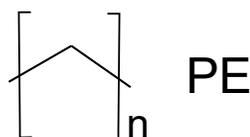


Figura 1.- Estructura molecular del polietileno (PE). Fuente: Instituto de Investigaciones en Materiales (2021).

II.4.2 Polipropileno (PP)

Es ampliamente utilizado para la producción de plásticos moldeados debido a la excelente combinación de propiedades que presenta como peso ligero y resistencia al impacto (Figura 2). Es utilizado para el desarrollo de recipientes rígidos de embalaje, electrodomésticos, herramientas de mano, películas elásticas, fibras y telas, piezas para vehículos, materiales del sector médico y farmacéutico, entre otros (Caicedo *et al.*, 2017).

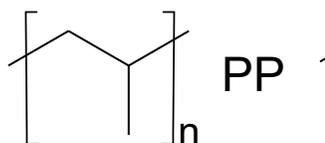


Figura 2.- Estructura molecular del polipropileno (PP). Fuente: Instituto de Investigaciones en Materiales (2021).

II.4.3 Poli(cloruro de vinilo) (PVC)

El proceso industrial de transformación del monoclóruo de vinilo en PVC, es sencillo, rápido y de bajo costo (Figura 3). Por otra parte, durante la fabricación se le pueden añadir sustancias que le confieren propiedades muy útiles, como estabilizantes, colorantes, ignífugos (para hacerlo resistente al fuego), o plastificantes (que proporcionan elasticidad al producto). El PVC, al igual que la mayoría de los plásticos, no se degrada (Valtueña, 2001).

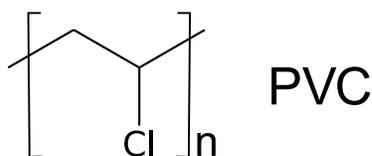


Figura 3.- Estructura molecular del policloruro de vinilo (PVC). Fuente: Instituto de Investigaciones en Materiales (2021).

II.4.4 Poliestireno (PS)

Después del polietileno y el PVC, el plástico de mayor consumo es el poliestireno. Se obtiene a partir del benceno y del etileno. Es amorfo y, por ello, transparente, es quebradizo y no es flexible, se reblandece a menos de 100 °C y es fácilmente moldeable por extrusión, pero no se puede esterilizar (Figura 4). Es un buen aislante eléctrico, combustible y soluble en disolventes orgánicos. El mayor uso de poliestireno es para moldear objetos domésticos, piezas para aparatos eléctricos, envases, entre otros (Yúfera, 1994).

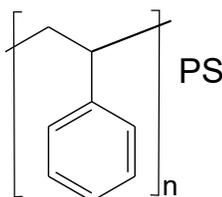


Figura 4.- Estructura molecular del poliestireno (PS). Fuente: Instituto de Investigaciones en Materiales (2021).

II.4.5 Poli(tereftalato de etileno) (PET)

Se divide en PET transparente en estado amorfo, y opaco en estado semicristalino (Figura 5). El PET semicristalino ofrece una estabilidad dimensional excelente, una elevada dureza, rigidez y resistencia a la fluencia, gran resistencia a la abrasión, pero una resistencia mecánica mediana. No resistente al agua caliente (>80°C). A pesar de que el costo es muy favorable, una de las principales limitaciones es la baja fluidez, que dificulta el moldeo por inyección.

El PET amorfo tiene una rigidez y dureza menores, una tenacidad mayor y una temperatura máxima de uso más limitada (>60°C), las transformaciones más habituales son la extrusión de láminas, la coextrusión y la inyección de soplado con estirado, seguido de un tratamiento térmico; se utiliza masivamente en la fabricación de botellas y envases de un solo uso (Romeva, 2010).

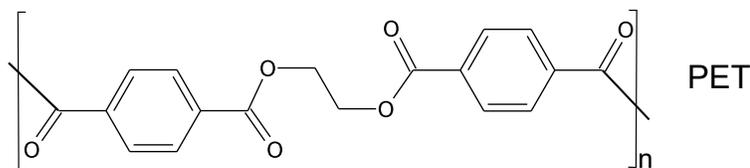


Figura 5.- Estructura molecular del tereftalato de polietileno (PET). Fuente: Instituto de Investigaciones en Materiales (2021).

Los plásticos son probablemente, los materiales más utilizados en el campo doméstico e industrial debido a su alta resistencia a la corrosión y degradación, baja densidad, baja conductividad eléctrica y térmica, y, sobre todo, por su bajo costo de producción (Muñante, 2020).

Sin embargo, los polímeros son complementados de diversos compuestos químicos, con diferentes funciones:

- **Plastificantes:** proporcionan la flexibilidad, dureza o rigidez, dependiendo de las diferentes aplicaciones del producto.
- **Estabilizantes:** se añaden para inhibir o retardar el mecanismo de oxidación y degradación de los polímeros durante su fabricación.
- **Retardantes de llama:** se añaden a todo tipo de material para evitar su flamabilidad. Así, si se produce un incendio, la propagación de las llamas es más lenta.
- **Filtros solares:** se añaden para absorber la luz UV y así aumentar la vida útil de los plásticos expuestos al sol.
- **Antibacteriales:** se añaden para evitar que bacterias crezcan en el plástico. Esto es muy importante para el destinado a usos alimenticios.

Existen más de 3,000 sustancias químicas diferentes asociadas a los plásticos y más de 60 caracterizadas como sustancias de alto riesgo para la salud, siendo algunas de ellas persistentes, bioacumulables y tóxicas. Existe la suficiente

evidencia que demuestra que aditivos comunes del plástico, como los bisfenoles, los ftalatos, los retardantes de llama y los metales pesados, son muy peligrosos para la salud (ECHA, 2022).

II.4.6 Bisfenoles

Los bisfenoles son un grupo de compuestos químicos con dos funcionalidades de hidroxifenil. Se encuentran presentes en muchos productos de plástico policarbonato (incluyendo botellas de agua, recipientes para guardar y envasar comida, equipo deportivo y discos compactos), revestimientos de resina epóxica para latas de aluminio y también frecuentemente se les utiliza como revelador para papel térmico como el que se usa para la impresión de recibos de caja registradora (Centro de Actividad Regional para el Consumo y la Producción Sostenibles, 2020).

II.4.7 Ftalatos

Los ésteres de ácido ftálico o ftalatos son una familia de aditivos utilizados como plastificantes, sobre todo en la producción de PVC. Les añaden fragancia a los productos y los hacen más flexibles. Sin embargo, se han definido a algunos ftalatos como perturbadores del sistema endocrino, incluso en concentraciones bajas.

El PVC puede contener entre un 10% y un 60% de ftalatos por peso. Durante la manufactura, el uso y la eliminación, es fácil que se lixivien al medio ambiente. Son de gran preocupación ya que se les ha encontrado en una amplia gama de ambientes. En 2015, se utilizaron 8.4 millones de toneladas de plastificantes en el mundo. El que se utilizó más comúnmente es Di(2-etilhexil) ftalato (DEHP), representando un 37% del mercado mundial de plastificantes; sin embargo, gradualmente se ha ido reemplazando el DEHP por diisononil ftalato (DiNP), diisodecil ftalato (DiDP) and di(2-propil heptil) ftalato (DPHP), que representaron el 57% del consumo de plastificantes en Europa en 2015 (Centro de Actividad Regional para el Consumo y la Producción Sostenibles, 2020).

II.4.8 Compuestos perfluorados

Las sustancias perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas (PFAS) se han utilizado desde la década de 1940 en una amplia variedad de productos de consumo, como ropa resistente al agua y a las manchas, envasados de comida rápida, lubricantes, tratamientos para alfombras, pinturas, utensilios de cocina y espumas antiincendios (Sociedad de Endocrinología, 2020).

Las PFAS también se han utilizado ampliamente en los materiales que entran en contacto con los alimentos, como las superficies de cocción antiadherentes y los papeles que entran en contacto con los alimentos, como las cajas de pizza, las bolsas de palomitas de maíz para microondas, los papeles para hornear y otros envoltorios de papel; el uso de PFAS en estos materiales tiene por objeto impedir la transferencia de la grasa de los alimentos a otras superficies (Sociedad de Endocrinología, 2020).

Las PFAS se utiliza también en la producción de polímeros, incluyendo los fluoropolímeros, como el politetrafluoroetileno (PTFE). Estos son muy estables y resistentes al calor, la luz y otros químicos (Sociedad de Endocrinología, 2020).

II.4.9 Bromados

Los bromados se han utilizado desde la década de 1970 y son los retardantes de llama más comunes. Se les utiliza en muchos productos de consumo que van desde dispositivos electrónicos hasta espuma aislante (Sociedad de Endocrinología, 2020).

II.4.10 Triclosán

Los plásticos pueden contener agentes antimicrobianos como el triclosán, que se utiliza para inhibir la degradación del material, reducir los olores y disminuir la decoloración. Los productos químicos antimicrobianos se desarrollaron a mediados

de la década de 1990 y desde entonces se han incorporado a numerosos productos de consumo, incluidos los plásticos (Sociedad de Endocrinología, 2020).

II.5 Microplásticos

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) (2019) describe a los microplásticos como pequeñas partículas y fibras de plástico. Aunque no existen estándares establecidos para determinar el tamaño máximo de una partícula, se considera generalmente que el diámetro de la partícula es inferior a 5 mm. De acuerdo con Caldwell *et al.* (2022), actualmente los estudios dividen a los plásticos por tamaño en nanoplástico ($<0.1 \mu$), submicroplásticos ($1 \mu - 0.1 \mu$) y microplásticos ($5,000 \mu - 1 \mu$).

Los microplásticos se clasifican frecuentemente en base a características morfológicas en: a) *tamaño*, b) *forma*, y c) *color* (FAO, 2019) y se subdividen en:

- 1) Primarios: utilizados tanto industrialmente como gránulos de plástico y en productos para el cuidado personal, que se presentan en forma de microperlas y pellets (Sarijan *et al.*, 2019);
- 2) Secundarios: derivados de los residuos plásticos que se encuentran dispersos en el medio ambiente y que se degradan debido a los procesos de foto y termo oxidativa (Street & Bernasconi, 2021), los cuales se categorizan en: películas, fibras, fragmentos de bordes afilados (Sarijan *et al.*, 2019).

Zhang *et al.* (2020) establecieron que existen algunas tendencias generales, como su abundancia en las zonas urbanas, así como también que los fenómenos meteorológicos determinan en gran medida la dispersión y niveles de microplásticos en el aire ambiente.

Esto es coincidente con la información reportada por Wrigth *et al.* (2019), donde reportan altas concentraciones de microplásticos en las megaciudades como París en Francia, Dongguan en China y Londres en Inglaterra, pero también se han encontrado en zonas remotas como los Pirineos franceses y los Alpes suizos; lo que sugiere que las masas de aire transportaron los microplásticos una distancia de hasta 95 km, aunque la concentración anual estimada en estas regiones es baja (promedio de 1.4 a 66 microplásticos/m²).

Por otra parte en un estudio llevado a cabo en el 2018, en Estados Unidos de América, se constató la presencia de microplásticos en un 98% de las muestras trabajadas, con tamaños de partículas entre 4 y 188 μ , y fibras con tamaños entre 20 μ y hasta 3 mm, lo anterior significa que al menos el 70% de las partículas (por tamaño) son transportadas en el polvo con distancias de más de 25 km, mientras que las fibras podrían haber sido transportadas por distancias de hasta 1,000 km (Brahney *et al.*, 2020).

Se tiene documentada una tasa de deposición de microplásticos en un rango de 1,586 a 11,130 partículas/m²/día para el ambiente interior, la cual es superior en comparación a las deposiciones reportadas en el ambiente al aire libre de áreas de conservación remotas de Estados Unidos de América (132 partículas/m²/día) o una región metropolitana europea (137–512 partículas/m²/día), con tamaños de 11–5,000 μ (Cai *et al.*, 2021b).

El volumen de microplásticos en circulación en la atmósfera puede variar sustancialmente a lo largo del tiempo, espacio y condiciones estacionales. Por eso es difícil especificar una cifra clara para los volúmenes que se espera que se contabilicen en una ubicación; sin embargo, es posible afirmar que la atmósfera contiene cierta cantidad de microplásticos, aunque en diferentes cantidades (Yurtsever *et al.*, 2017).

Hasta la fecha, solo unos pocos estudios han cuantificado las tasas de carga de microplásticos atmosféricos en entornos urbanos y remotos, y existe una necesidad clara y creciente de estos tipos de estudios. El hallazgo de que los microplásticos son omnipresentes en la atmósfera y que son transportados a lugares distantes tiene implicaciones ecológicas generalizadas (Brahney *et al.*, 2020).

Aunado a lo anterior, se ha comprobado que los microplásticos pueden interactuar y absorber fácilmente sustancias tóxicas en su superficie, entre las que se destacan sustancias micromoleculares como aditivos químicos (ftalatos), monómeros residuales y sustancias como retardadores de flama, biocidas, hidrocarburos poliaromáticos, entre otros (Castañeda, 2020); incluso Narmadha *et al.* (2020) documentaron que se tiene una tendencia a adherir contaminantes orgánicos o metales traza (Zn, Cd, Fe, Ni, Pb y Cu) en su superficie que aumentan el riesgo para la salud.

Los microplásticos pueden actuar como sustrato para parásitos patógenos y microorganismos elevando la preocupación sobre sus efectos ecológicos. Los microplásticos, entonces, se consideran como un vector de transporte de contaminantes y patógenos y su ingestión proporciona una vía potencial para la transferencia de contaminantes como monómeros y aditivos tóxicos, entre otros contaminantes (Castañeda, 2020).

Por lo anterior, los microplásticos en el aire deben mantenerse (junto con las emisiones de SO_x y NO_x) bajo una estrecha supervisión y ser estudiados con mayor profundidad en términos de su impacto en la salud humana (Yurtsever *et al.*, 2017).

II.6 Determinación de microplásticos en el aire ambiente

Actualmente las investigaciones respecto a los microplásticos en la atmósfera aún se encuentran en etapas tempranas, y falta mucho por comprender e identificar acerca de las distribuciones y los efectos por exposición sobre la salud humana.

Además, no existe un protocolo general validado para muestreo y cuantificación de microplásticos en el medio ambiente, por lo que existe una urgente necesidad de desarrollar e implementar protocolos estandarizados, que incluya el tratamiento y visualización de datos, lo que permitirá la comparación posterior entre diferentes estudios (Silva *et al.*, 2018).

Se han documentado distintos tipos de muestreos. Los *muestreadores pasivos* de deposición atmosférica que proporcionan una ubicación e indicación específica en el tiempo de la cantidad de microplástico que cae sobre la superficie. Los *muestreadores activos* muestrean el aire bombeado, estos son métodos que ha resultado ser muy eficaces para el muestreo de microplásticos atmosféricos, se utilizan con éxito en el muestreo de volúmenes de aire conocidos, durante períodos definidos, en lugares seleccionados (Liu *et al.*, 2020).

Como métodos de análisis documentados, destacan:

- Observación Visual.
- Microscopio Electrónico de Barrido con Detector de Espectroscopia de Energía Dispersa (SEM-EDS).
- Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FT-IR).
- Espectroscopía Raman (RM).
- Microscopía Electrónica de Transmisión (TEM).
- Métodos termoquímicos.
- Espectrometría de Masa (MS).
- Espectroscopía de Fotoelectrones de Rayos X (XPS).
- Reflectometría de Microondas por Resonancia (RMR).

II.7 Efectos en la salud poblacional

Las partículas $<10 \mu$ tienen probabilidades de ser inhaladas por humanos y las partículas $<5 \mu$ pueden depositarse en el pulmón (Jabbal *et al.*, 2017). Los estudios

también han revelado que los microplásticos de tamaño pequeño pueden causar lesiones e implicaciones para la salud (Xie *et al.*, 2022).

El conocimiento actual que se tiene acerca del comportamiento ambiental y los impactos ecológicos de los plásticos pequeños, fragmentos y partículas es limitado, lo que complica abordar el problema de contaminación por microplásticos (Jabbal *et al.*, 2017).

Algunas partículas microplásticas son capaces de penetrar tejidos humanos y desencadenar una respuesta al liberar monómeros, metales pesados y contaminantes orgánicos (Castañeda, 2020). Esto genera aún más inquietud con diversas investigaciones que responden si las fibras ingeridas al ser absorbidas en el intestino liberarían monómeros como etilenglicol, tereftalato de dimetilo, acrilonitrilo, cloruro de vinilo, cloruro de vinilideno, bromuro de vinilo, colorantes dispersivos y mordientes como aluminio, cromo, cobre, potasio, estaño.

Por lo que en la actualidad se podría estar dando una ingestión inadvertida e indiscriminada de microplásticos como el PET y PE, principales polímeros utilizados en envases desechables. Se ha demostrado que los colorantes dispersivos de fibras de poliéster y acrílico causan dermatitis, incluso que las fibras de microplásticos adquiridas mediante inhalación podrían estar relacionadas con el cáncer de pulmón debido a que estudios identificaron fibras plásticas y de celulosa en tejidos pulmonares humanos. Una mayor exposición puede conducir a enfermedades neurodegenerativas, trastornos inmunes y cáncer (Castañeda, 2020).

Leslie *et al.* (2022b) reportaron la identificación de cuatro distintos polímeros de alto volumen de producción aplicados en plástico, mismo que fueron cuantificados por primera vez en sangre de humanos, entre ellos se encuentra el tereftalato de polietileno, polietileno y polímeros de estireno, demostrando que las partículas de plástico son biodisponibles para la absorción en el torrente sanguíneo humano.

Las rutas de absorción de los microplásticos detectados en el torrente sanguíneo humano es probable que sea a través del contacto con las mucosas (ya sea por ingestión o inhalación). La absorción dérmica de partículas finas es poco probable, excepto si la piel está dañada (Schneider *et al.*, 2009). Mientras que las partículas en el aire entre 1 μ y 20 μ son consideradas respirables, las partículas inhaladas ultrafinas ($<0.1 \mu$) pueden ser absorbidas y acumuladas en los pulmones. Se espera que la mayoría de los microplásticos más grandes sean tosidos y eventualmente tragados, lo que genera una segunda oportunidad de ser absorbidas a través del epitelio intestinal (Wright & Kelly, 2017).

El poder evaluar el riesgo para la salud humana (HRA) por contaminación de partículas plásticas, actualmente no es posible debido a la falta de datos sobre el peligro toxicológico y exposición humana (Leslie & Depledge, 2020; Vethaak & Legler, 2021).

II.8 Estudios de calidad del aire en Hermosillo

Existen antecedentes para la ciudad de Hermosillo, donde la medición de partículas suspendidas totales de 1990 a 1995, reportaron que todos esos años se rebasó el máximo permisible anual de $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con promedios anuales que fluctuaban de 126 hasta $565 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Cruz *et al.*, 2013).

De acuerdo con Cruz *et al.* (2013), la ciudad de Hermosillo durante junio del 2001 a mayo del 2002, presento una calidad del aire con respecto de partículas suspendidas totales entre no satisfactoria y mala, con valores máximos de 243 a $610 \mu\text{g}/\text{m}^3$, y un promedio anual de 110 a $244 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para tres sitios en la ciudad (Centro, Noreste y Noroeste). Durante los años 2007 y 2009, la calidad del aire durante la temporada otoño-inverno fue considerada como mala, al presentar más días con concentraciones de PM_{10} por encima de la norma NOM-025-SSA1-1993; lo anterior debido a las condiciones meteorológicas, que presentaron vientos con velocidades menores a 20 km/h y periodos de mayor estabilidad atmosférica, que

propician la acumulación, suspensión y re-suspensión de las partículas en la atmosfera de la Ciudad de Hermosillo (González, 2012).

Para el año 2010, los niveles de concentración de partículas suspendidas totales en otra de las estaciones de la Ciudad de Hermosillo, Sonora (Cobach Sur), se consideraron en rangos similares, de acuerdo con el estudio realizado por Cruz *et al.* (2014), por lo que se superaron los rangos establecidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-1993. Las partículas suspendidas generalmente se componen de partículas de suelo elevadas por vientos, materiales erosionados, cenizas volantes y contaminantes generados por vehículos; considerándose contaminantes ambientales ubicuos que se forman en la construcción de edificios, como resultado de la combustión, entre otros (Ramírez *et al.*, 2014).

SEMARNAT (2017), en el Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire del Estado de Sonora 2017-2026, refleja en los indicadores obtenidos una problemática de PM_{10} en la atmósfera de las localidades evaluadas, la cual principalmente se atribuye a emisiones de partículas provenientes de suelos desprovistos de vegetación o de algún tipo de recubrimiento, generadas por la acción del viento o bien por el paso de vehículos automotores en caminos pavimentados y no pavimentados. Particularmente para la Ciudad de Hermosillo, se establece que durante el año 2016 en dos de las tres estaciones en las que se realizaron muestreos se presentaron días con calidad del aire mala; lo cual indica que hay un problema de calidad del aire por las PM_{10} en Hermosillo.

La SEDATU en su Programa Municipal de Ordenamiento Territorial de Hermosillo 2018 (SEDATU, 2018), establece que las concentraciones de PM_{10} aumentan en la zona noroeste, debido a que los vientos dominantes fluyen en dirección suroeste-noreste y a pesar de la falta de precipitación en la zona, la ventilación en periodos de lluvias se genera en la orientación sur y oeste, estos vientos dominantes transportan las partículas y aumentan la concentración en la zona Noroeste.

III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El material particulado (PM) es un indicador representativo común de la contaminación del aire. Afectan a más personas que cualquier otro contaminante. Se ha reportado que los principales componentes del material particulado son los sulfatos, los nitratos, el amoníaco, el cloruro de sodio, el hollín, los polvos minerales y el agua. Consisten en una compleja mezcla de partículas sólidas y líquidas de sustancias orgánicas e inorgánicas suspendidas en el aire. Si bien las PM₁₀ pueden penetrar y alojarse profundamente dentro de los pulmones, las PM_{2.5} pueden atravesar la barrera pulmonar y entrar en el sistema sanguíneo. La exposición crónica a partículas contribuye al riesgo de desarrollar enfermedades cardiovasculares y respiratorias, así como cáncer de pulmón.

En años recientes se ha detectado la aparición de microplásticos en precipitación atmosférica, lluvia, y polvo doméstico, y estudios científicos han evidenciado que el uso de plásticos puede causar daños ambientales, en particular los microplásticos. Los plásticos están formados por polímeros, normalmente derivados del petróleo, a los que se añaden diversos compuestos químicos, que pueden constituir más del 50% del peso del plástico por lo que es probable que las partículas respirables puedan contener tales compuestos.

El presente estudio prueba la hipótesis de que las partículas respirables PM₁₀ del aire ambiente de la ciudad de Hermosillo contienen compuestos químicos asociados a plásticos.

IV. JUSTIFICACIÓN

Una gran cantidad de estudios relacionados con la salud reconocen que las PM_{10} penetran en los pulmones y pueden generar o exacerbar enfermedades respiratorias y pulmonares crónicas. Sin embargo, se desconoce si los microplásticos forman parte de tales partículas.

La presente investigación se enfoca en determinar si en el aire ambiente de la Ciudad de Hermosillo existen compuestos químicos asociados a plásticos en las partículas respirables PM_{10} considerando que diversos estudios apuntan a que las ciudades son la fuente de emisión más importante de microplásticos.

El presente trabajo de investigación encuentra su justificación al aportar nuevo conocimiento científico respecto de la caracterización de las partículas respirables (PM_{10}), en particular sobre compuestos químicos asociados un nuevo contaminante como lo son los microplásticos en el aire. El mérito de la investigación estriba en que aporta información al estado del arte que abona hacia la identificación de una nueva mala calidad del aire por presencia o concentraciones de compuestos químicos de los plásticos que pudieran generar riesgo a la salud de la población.

V. HIPÓTESIS

Las partículas del aire en su fracción respirable (PM_{10}) en la ciudad de Hermosillo, Sonora, presentan compuestos químicos asociados a plásticos.

VI. OBJETIVO

VI.1 Objetivo General

Identificar y clasificar compuestos químicos asociados a plásticos presentes en las partículas respirables PM_{10} y la posible relación con su concentración en el aire ambiente de la Ciudad de Hermosillo, Sonora.

VI.2 Objetivos Específicos

- Determinar la concentración de partículas respirables PM_{10} .
- Determinar preliminarmente la clasificación de tamaños de partículas en muestras de PM_{10} .
- Analizar químicamente las partículas respirables PM_{10} respecto a compuestos químicos asociados a plásticos.
- Identificar posible relación entre la concentración de compuestos químicos asociados a plásticos en PM_{10} y la concentración de PM_{10} .

VII. METODOLOGÍA

VII.1 Área de estudio

Esta investigación se desarrolló en la ciudad de Hermosillo, en la Unidad Académica Hermosillo de la Universidad Estatal de Sonora (Fig. 6), identificado como punto de muestreo zona norte, en las coordenadas 29°04'30" N, 110°57'30" O a una altitud de 200 m. La población de Hermosillo es de más de 936,263 habitantes. El tipo de clima es muy seco semicálido con lluvias en verano y presenta una temperatura media anual de 25.4 °C y una precipitación media anual de 391.9 mm (INEGI, 2021).

VII.2 Muestreo

Las muestras se colectan con un equipo muestreador de alto volumen tipo manual, ubicado a 8 m de altura, bajo la metodología de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norteamérica (40 CFR Appendix J to part 50 - Reference method for the determination of particulate matter as PM₁₀ in the atmosphere, s. f.).

Los muestreos se realizaron durante el año 2021 cada 6 días por un lapso de 24 h, utilizándose un filtro de fibra de cuarzo (Whatman® QM-A quartz filters) de tamaño de 8 × 10 pulgadas y un flujo de muestreo entre 1.1 y 1.7 m³/min.

VII.3 Determinación de PM₁₀

La para determinación de la concentración de partículas PM₁₀, se utiliza el método gravimétrico, cada filtro se pesa (después de acondicionamiento por 24 horas en un desecador) antes y después del muestreo para determinar la ganancia de peso neto (masa) debido a las partículas recolectadas. El volumen total de aire muestreado, corregido según las condiciones de referencia de la Environmental Protection Agency EPA (25 °C, 101.3 kPa), se determina a partir del caudal medido y el tiempo de muestreo. La concentración másica de PM₁₀ en el aire ambiente se calcula como la masa total de partículas recolectadas en el rango de tamaño de PM₁₀ dividida por el volumen de aire muestreado.

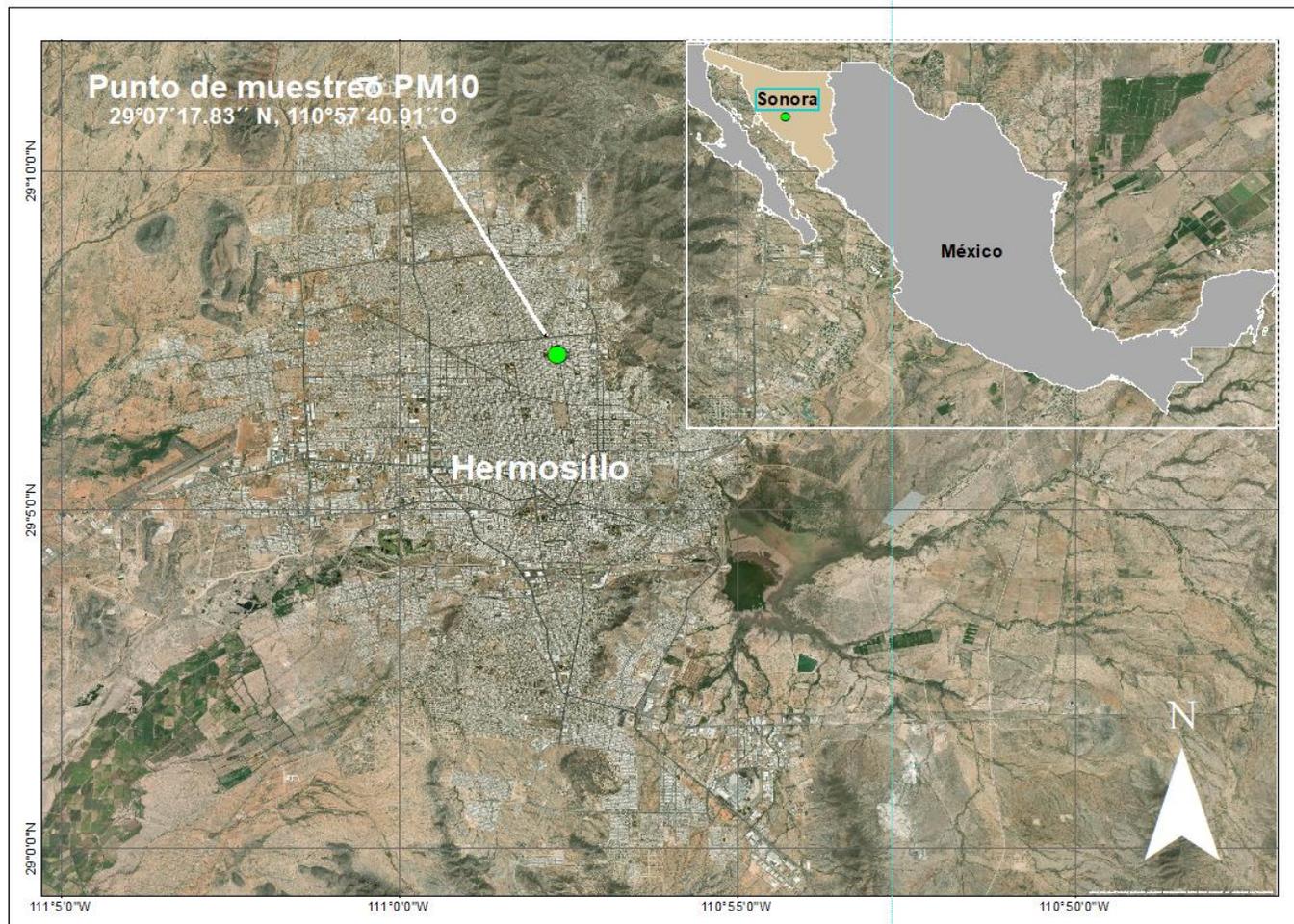


Figura 6.- Ubicación geográfica del área de estudio.



Figura 7.- Imagen de un equipo un muestreador Hi Vol PM₁₀. (Fuente: Tisch Enviromental)

VII.4 Procesos analíticos

VII.4.1 Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier con Reflectancia Total Atenuada (FT-IR-ATR).

Los análisis de espectroscopia infrarroja se realizan con el objetivo de poder evidenciar la presencia o ausencia de los grupos funcionales característicos según los tipos de plásticos.

En la espectroscopía infrarroja (IR), un haz de luz infrarroja incide sobre la materia y provoca vibraciones de los átomos de la molécula. Las vibraciones son específicas a determinadas frecuencias de los enlaces químicos, que corresponden a niveles de energía de la molécula, y van a depender de la forma de la superficie de energía potencial de la molécula, la geometría molecular, las masas atómicas y, posiblemente, el acoplamiento vibracional. La cantidad de luz absorbida es registrada continuamente en rango de longitudes de onda de interés, por lo general, 4000-400 1/cm (Stuart, 2004). El resultado es un espectro IR que sirve como una característica "huella digital molecular" que se puede utilizar para identificar muestras orgánicas e inorgánicas (Guía sobre espectroscopía FT-IR, s. f.).

La señal primero es procesada mediante la Transformada de Fourier (FT) para producir la representación IR más familiar de intensidad en función del número de onda. La adquisición de espectros FT-IR muestran una relación señal-ruido significativamente mejor y tienen una precisión de longitud de onda mucho mayor (Guía sobre espectroscopía FT-IR, s. f.).

Reflexión total atenuada (ATR), es una técnica estándar para la medición de espectros FT-IR. La luz infrarroja pasa a través de un cristal de un determinado material e interactúa con la muestra, con lo que se obtiene un espectro que muestra todas las características específicas de la sustancia. Esta técnica identifica los polímeros existentes en una muestra (Guía sobre espectroscopía FT-IR, s. f.).

El análisis en los filtros se realizó sin una preparación en particular en muestras de 0.8×1.5 cm aproximadamente; colocadas con el lado de la muestra hacia el cristal ATR y aplicación de la torre de presión. Cada espectro IR fue corregido por efectos ópticos con la corrección ATR.

Se obtuvo un espectro de fibra de cuarzo en blanco con cada conjunto de muestras para considerar cualquier cambio en las bandas de absorbancia debido a la desviación del instrumento. Entre cada obtención adquisición de espectros de muestras, se limpió el cristal ATR con acetona, y se obtuvo un espectro de fondo de aire.

Las muestras de aire ambiente PM_{10} se analizaron en diferentes equipos, un equipo Spectrum de la marca Perkin Elmer, Inc., equipado con un único diamante de reflectancia total atenuada (ATR) con un rango de 8300-350 $1/cm$ haz IR variable de 2 a 11 mm de diámetro. Los espectros se recogieron 16 veces con una resolución espectral de 4 $1/cm$. También se obtuvieron espectros en un equipo Perkin Elmer modelo Frontier, empleando la técnica de reflectancia total atenuada (ATR), utilizando un barrido de 32 espectros de 4000 a 400 $1/cm$ de número de onda.

Un tercer grupo de espectros fueron obtenidos utilizando un equipo Nicolet iS 10 FTIR Espectrómetro, de la marca Thermo Scientific, equipado con un diamante sólido para rango espectral completo, con una Resolución espectral de 4000 a 500 $1/cm$.

VII.4.2 Análisis por microscopia de barrido (SEM)

Las muestras se sometieron a microscopia de barrido en un equipo Phenom ProX, de la marca Thermo Fisher, con una magnificación modo Electrónico de 80–130,000x., y rango de magnificación modo Óptico 20–135x., con cámara de navegación a color, accediendo a la visualización desde micras hasta nanómetros. Las visualizaciones se realizaron sin tratamiento previo, tomando cinta adhesiva de carbono de doble cara, la cual se presiona al filtro para tomar muestra del

particulado PM₁₀, y posteriormente se coloca en el porta muestras para aplicar el análisis.

Se realizó el análisis a la muestra seleccionada para cada trimestre por SEM-EDS, obteniéndose para cada una de ellas una micrografía. Dentro del campo de visión de la micrografía, se seleccionó una partícula que por su morfología pudiera representar un microplástico. Así mismo, a cada partícula seleccionada se le realizó el análisis de composición elemental.

VII.4.3 Espectroscopía de rayos X de dispersión de energía (SEM-EDS)

Para la visualización de la distribución de los elementos en las muestras, se utilizó la función Elemental Mapping and Line Scan, realizando un análisis elemental dirigido a las partículas de interés.

VII.4.4 Clasificación de la distribución de tamaño de partículas

Con la herramienta ParticleMetric®, se realiza el análisis de imágenes y partículas como herramienta para inspeccionar las muestras, caracterizando las partículas por tamaño; el conteo de partículas se realiza sumando las partículas expuestas en cinco imágenes tomadas con un campo de visión de 101 μ .

Las imágenes corresponden a los puntos laterales superiores e inferiores, y una central de la muestra colocada en el portamuestra.

VII.4.5 Cromatografía de gases / Espectrometría de masas (GC-MS)

La cromatografía de gases se utiliza para separar y analizar compuestos que se pueden evaporar sin descomponerse. A menudo, emplean la GC para separar los componentes de una mezcla y determinar la cantidad relativa presente de cada uno de ellos; obteniendo análisis cualitativos y cuantitativos (Agilent Technologies, Inc., 2018).

El espectrómetro de masas (MS) produce, separa y detecta iones en fase gaseosa. Los elementos principales que forman un espectrómetro de masas son tres: una fuente de ionización, un analizador de masas y un detector. Los tres elementos se mantienen en una atmósfera de vacío (Jordana-Lluch *et al.*, 2012).

La GC-MS es una técnica analítica dedicada a la separación, identificación y cuantificación de mezclas de sustancias volátiles y semivolátiles. La separación de dichas sustancias depende de la diferente distribución de las sustancias estudiadas entre las fases móvil y estacionaria que conforman el sistema. Una vez separadas las sustancias son fragmentadas y analizadas en función de su patrón de fragmentación (Universidad Veracruzana, 2022).

Para el análisis, se cortó una tira de aproximadamente 3 mm de ancho del filtro, se pesó aproximado de 50 mg (masa inicial) en una balanza analítica Marca Sartorius, modelo MSE224S-100-DU, capacidad: 220 g con una legibilidad de 0,1 mg, No. de identificación EC-068; y se colocaron en un liner Marca SGE Analytical Science, LNR HP 4 mm ID, P/N 092218.

El liner con muestra (Figura 8) se colocó en el puerto de inyección del cromatógrafo de gases con un flujo de helio de 1 mL/min, al alcanzar la temperatura programada de 400 °C en el puerto de inyección se inició el análisis por GC-MS. Al finalizar la corrida cromatográfica se pesó la muestra analizada para conocer la pérdida de peso que sufrió la muestra por el proceso de pirolisis y realizar los cálculos pertinentes.



Figura 8.- Liner con muestra de PM₁₀.

El equipo utilizado es un cromatógrafo de gases marca Agilent, modelo 7890B, no. identificación EC-025 con Detector de Ionización de Flama (FID); con automuestreador GC Sampler 80 y módulo de Head-Space, con No. identificación EC031. Espectrómetro de masas marca Agilent, modelo 5977A, No. identificación EC-026.

La identificación de los compuestos presentes en las muestras se realizó por medio del laboratorio del Centro de Innovación Aplicada en Tecnologías Competitivas (CIATEC), laboratorio de la red CONAHCYT, el cual se encuentra certificado y acreditado bajo la Norma NMX-EC-17025-IMNC-2018 ISO/IEC 17025:2017, Acreditación No. Q-025-005/12, de fecha 08/10/2012.

El método utilizado fue desarrollado por CIATEC con base a los métodos EPA 8270 y EPA 8260; y para cada una de las cuatro mediciones, el laboratorio aplicó las medidas de control de calidad de acuerdo con las técnicas y metodologías desarrolladas, así mismo se realizó análisis a una muestra de filtro blanco a fin de restar en su caso los posibles valores de los compuestos químicos identificados que formaran parte del filtro en el que se tomó la muestra de aire.

VII.5 Análisis estadísticos

Existen fuertes limitantes para la realización de análisis estadísticos en este trabajo debido al tamaño de muestra pequeño ($n = 4$ muestreos). Sin embargo, se realizaron dos intentos de inferencia. Primero, se calculó el coeficiente de correlación lineal (r) entre la concentración total de compuestos de plásticos y la concentración de PM_{10} para inferir la existencia de una relación entre estas variables. Se sometió a r a la prueba de hipótesis de $r = 0$ mediante el estadístico t de Student con $n - 2$ grados de libertad:

$$t = r \sqrt{\frac{n - 2}{1 - r^2}}$$

donde n es el número de muestreos y r es el coeficiente de correlación.

Segundo, se realizó un análisis de correspondencia (AC) (Leps & Smilauer, 2003) para explorar los patrones de co-ocurrencia de 74 compuestos químicos en las cuatro muestras (una por trimestre). El análisis de correspondencia construye variables teóricas o ejes que mejor explican los datos de concentración/presencia de los compuestos químicos, eligiendo los valores de los ejes de los muestreos trimestrales que maximizan la dispersión de los valores de los ejes de compuestos químicos. El resultado principal del análisis de correspondencia es una gráfica de dispersión bidimensional (diagrama de ordenación) en el que compuestos y muestreos se muestran como puntos y donde: 1) la distancia entre los muestreos trimestrales indica la similitud en la ocurrencia de compuestos químicos y 2) distancia entre compuestos químicos indica el grado de co-ocurrencia entre ellos. El análisis de correspondencia fue realizado utilizando el paquete ca (Nenadic y Greenacre, 2007) del programa estadístico R (R Core Team, 2023). Los datos de concentración de los compuestos químicos asociados a plásticos fueron sometidos a una transformación logarítmica $\log_e(y+1)$, para manejar con las escalas de valores disimilares entre los compuestos químicos. Posteriormente se utilizó el diagrama de ordenación para la visualización e interpretación de los datos.

VIII. RESULTADOS

VIII.1 Concentración de PM₁₀

Para el periodo anual 2021 se programaron 61 muestreos de PM₁₀, de los cuales se realizaron 58 de éstos, y de ellos fueron viables para determinación de concentración 51 muestras, representando el 87.93% de la cobertura de muestreo. Los resultados de concentración de PM₁₀ se compararon con el máximo permisible diario establecido en la NOM-025-SSA1-2014, de 75 µg m³, como promedio de 24 horas; identificándose que se rebasó dicho máximo en cuatro ocasiones, representando el 7.8% de los muestreos del año. Los días fueron: 27 de febrero con concentración de 83.9 µg/m³, 06 de noviembre con una concentración de 102.8 µg/m³, 12 de noviembre con concentración de 87.4 µg m³, y 18 de diciembre con concentración de 77.6 µg/m³.

La norma antes citada, establece también un límite anual de: 40 µg/m³, como promedio anual. De acuerdo con los resultados obtenidos, el promedio anual en el ejercicio 2021 fue de 41.33 µg/m³, lo que representa un 2.5% por encima de la norma.

Los comportamientos de la concentración de PM₁₀ durante el año de estudio, presentaron mayores valores durante el primer y último trimestre (Figura 9).

VIII.2 Muestras para Procesos Analíticos

Para la determinación de los compuestos asociados a plásticos en las partículas PM₁₀ se realizó análisis a una muestra por trimestre, considerándose para ello, la muestra con mayor concentración de PM₁₀ de cada trimestre. (Tabla 2).

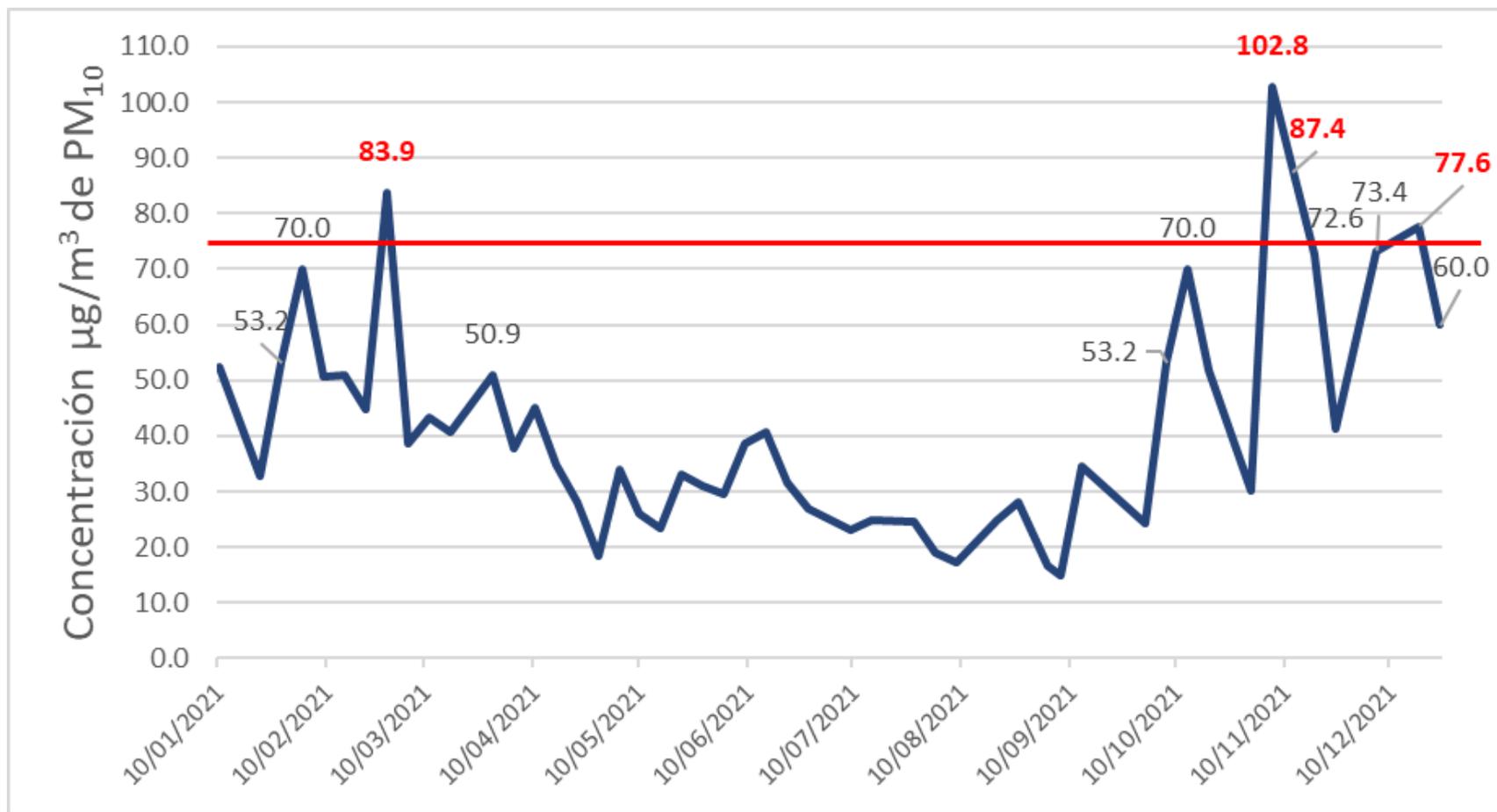


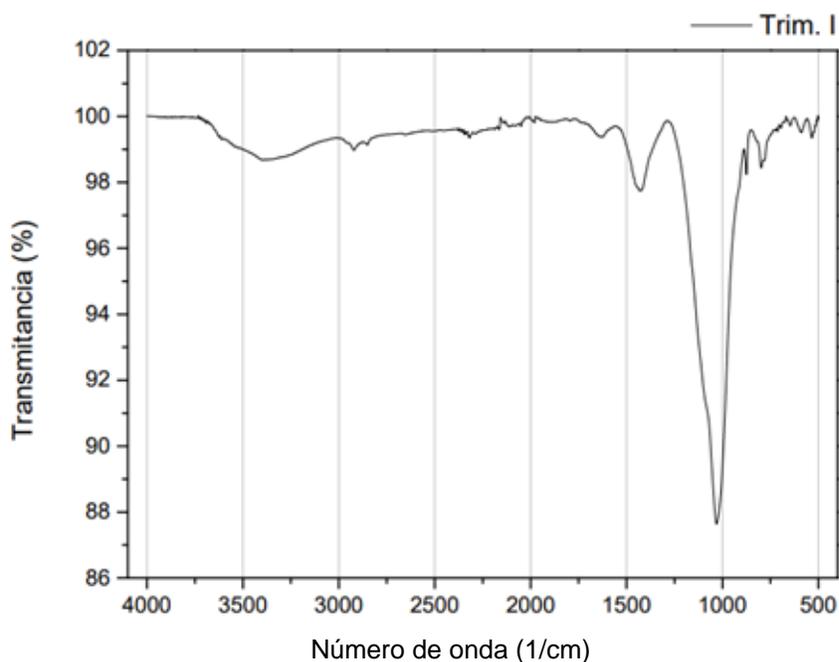
Figura 9. Concentración de PM₁₀ en la zona norte de la ciudad de Hermosillo durante el año 2021, con línea roja el nivel máximo permisible vigente en México.

Tabla 2.- Muestras de PM₁₀ seleccionadas para análisis químicos (considerando la muestra con mayor concentración de cada trimestre).

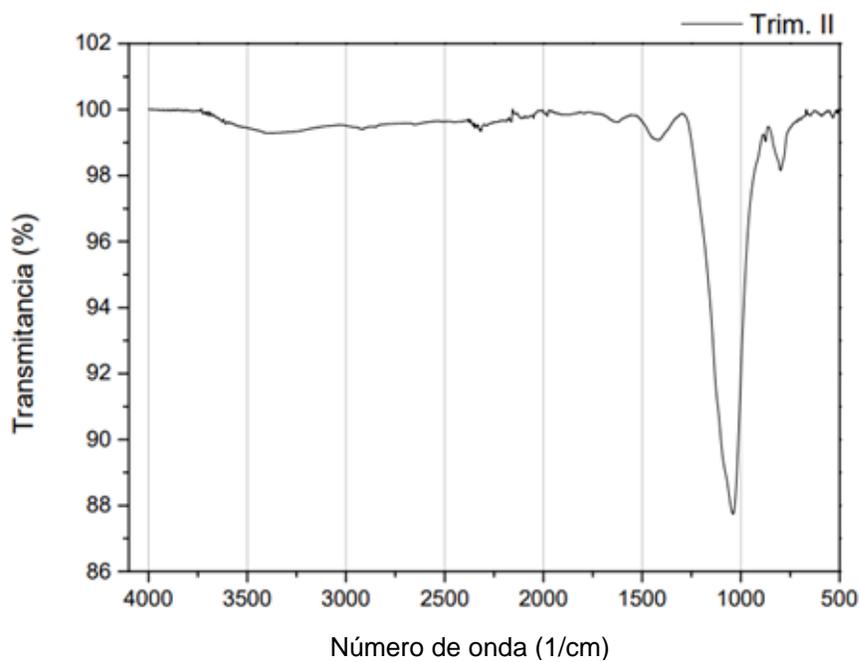
Trimestre	Fecha	µg/m ³
I	27/02/2021	83.9
II	10/04/2021	45.2
III	13/09/2021	34.5
IV	06/11/2021	102.8

VIII.2.1 Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier con Reflectancia Total Atenuada (FT-IR-ATR).

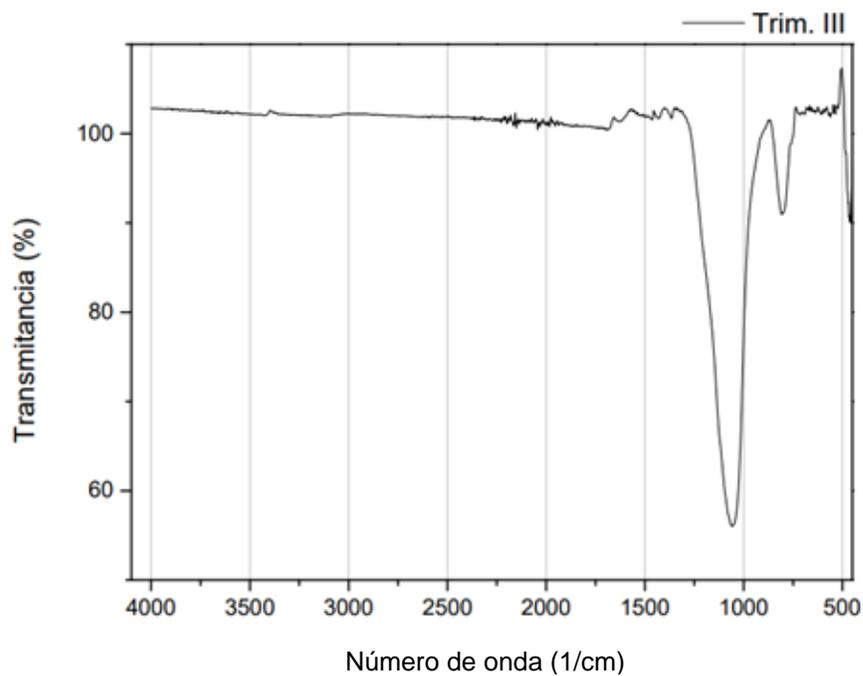
Los espectros resultantes de la espectroscopia infrarroja (Figura 10), para las cuatro muestras de PM₁₀ seleccionadas para la estación UES en Hermosillo, Sonora, se muestran a continuación:



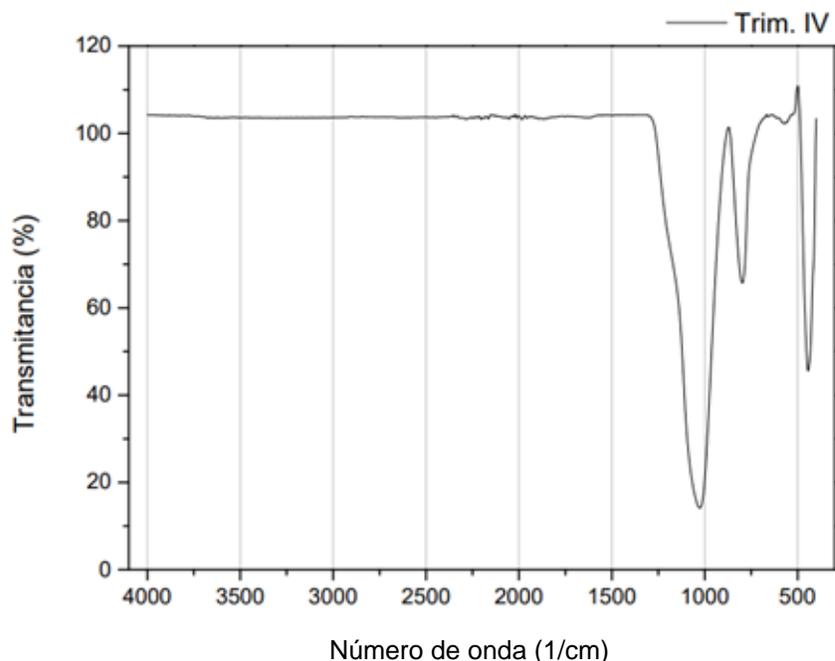
Espectro tomado con equipo Spectrum, Perkin Elmer.



Espectro tomado con equipo Spectrum, Perkin Elmer.



Espectro tomado con equipo Frontier, Perkin Elmer.



Espectro tomado con equipo Frontier, Perkin Elmer.

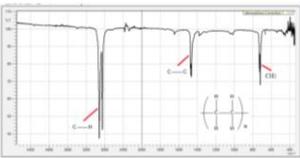
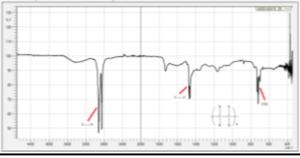
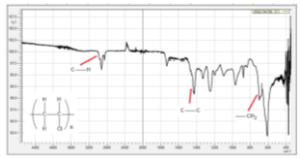
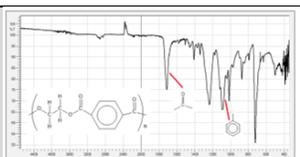
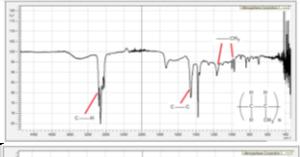
Figura 10.- Espectros FT-IR, de las muestras analizadas de PM₁₀ en la estación UES en Hermosillo, Sonora.

Se obtuvieron resultados de la comparación de los picos que representan los movimientos vibracionales de tensión o flexión en los enlaces de las moléculas características según el tipo de plástico, identificándose coincidencia de algunos de ellos en las muestras (Tabla 3). Sin embargo, otros picos representativos de los diferentes tipos de plásticos quedan ocultos por el ruido que se genera por las longitudes de onda que provoca el material del filtro de fibra de cuarzo en el cual se realizaron los muestreos de PM₁₀. Debido a lo anterior, no es posible identificar en su totalidad la “huella dactilar” de los plásticos de interés utilizando esta técnica analítica.

VIII.2.2 Análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM) - Espectroscopía de rayos X de dispersión de energía (SEM-EDS)

Con los resultados obtenidos mediante el análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM) - espectroscopía de rayos X de dispersión de energía (SEM-EDS), no es posible identificar con certeza partículas relacionadas a microplásticos. Lo anterior debido, por un lado, a que las micrografías se obtienen en tonos de grises a negro (Figuras 10 – 14), impidiendo identificar por color a los posibles plásticos, por otro lado, el análisis químico (Tablas 4 – 7) arroja resultados a nivel elemental y dichos elementos pueden encontrarse en una gran variedad de moléculas, no solo en las relacionadas a plásticos.

Tabla 3.- Resumen de resultados de FT-IR de muestras de PM₁₀ y comparación con resultados del blanco o filtro de muestreo.

Identificación de polímeros por espectroscopía infrarroja			
Plásticos de mayor producción	Espectros representativos	Bandas características	Longitudes generadas por el filtro de la muestra (450, 800, 1050 1/cm)
Polietileno Baja Densidad (LDPE)		Movimiento de flexión de -CH ₂ (750 1/cm)	Oculto por longitud de onda del filtro
		Movimientos de tensión de los enlaces C-C (1450 1/cm)	Coincidente
		Bandas correspondientes a movimientos de tensión de los enlaces C-H (2900 1/cm)	Coincidente
Polietileno Alta Densidad (HDPE)		Movimiento de flexión de -CH ₂ (700 1/cm)	Oculto por longitud de onda del filtro
		Tensión C-C (1500 1/cm)	Coincidente
		Bandas de movimientos de tensión de los enlaces C-H (2850 1/cm)	Coincidente
Policloruro de vinilo (PVC)		Movimiento de flexión de -CH ₂ (720-730 1/cm)	Oculto por longitud de onda del filtro
		Bandas fuertes (1000-1100 1/cm)	Oculto por longitud de onda del filtro
		Tensión C-C (1250 1/cm)	Oculto por longitud de onda del filtro
		Banda de tensión de los enlaces C-H (2850-2900 1/cm)	Coincidente
Tereftalato de polietileno (PET)		Banda intensa correspondiente a la tensión del enlace C=O (1700 1/cm)	Coincidente
		Movimientos de tensión por tensiones de los enlaces del anillo aromático (1000-1100 1/cm)	Oculto por longitud de onda del filtro
		Banda de tensión de enlaces C-H (débiles 2800-2900 1/cm)	Coincidente
Polipropileno (PP)		Movimientos de flexión de -CH ₃ (1200-1000 1/cm)	Oculto por longitud de onda del filtro
		Movimientos de tensión C-C (1350-1450 1/cm)	No Coincidente
		Movimientos de tensión de los enlaces C-H (2900 1/cm)	Coincidente
Poliestireno (PS)		Movimiento de flexión de -CH ₂ y tensiones del anillo aromático (700-800 1/cm)	Oculto por longitud de onda del filtro
		Anillo aromático C-C (1400-1600 1/cm)	Coincidente
		Múltiples movimientos de tensión de los enlaces C-H (2800-3200 1/cm)	Coincidente

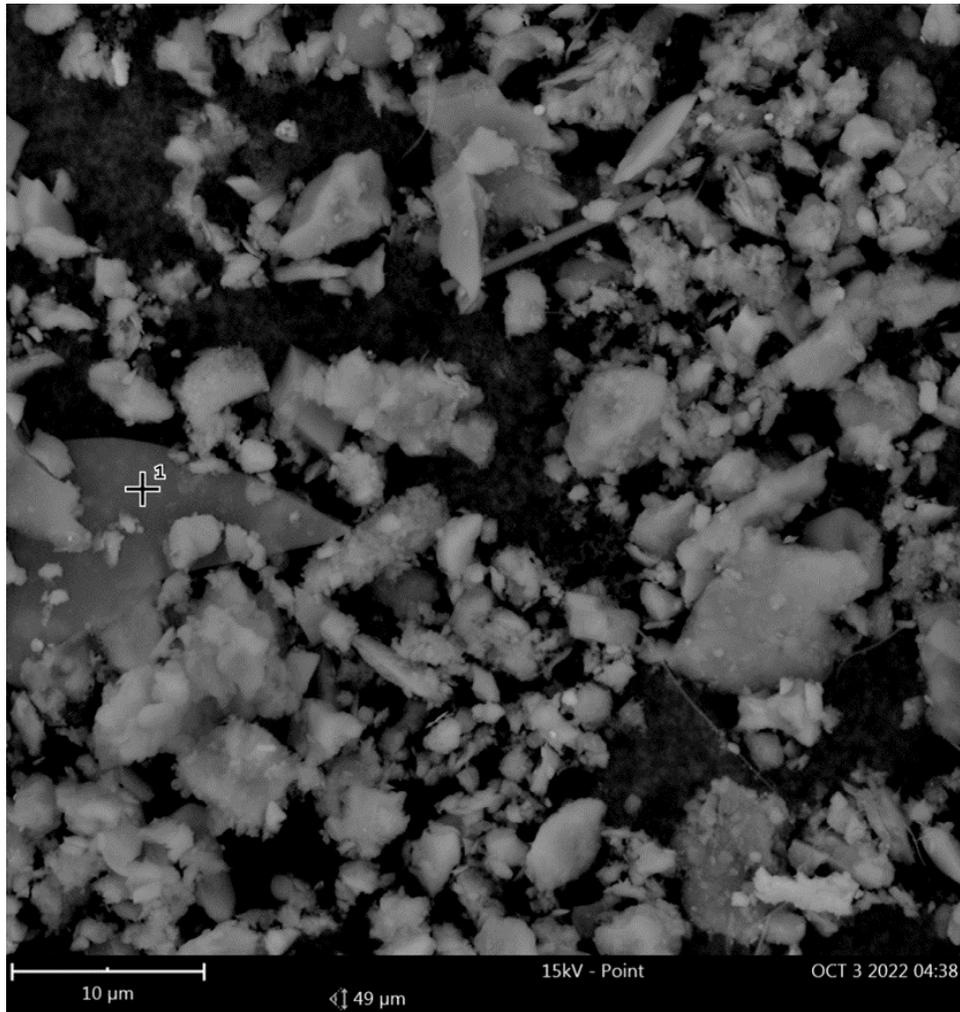


Figura 11.- Micrografía de la muestra de PM₁₀, Trim. I (27/02/2021).

Tabla 4.- Análisis químico elemental de muestra PM₁₀, Trim. I (27/02/2021).

Elemento	Concentración en peso
O	44.5
Si	6.9
C	38.8
Al	3.4
Mg	3.5



Figura 12. Micrografía de la muestra de PM₁₀, Trim. II (10/04/2021).

Tabla 5. Análisis químico elemental de muestra PM₁₀, Trim. II (10/04/2021).

Elemento	Concentración en peso
O	59.0
Si	8.1
Ti	13.7
Al	2.0
C	13.3
Fe	2.7
Te	1.1

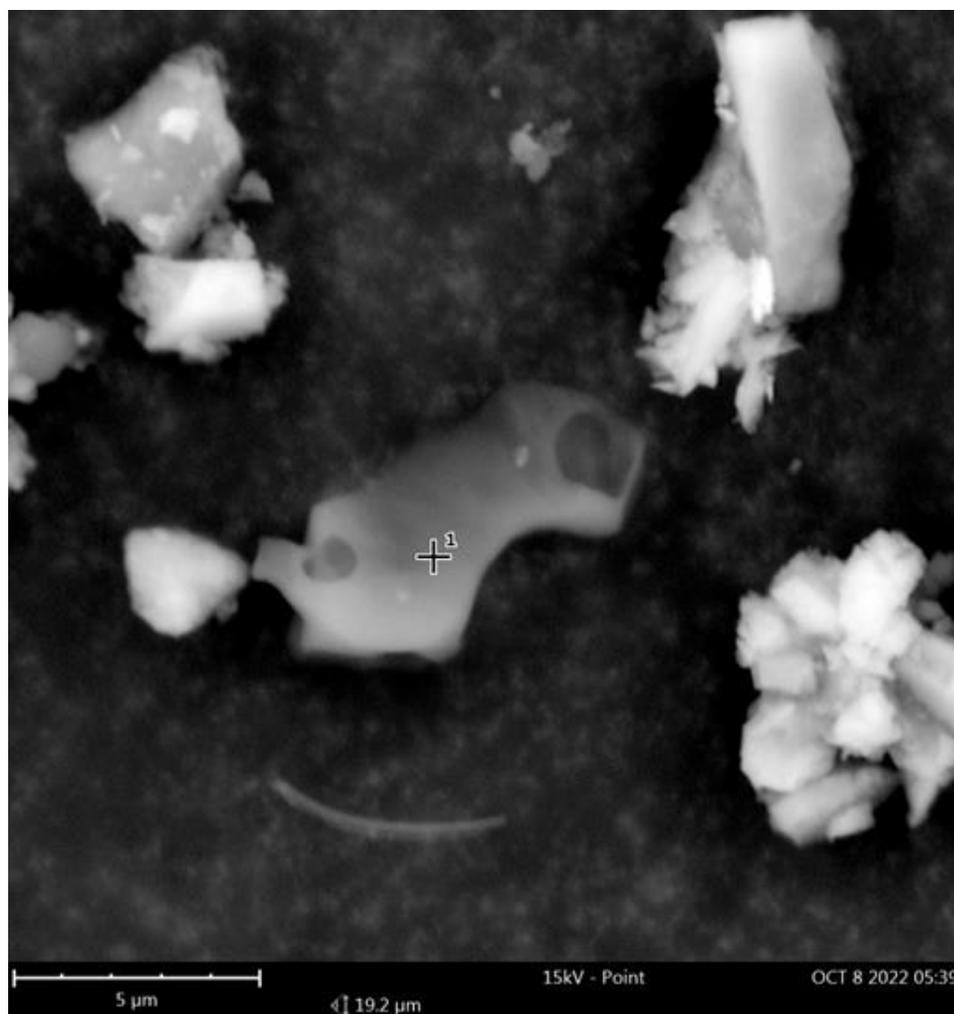


Figura 13. Micrografía de la muestra de PM₁₀, Trim. III (13/09/2021).

Tabla 6. Análisis químico elemental de muestra PM₁₀, Trim. III (13/09/2021).

Elemento	Concentración en peso
C	50.8
O	21.3
Ca	1.3
N	24.7
Na	1.0
S	0.5
Si	0.2
Al	0.2

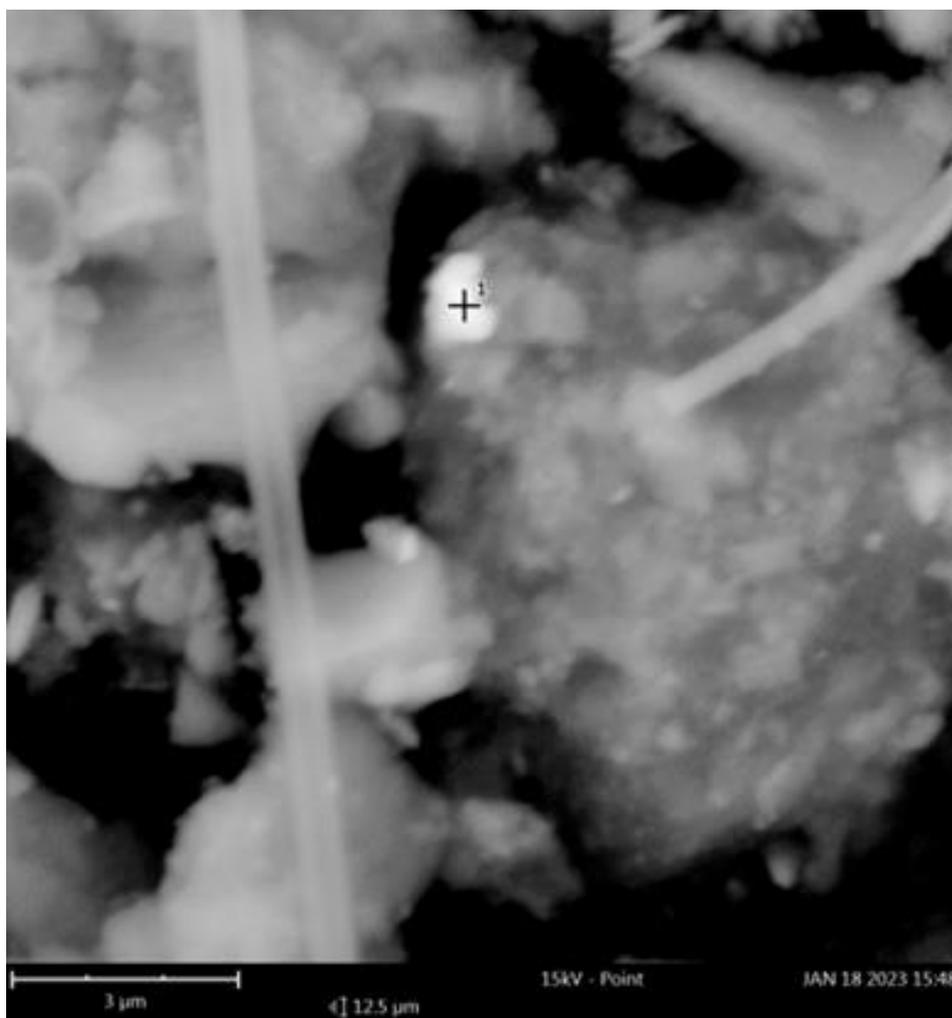


Figura 14. Micrografía de la muestra de PM₁₀, Trim. IV (06/11/2021).

Tabla 7. Análisis químico elemental de muestra PM₁₀, Trim. IV (06/11/2021).

Elemento	Concentración en peso
O	33.0
Si	4.1
C	29.1
Zn	30.9
Al	2.4
Ca	0.5

VIII.2.3 Análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM) – estimación de distribución de tamaño de partículas.

De los filtros seleccionados para cada trimestre, se tomó una muestra para obtener una micrografía con una ventana aproximada de 100 μ de lado. Se aplicó el software ParticleMetric® instalado en el equipo, obteniéndose (Figuras 15 – 18) un estimado de la clasificación del tamaño de partículas, en rangos de tamaño de <0.5, 1.0, 2.5, 5.0 y >10 μ .

Extrapolando los resultados obtenidos a la superficie total del filtro de muestreo y utilizando el volumen de aire muestreado por día, se obtuvo (Tabla 8) la cantidad de partículas por metro cúbico denominándose como número probable de partículas y expresado como $N(PM_{x\mu})/m^3$, donde x representa el tamaño de partícula en μ .

De acuerdo con los resultados obtenidos, es posible establecer que para la estación de muestreo UES ubicada en Hermosillo, Sonora, la mayor cantidad de partículas dentro de la fracción respirable (PM_{10}) se ubican en tamaños de 0 a 2.5 μ , representando aproximadamente el 87.4%.

Si se asume que, para el caso de dichas partículas en el aire, una μ^3 pudiera pesar un microgramo y si se considera que el tamaño de la partícula representa su diámetro equivalente (teoría de la esfera equivalente), es posible obtener de ello un volumen estándar para cada tamaño de partícula (0.5, 1.0, 2.5, 5.0 y 10 μ) y a partir de ello, es posible estimar el porcentaje que en peso representaría cada tamaño de partícula (Tabla 9). Con base en lo anterior, puede establecerse que el total de las partículas de 0 a 2.5 μ solo representarían el 17.8% del peso total de la fracción respirable de partículas (PM_{10}).

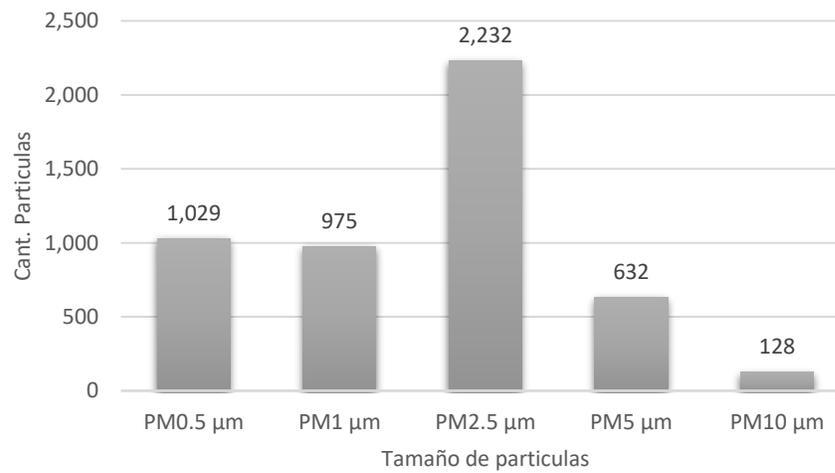
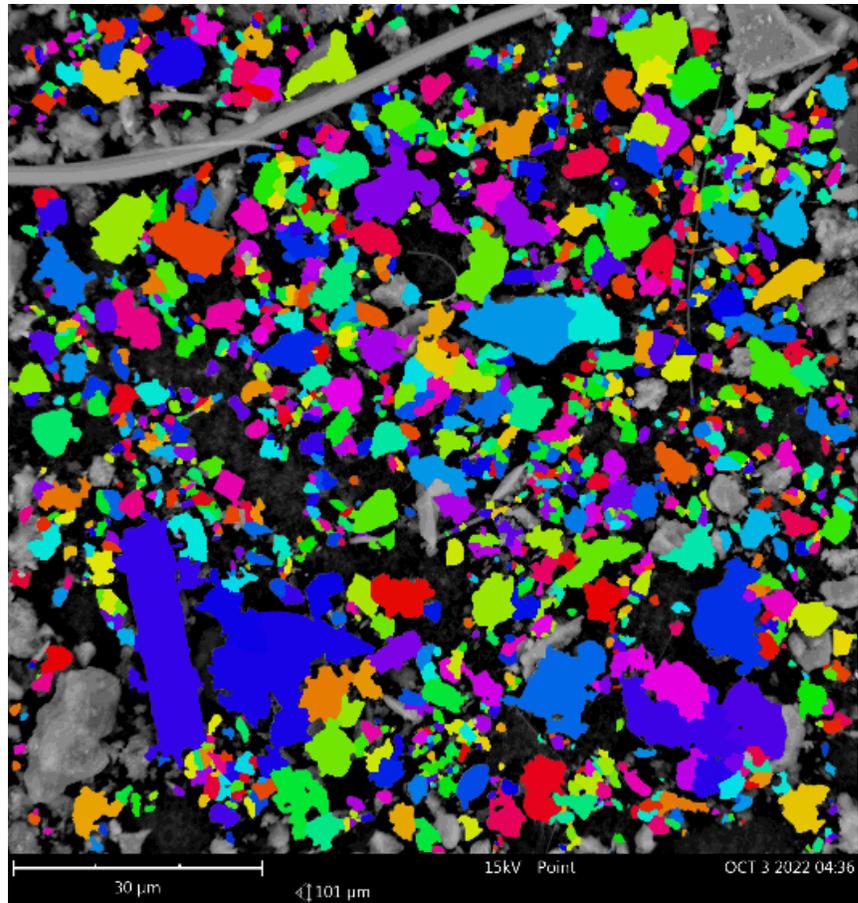


Figura 15. Micrografía y frecuencia por tamaño de partículas (μ), muestra de PM₁₀, Trim. I (27/02/2021).

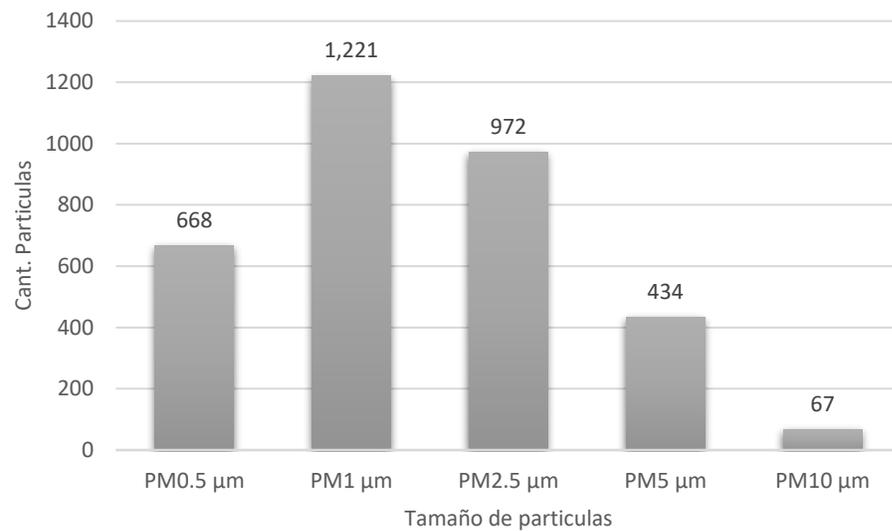
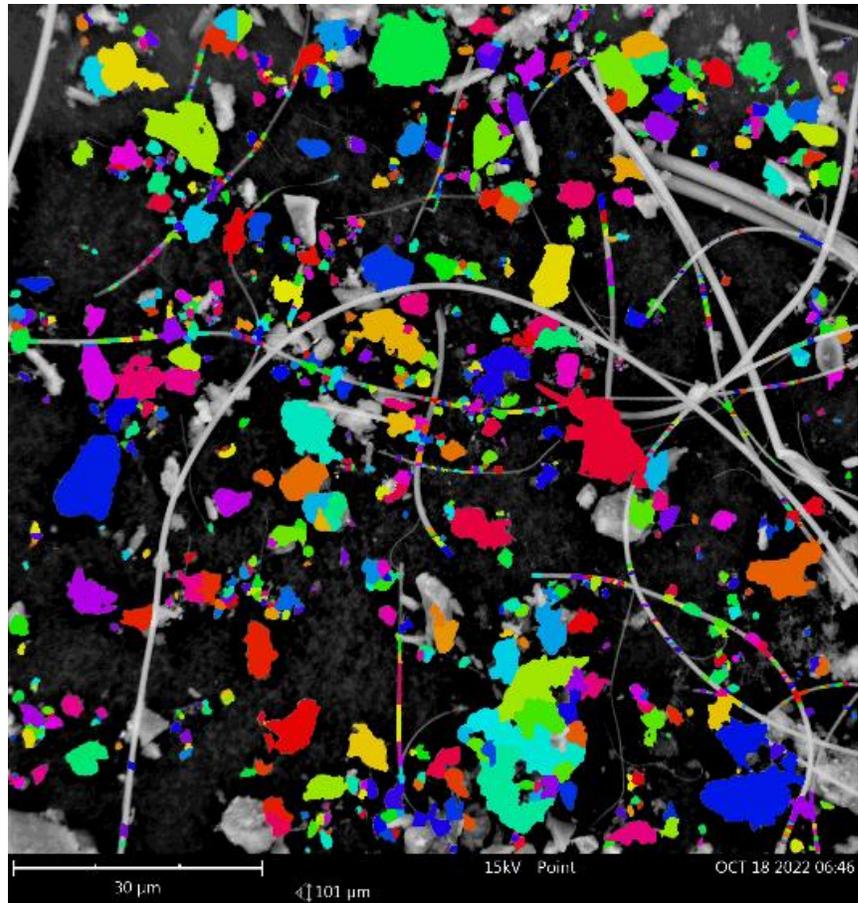


Figura 16. Micrografía y frecuencia por tamaño de partículas (μ), muestra de PM₁₀, Trim. II (10/04/2021).

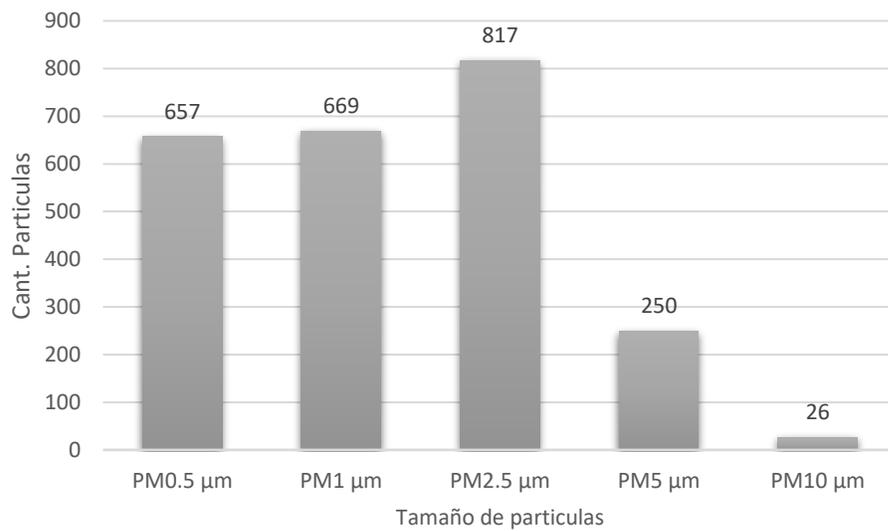
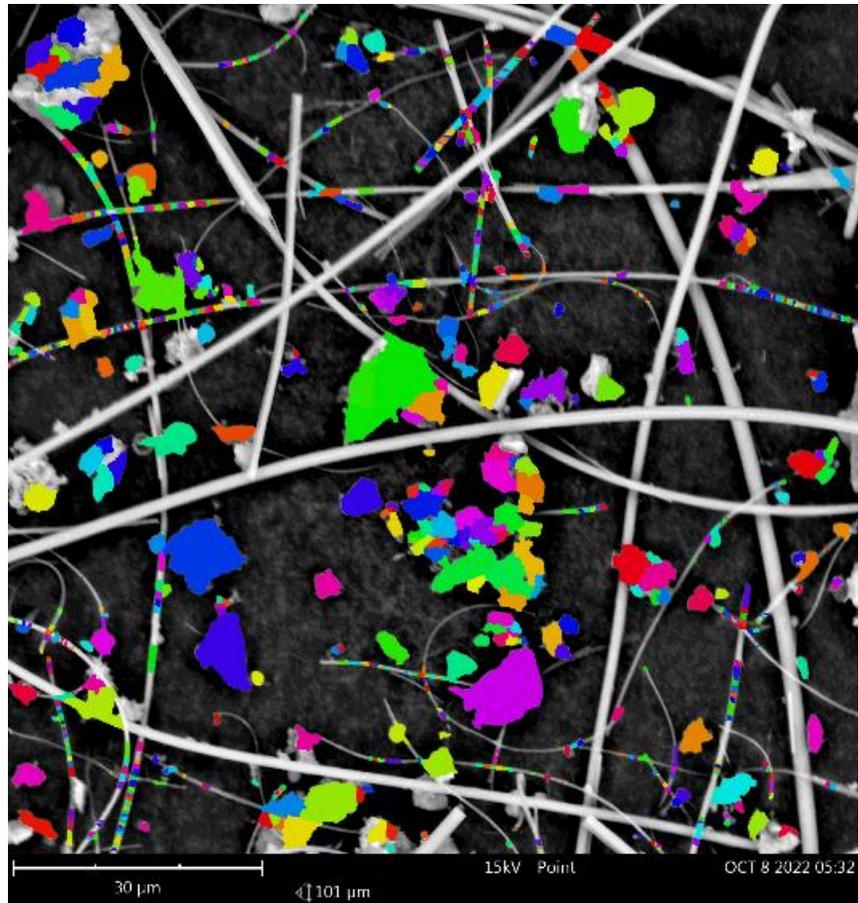


Figura 17. Micrografía y frecuencia por tamaño de partículas (μ), muestra de PM₁₀, Trim. III (13/09/2021).

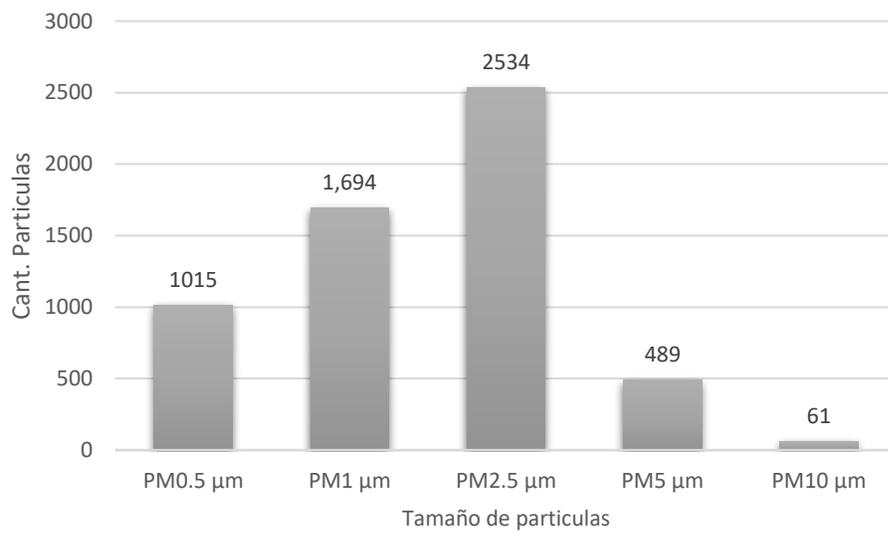
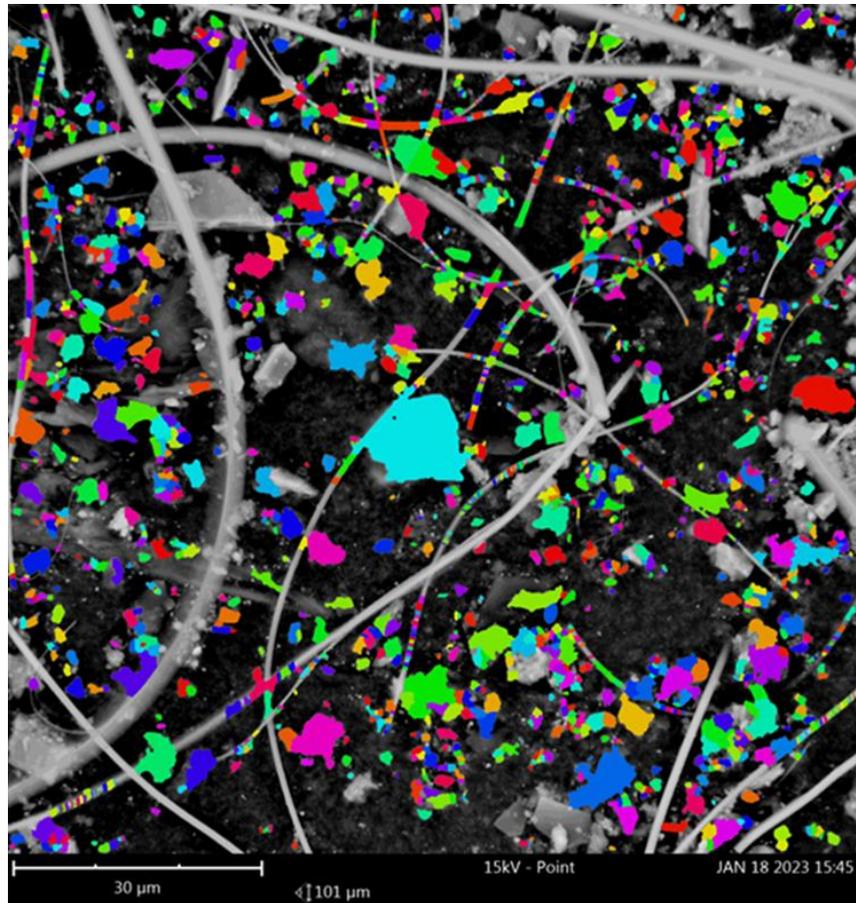


Figura 18. Micrografía y frecuencia por tamaño de partículas (μ), muestra de PM₁₀, Trim. IV (06/11/2021).

Tabla 8.- Resumen de número probable de partículas $N(\text{PM}_x\mu)/\text{m}^3$ según su tamaño en la fracción respirable PM_{10} en la estación UES en Hermosillo, Sonora.

Muestra	$N(\text{PM}_{0.5\mu})/\text{m}^3$		$N(\text{PM}_{1.0\mu})/\text{m}^3$		$N(\text{PM}_{2.5\mu})/\text{m}^3$		$N(\text{PM}_{5\mu})/\text{m}^3$		$N(\text{PM}_{10\mu})/\text{m}^3$	
	Partículas en filtro	$N(\text{PM}_{0.5\mu})/\text{m}^3$	Partículas en filtro	$N(\text{PM}_{1.0\mu})/\text{m}^3$	Partículas en filtro	$N(\text{PM}_{2.5\mu})/\text{m}^3$	Partículas en filtro	$N(\text{PM}_{5\mu})/\text{m}^3$	Partículas en filtro	$N(\text{PM}_{10\mu})/\text{m}^3$
Trim. I	814,162	478	771,436	453	1,765,995	1,038	500,049	294	101,276	60
Trim. II	528,533	326	966,075	595	769,062	474	343,388	212	53,012	33
Trim. III	519,829	298	529,324	304	646,424	371	197,804	114	20,572	12
Trim. IV	803,085	457	1,340,321	762	2,004,943	1,140	386,905	220	48,264	27

Suma de partículas de 0.5, 1 y 2.5 μ	11,459,189	Porcentaje:	87.40
Suma de partículas de 5 y 10 μ	1,651,269	Porcentaje:	12.60

Tabla 9. Estimación del peso de partículas en la fracción respirable, considerando menores y mayores a 2.5 μ por metro cubico en el aire ambiente en la estación UES en Hermosillo, Sonora.

Muestra	Masa total (μg) partículas de 0.5, 1 y 2.5 μ por m^3	% respecto al peso total	Masa total (μg) partículas de 5 y 10 μ por m^3	% respecto al peso total
Trim. I	18,838.41	14.81	108,385.20	85.19
Trim. II	8,635.21	11.97	63,486.50	88.03
Trim. III	7,077.37	19.10	29,976.10	80.90
Trim. IV	21,684.70	25.32	63,944.65	74.68
	Promedio	17.80 %	Promedio	82.20 %

La cantidad de partículas con tamaño de 5 μ o mayores $N(\text{PM}_{>0.5\mu})/\text{m}^3$ representan en cantidad alrededor del 12.6% de las partículas respirables (Tabla 8). Sin embargo, su peso total constituye aproximadamente el 82.2% del peso total (Tabla 9), las cuales se depositan en la región extratorácica del tracto respiratorio. Por otro lado, las partículas iguales o menores a 2.5 μ que pueden ingresar a la región traqueobronquial e incluso a los alvéolos, en número probable $N(\text{PM}_{2.5\mu})/\text{m}^3$ representan alrededor del 87.4% de las partículas PM_{10} y solo inciden aproximadamente en el 17.8% en el peso total de las partículas respirables (Tabla 9).

Considerando lo establecido en el párrafo anterior y tomando como premisa que las normas sobre calidad del aire tienen como objetivo la protección de la salud de la población, es pertinente considerar que el parámetro de partículas PM_{10} se asume como factor de protección a la salud en virtud de que en su concentración (masa en volumen: $\mu\text{g}/\text{m}^3$) incluye todas las partículas de tamaño menor a esa medida, sin embargo, es posible que su daño a la salud se deba especialmente a la gran cantidad de partículas de tamaño igual o menor a 2.5 μ que están incluidas como PM_{10} , ya que son las que tienen el potencial de penetrar más profundamente en el sistema respiratorio.

Por otro lado, las partículas iguales o mayores a 5 μ y que representan aproximadamente el 82.2% del peso de las PM₁₀, podrían representar un riesgo menor y evitable, ya que éstas se depositan en una región (nariz, boca, naso, oro y laringofarínge) en la que existe la posibilidad de ser pasadas al sistema digestivo y luego excretadas o expulsadas por acciones de defensa del organismo como el estornudo y la tos no ingresando a los pulmones.

VIII.2.4 Cromatografía de gases / Espectrometría de masas (GC-MS)

Considerando la biblioteca del sistema de análisis del laboratorio, bajo el análisis GC-MS realizado a las muestras, resultó la identificación de 74 compuestos químicos asociados a plásticos (Tabla 10), y estos a su vez se clasificaron por tipo de plástico, posteriormente identificando los compuestos químicos presentes para cada una de las cuatro muestras analizadas (Tabla 11).

Tabla 10.- Compuestos químicos asociados a plásticos identificados en muestras de partículas del aire ambiente en su fracción respirable PM₁₀ en la estación UES en Hermosillo, Sonora, México.

Plastificante	
Bis(2-etilhexilo) ftalato	Didecan-2-ilo ftalato
Poli(etileno-metil acrilato)	
Ácido 1,2-benzenodicarboxílico, éster bis(8-metilnonilo)	Ácido hexadecanoico, éster metílico
Ácido 1,3-benzenodicarboxílico, éster bis(etilhexílico)	Ácido hexanodioico, éster bis(2-etilhexílico)
Ácido 1-propeno-1,2,3-tricarboxílico, éster tributílico	Ácido octadecanoico, éster etenílico
Ácido 7-oxodehidroabiético, éster metílico	Ácido sulfuroso, butil heptadecil éster
Ácido ftálico, éster bis(7-metiloctilo)	Estearato de metilo
Poliamida	
Ácido benzoico	Dietiltoluamida
Ácido dodecanoico	Dodecanamida, N,N-dietil-
Ácido heptadecanoico	Heptadecanonitrilo
Ácido n-decanoico	Hexadecanamida
Ácido n-hexadecanoico	Hexadecanonitrilo
Ácido octadecanoico	N,N-Dimetildodecanamida
Ácido octanoico	N,N-Dimetildodecanamida
Ácido pentadecanoico	Nonanamida
Ácido tetradecanoico	Octadecanamida
Ácido trans-13-octadecenoico	Tetradecanonitrilo

Decanamida, N,N-dietil-	
Poliéter	
1-Decanol	3-Dodecanol
1-Decanol, 2-hexilo-	Etanol,2-(dodeciloxi)-
1-Dodecanol	Etanol,2-(hexadeciloxi)-
1-Hexadecanol	Éter monododecílico del dietilenglicol
1-Hexadecanol, 3,7,11,15-tetrametil-	n-heptadecanol-1
1-Octadecanol	n-Nonadecanol-1
1-Octanol	Trietilenglicol di(2-etilhexoato)
Polietileno	
10-Heneicoseno (c,t)	Decano,2,3,5-trimetil-
10-Metilnonadecano	Dodecane, 2,6,11-trimethyl-
1-Docoseno	Dodecano, 2,6,10-trimetil-
1-Dodeceno	Dodecano,2,7,10-trimetil-
1-Pentadeceno	Heptadecano, 2,6,10,15-tetrametil-
1-Tetradeceno	Hexadecano, 2,6,10,14-tetrametil-
1-Trideceno	Hexadecano, 2,6,11,15-tetrametil-
1-Undeceno, 9-metil-	Nonadecano
2-Metiltetracosano	Nonano, 3,7-dimetil-
5-Octadeceno, (E)-	Nonano, 3-metil-5-propil-
7-Hexadeceno, (Z)-	n-Pentadecano
9-Eicoseno, (E)-	Tetracosano
9-Octadeceno, (E)-	Undecano, 3,8-dimetil-
Decano, 6-etil-2-metil-	

Tabla 11.- Compuestos químicos asociados a plásticos identificados en muestras de partículas del aire ambiente en su fracción respirable PM₁₀ en muestras trimestrales en Hermosillo, Sonora, México.

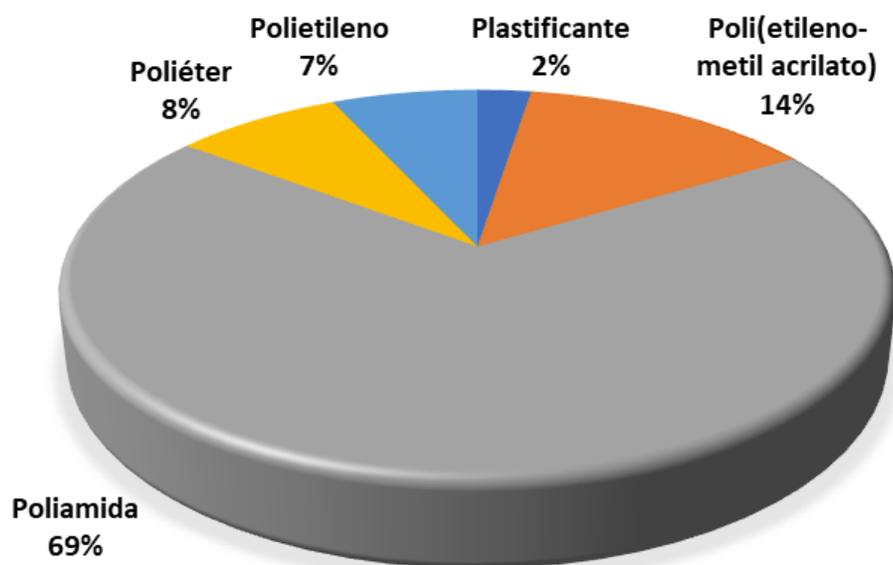
Compuestos Químicos	Muestras de PM ₁₀			
	Trim. I	Trim. II	Trim. III	Trim. IV
Plastificante	1	2	2	2
Bis(2-etilhexilo) ftalato	✓	✓	✓	✓
Didecan-2-ilo ftalato		✓	✓	✓
Poli(etileno-metil acrilato)	5	8	6	8
Ácido 1,2-benzenodicarboxílico, éster bis(8-metilnonilo)			✓	
Ácido 1,3-benzenodicarboxílico, éster bis(etilhexílico)	✓	✓	✓	✓
Ácido 1-propeno-1,2,3-tricarboxílico, éster tributílico		✓	✓	✓
Ácido 7-oxodehidroabiético, éster metílico		✓		
Ácido hexadecanoico, éster metílico	✓	✓		✓
Ácido hexanodioico, éster bis(2-etilhexílico)	✓	✓	✓	✓
Estearato de metilo	✓	✓		✓
Ácido octadecanoico, éster etenílico	✓	✓	✓	✓
Ácido ftálico, éster bis(7-metiloctilo)		✓		✓
Ácido sulfuroso, butil heptadecil éster			✓	✓
Poliamida	14	13	3	12

Compuestos Químicos	Muestras de PM ₁₀			
	Trim. I	Trim. II	Trim. III	Trim. IV
Ácido benzoico	✓			
Decanamida, N,N-dietil-		✓		
Dietiltoluamida	✓			
Dodecanamida, N,N-dietil-	✓			
Ácido dodecanoico				✓
Heptadecanonitrilo	✓	✓		✓
Ácido heptadecanoico	✓	✓		✓
Hexadecanamida	✓	✓		✓
Hexadecanonitrilo	✓	✓	✓	✓
N,N-Dimetildodecanamida	✓	✓	✓	✓
N,N-Dimetildodecanamida	✓	✓		
Ácido n-decanoico		✓		✓
Ácido n-hexadecanoico	✓	✓		✓
Nonanamida			✓	
Octadecanamida	✓	✓		
Ácido octadecanoico	✓	✓		✓
Ácido octanoico	✓			
Ácido pentadecanoico				✓
Tetradecanonitrilo		✓		
Ácido tetradecanoico	✓	✓		✓
Ácido trans-13-octadecenoico				✓
Poliéter	8	7	4	7
1-Decanol	✓	✓		
1 1-Decanol, 2-hexilo-		✓	✓	
1-Dodecanol	✓	✓		✓
1-Hexadecanol	✓	✓		✓
1-Hexadecanol, 3,7,11,15-tetrametil-	✓			
1-Octadecanol	✓	✓		
1-Octanol			✓	
3-Dodecanol			✓	
Éter monododecílico del dietilenglicol				✓
Etanol,2-(dodeciloxi)-	✓			✓
Etanol,2-(hexadeciloxi)-				✓
n-heptadecanol-1	✓	✓		✓
n-Nonadecanol-1	✓	✓	✓	
Trietilenglicol di(2-etilhexoato)				✓
Polietileno	9	8	8	9
10-Heneicoseno (c,t)			✓	
10-Metilnonadecano				✓
1-Docoseno		✓		

Compuestos Químicos	Muestras de PM ₁₀			
	Trim. I	Trim. II	Trim. III	Trim. IV
1-Dodeceno			✓	
1-Pentadeceno			✓	
1-Tetradeceno	✓	✓		
1-Trideceno	✓			
1-Undeceno, 9-metil-				✓
2-Metiltetracosano			✓	
5-Octadeceno, (E)-	✓	✓	✓	✓
7-Hexadeceno, (Z)-				✓
9-Eicoseno, (E)-	✓	✓		
9-Octadeceno, (E)-				✓
Decano,2,3,5-trimetil-				✓
Decano, 6-etil-2-metil-			✓	
Dodecano, 2,6,10-trimetil-		✓		
Dodecane, 2,6,11-trimetil-	✓			
Dodecano,2,7,10-trimetil-		✓		✓
Heptadecano, 2,6,10,15-tetrametil-			✓	✓
Hexadecano, 2,6,10,14-tetrametil-	✓			
Hexadecano, 2,6,11,15-tetrametil-	✓			
Nonadecano			✓	
Nonano, 3,7-dimetil-				✓
Nonano, 3-metil-5-propil-		✓		
n-Pentadecano		✓		
Tetracosano	✓			
Undecano, 3,8-dimetil-	✓			
Total	37	38	23	38

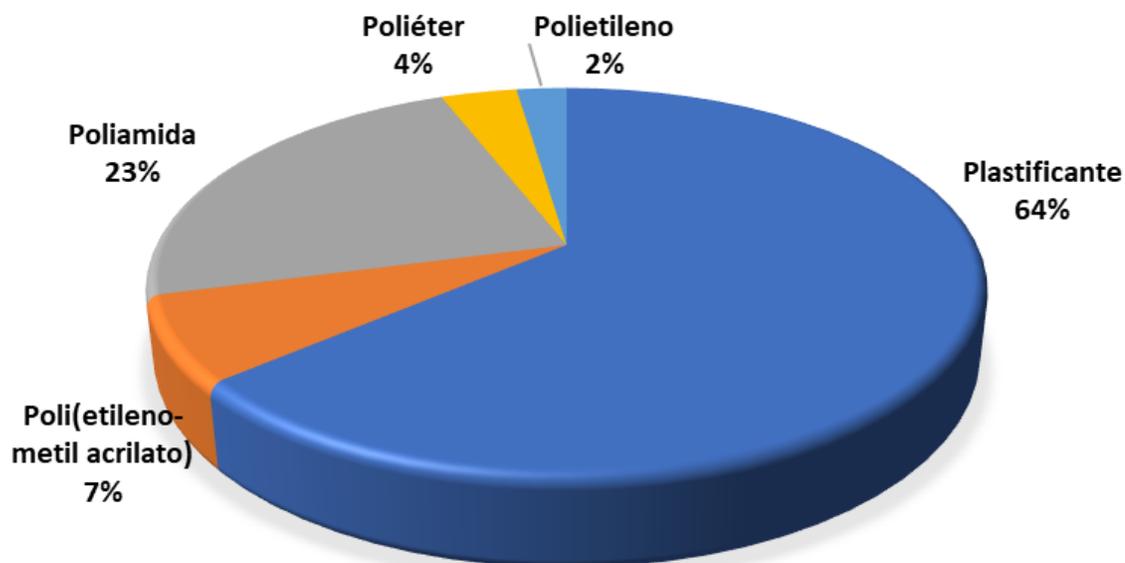
De acuerdo a los resultados obtenidos y respecto de la masa total de compuestos químicos encontrados, se identificó que en la muestra del trimestre I los compuestos químicos asociados a poliamida son los que presentan mayor masa (56%), en la muestra de los trimestres II y IV los compuestos químicos asociados a plastificantes representaron un 50% de la masa total, mientras que en la muestra del trimestre III los compuestos químicos asociados al poli(etileno-metil-acrilato) representaron el 50% de la masa presente en la muestra analizada.

Se graficó la composición de los plásticos identificados según cada muestra trimestral, estimándose la concentración en el aire ambiente de los compuestos químicos identificados, según el tipo de plástico al que están asociados y referidos a su identificación en las partículas de la fracción respirable PM₁₀. (Figuras 19–22)



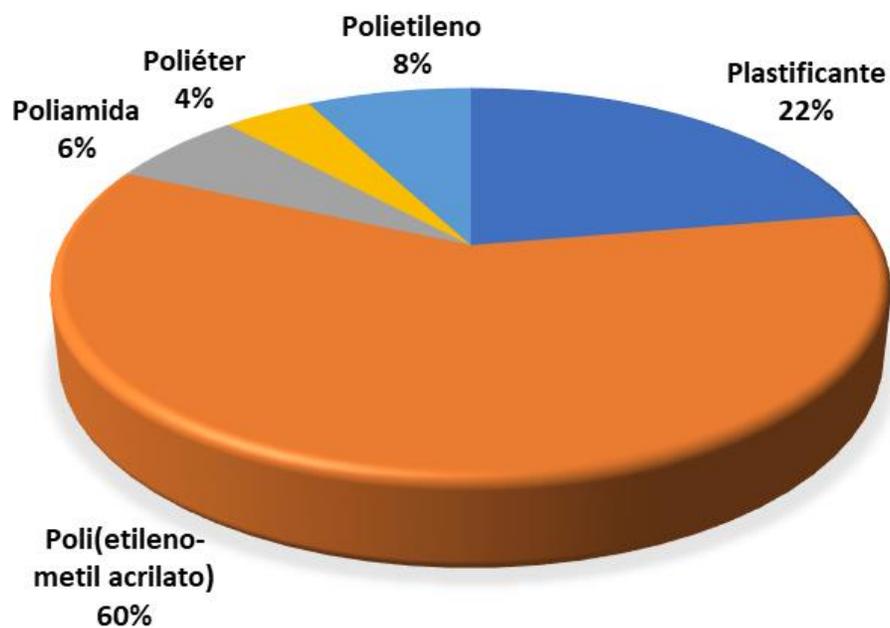
Polímero	Masa Muestra (µg)	Masa Filtro (µg)	Concentración (µg/Stdm ³)
Plastificante	9.99	722.65	0.42
Poli(etileno-metil acrilato)	54.99	3,977.63	2.34
Poliamida	274.50	19,856.45	11.67
Poliéter	31.20	2,256.68	1.33
Polietileno	27.25	1,971.41	1.16
Total	397.93	28,784.82	16.91

Figura 19.- Concentración de compuestos químicos asociados a polímeros, identificados en partículas del aire ambiente en su fracción respirable PM₁₀ en Hermosillo, Sonora, muestra Trim. I (27/02/2021).



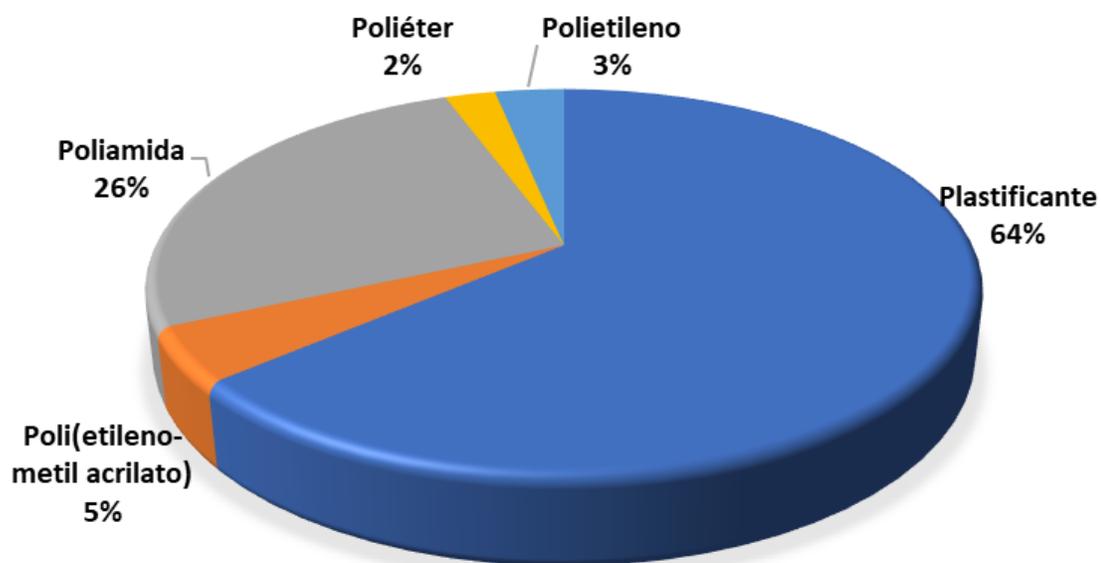
Polímero	Masa Muestra (µg)	Masa Filtro (µg)	Concentración (µg/Stdm ³)
Plastificante	119.69	8,629.79	5.32
Poli(etileno-metil acrilato)	13.44	969.19	0.60
Poliamida	43.68	3,149.62	1.94
Poliéter	6.65	479.70	0.30
Polietileno	4.38	315.82	0.19
Total	187.85	13,544.14	8.34

Figura 20.- Concentración de compuestos químicos asociados a polímeros, identificados en partículas del aire ambiente en su fracción respirable PM₁₀ en Hermosillo, Sonora, muestra Trim. II (10/04/2021).



Polímero	Masa Muestra (µg)	Masa Filtro (µg)	Concentración (µg/Std ³)
Plastificante	5.27	368.72	0.21
Poli(etileno-metil acrilato)	14.05	983.36	0.56
Poliamida	1.51	105.41	0.06
Poliéter	0.98	68.72	0.04
Polietileno	1.82	127.14	0.07
Total	23.62	1,653.35	0.95

Figura 21.- Concentración de compuestos químicos asociados a polímeros, identificados en partículas del aire ambiente en su fracción respirable PM₁₀ en Hermosillo, Sonora, muestra Trim. III (13/09/2021).



Polímero	Masa Muestra (µg)	Masa Filtro (µg)	Concentración (µg/Stdm ³)
Plastificante	122.19	8,842.91	5.03
Poli(etileno-metil acrilato)	8.76	634.14	0.36
Poliamida	50.09	3,624.93	2.06
Poliéter	4.53	327.57	0.19
Polietileno	6.20	449.05	0.26
Total	191.77	13,878.61	7.89

Figura 22.- Concentración de compuestos químicos asociados a polímeros, identificados en partículas del aire ambiente en su fracción respirable PM₁₀ en Hermosillo, Sonora, muestra Trim. IV (06/11/2021).

VIII.3 Clasificación y etiquetado de la Agencia Europea de Sustancias Químicas (ECHA).

Con base a la clasificación y etiquetado de la Agencia Europea de Sustancias Químicas (European Chemicals Agency, 2022), de los 74 compuestos químicos identificados asociados a plásticos, el 43.24% de ellos cuentan con algún tipo de etiqueta o clasificación, pudiendo ser:

- Peligros
- Advertencias

Se identificaron 18 compuestos químicos con etiquetas o clasificación por riesgo en inhalación y/o afectaciones en vías respiratorias, Anexo I.

VIII.4 Concentración en el aire ambiente de compuestos químicos identificados y asociados a polímeros.

Para los compuestos químicos identificados, se determinó la concentración de éstos en el aire (Tabla 12).

Tabla 12.- Concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de compuestos químicos asociados a plásticos identificados en muestras de PM_{10} de aire ambiente en la ciudad de Hermosillo, Sonora.

No.	Compuesto Químico Identificado	CAS	Polímero	Concentración ($\mu\text{g}/\text{Std}\text{m}^3$) en partículas de la fracción respirable PM_{10}			
				Muestra Trim. I	Muestra Trim. II	Muestra Trim. III	Muestra Trim. IV
1	Ftalato de bis(2-etilhexilo)	117-81-7	Plastificante	0.425	5.161	0.142	4.965
2	Didecan-2-ilo ftalato	28029-89-2	Plastificante		0.156	0.069	0.064
3	Ácido sulfuroso, butil heptadecil éster	1000309-18-4	Poli(etileno-metil acrilato)			0.008	0.023
4	Ácido hexanodioico, éster bis(2-etilhexílico)	103-23-1	Poli(etileno-metil acrilato)	0.030	0.087	0.435	0.136
5	Ácido 7-oxodehidroabiético, éster metílico	110936-78-2	Poli(etileno-metil acrilato)		0.016		
6	Ácido octadecanoico, éster etenílico	111-63-7	Poli(etileno-metil acrilato)	0.385	0.218	0.019	0.042
7	Hexadecanoic acid, methyl ester	112-39-0	Poli(etileno-metil acrilato)	0.101	0.016		0.014
8	Estearato de metilo	112-61-8	Poli(etileno-metil acrilato)	0.070	0.013		0.011
9	Ácido 1,3-benzenodicarboxílico, éster bis(etilhexílico)	137-89-3	Poli(etileno-metil acrilato)	1.751	0.164	0.040	0.068
10	Ácido ftálico, éster bis(7-metiloctilo)	20548-62-3	Poli(etileno-metil acrilato)		0.055		0.027
11	Ácido 1-propeno-1,2,3-tricarboxílico, éster tributílico	7568-58-3	Poli(etileno-metil acrilato)		0.029	0.033	0.040
12	Ácido 1,2-benzenodicarboxílico, éster bis(8-metilnonilo)	89-16-7	Poli(etileno-metil acrilato)			0.029	
13	Ácido pentadecanoico	1002-84-2	Poliamida				0.013
14	Nonanamida	1120-07-6	Poliamida			0.017	
15	Ácido octanoico	124-07-2	Poliamida	0.598			

No.	Compuesto Químico Identificado	CAS	Polímero	Concentración ($\mu\text{g}/\text{Std}^3$) en partículas de la fracción respirable PM_{10}			
				Muestra Trim. I	Muestra Trim. II	Muestra Trim. III	Muestra Trim. IV
16	Octadecanamida	124-26-5	Poliamida	0.385	0.097		
17	Dietiltoluamida	134-62-3	Poliamida	0.076			
18	Ácido dodecanoico	143-07-7	Poliamida				0.042
19	N,N-Dimethyldecanamide	14433-76-2	Poliamida	0.311	0.231	0.038	0.031
20	Decanamida, N,N-dietil-	2602-61-1	Poliamida		0.031		
21	N,N-Dimetildodecanamida	3007-53-2	Poliamida	0.136	0.067		
22	Ácido n-decanoico	334-48-5	Poliamida		0.014		0.039
23	Dodecanamida, N,N-dietil-	3352-87-2	Poliamida	0.014			
24	Ácido heptadecanoico	506-12-7	Poliamida	0.077	0.016		0.019
25	Heptadecanonitrilo	5399-02-0	Poliamida	0.100	0.026		0.020
26	Ácido tetradecanoico	544-63-8	Poliamida	0.576	0.138		0.258
27	Ácido n-hexadecanoico	57-10-3	Poliamida	5.998	1.144		0.451
28	Ácido octadecanoico	57-11-4	Poliamida	2.733	0.039		0.811
29	Hexadecanamida	629-54-9	Poliamida	0.551	0.091		0.126
30	Tetradecanenitrilo	629-63-0	Poliamida		0.022		
31	Hexadecanonitrilo	629-79-8	Poliamida	0.105	0.023	0.006	0.021
32	Ácido benzoico	65-85-0	Poliamida	0.006			
33	Ácido trans-13-octadecenoico	693-71-0	Poliamida				0.229
34	3-Dodecanol	10203-30-2	Poliéter			0.009	
35	1-Octanol	111-87-5	Poliéter			0.014	
36	1-Decanol	112-30-1	Poliéter	0.072	0.008		
37	1-Dodecanol	112-53-8	Poliéter	0.067	0.011		0.008
38	1-Octadecanol	112-92-5	Poliéter	0.096	0.026		
39	n-Nonadecanol-1	1454-84-8	Poliéter	0.070	0.032	0.006	
40	n-heptadecanol-1	1454-85-9	Poliéter	0.581	0.118		0.050
41	Etanol,2-(hexadeciloxi)-	2136-71-2	Poliéter				0.005
42	1-Decanol, 2-hexilo-	2425-77-6	Poliéter		0.023	0.010	
43	Éter monododecílico del dietilenglicol	3055-93-4	Poliéter				0.024
44	1-Hexadecanol	36653-82-4	Poliéter	0.361	0.077		0.070
45	Etanol,2-(dodeciloxi)-	4536-30-5	Poliéter	0.050			0.006
46	1-Hexadecanol, 3,7,11,15-tetrametil-	645-72-7	Poliéter	0.029			
47	Trietilenglicol di(2-etilhexoato)	94-28-0	Poliéter				0.023
48	2-Metiltetracosano	1000376-72-6	Poliétileno			0.006	
49	1-Tetradeceno	1120-36-1	Poliétileno	0.155	0.049		
50	1-Dodeceno	112-41-4	Poliétileno			0.007	
51	1-Pentadeceno	13360-61-7	Poliétileno			0.003	
52	1-Docoseno	1599-67-3	Poliétileno		0.019		
53	Undecano, 3,8-dimetil-	17301-30-3	Poliétileno	0.065			
54	Nonano, 3,7-dimetil-	17302-32-8	Poliétileno				0.072
55	1-Trideceno	2437-56-1	Poliétileno	0.090			
56	Nonano, 3-metil-5-propil-	31081-18-2	Poliétileno		0.029		
57	Dodecane, 2,6,11-trimethyl-	31295-56-4	Poliétileno	0.076			
58	7-Hexadecene, (Z)-	35507-09-6	Poliétileno				0.050
59	Dodecano, 2,6,10-trimetil-	3891-98-3	Poliétileno		0.021		
60	Hexadecano, 2,6,11,15-tetrametil-	504-44-9	Poliétileno	0.129			
61	Heptadecano, 2,6,10,15-tetrametil-	54833-48-6	Poliétileno			0.022	0.020
62	10-Metilnonadecano	56862-62-5	Poliétileno				0.020
63	Decano, 6-etil-2-metil-	62108-21-8	Poliétileno			0.004	
64	Decano,2,3,5-trimetil-	62238-11-3	Poliétileno				0.025
65	n-Pentadecano	629-62-9	Poliétileno		0.025		
66	Nonadecane	629-92-5	Poliétileno			0.009	
67	Hexadecano, 2,6,10,14-tetrametil-	638-36-8	Poliétileno	0.201			

No.	Compuesto Químico Identificado	CAS	Polímero	Concentración ($\mu\text{g}/\text{Std}\text{m}^3$) en partículas de la fracción respirable PM_{10}			
				Muestra Trim. I	Muestra Trim. II	Muestra Trim. III	Muestra Trim. IV
68	Tetracosano	646-31-1	Polietileno	0.115			
69	5-Octadeceno, (E)-	7206-21-5	Polietileno	0.041	0.013	0.004	0.011
70	9-Octadeceno, (E)-	7206-25-9	Polietileno				0.014
71	1-Undeceno, 9-metil-	74630-41-4	Polietileno				0.020
72	Dodecano,2,7,10-trimetil-	74645-98-0	Polietileno		0.021		0.024
73	9-Eicoseno, (E)-	74685-29-3	Polietileno	0.285	0.018		
74	10-Heneicoseno (c,t)	95008-11-0	Polietileno			0.019	
Total				16.911	8.344	0.949	7.892

A partir de la suma de la concentración de los compuestos químicos identificados y considerando la concentración de PM_{10} de cada muestra, se identificó que en promedio la masa de los compuestos químicos de plásticos representa hasta un 20% (Tabla 13).

Tabla 13.- Concentración en aire de compuestos químicos asociados a plásticos identificados en muestras de PM_{10} en la estación UES en Hermosillo, Sonora y su porcentaje respecto de la concentración de las partículas respirables PM_{10} .

Concentración	Muestra Trim. I	Muestra Trim. II	Muestra Trim. III	Muestra Trim. IV
Concentración de PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{Std}\text{m}^3$)	83.9	45.2	34.5	102.8
Concentración de compuestos químicos asociados a plásticos ($\mu\text{g}/\text{Std}\text{m}^3$)	16.91	8.34	0.95	7.89
Porcentaje de compuestos químicos asociados a plásticos en PM_{10}	20.16%	18.46%	2.75%	7.68%

VIII.5. Determinación de relación de la concentración de compuestos químicos asociados a plásticos entre los días analizados.

El análisis de correspondencia mostró una marcada variación temporal en las concentraciones de los compuestos químicos asociados a plásticos (Fig. 23). Los principales compuestos químicos asociados a plásticos en el muestreo del trimestre I son: 9-Eicoseno, (E)- (32 en la Fig. 23), Benzene, 1,1'-(1,3-propanediyl)bis- (34), Dodecano, 2,7,10-trimetil- (53), son lo que se asocian al muestreo I. Mientras que en el muestreo del segundo trimestre se relacionan los compuestos químicos: 10-Methylnonadecane (6), 14-Heptacosanone (7), Dodecanamide, N,N-diethyl- (50).

Así mismo en el tercer muestreo se puede observar la baja asociación de concentraciones de compuestos químicos asociados a plásticos, mientras que en el cuarto muestreo los compuestos químicos asociados a plásticos identificados son 14-Heptacosanone (7), 1-Hexadecanol, 3,7,11,15-tetramethyl- (16) y Hexanedioic acid, bis(2-ethylhexyl) ester (65).

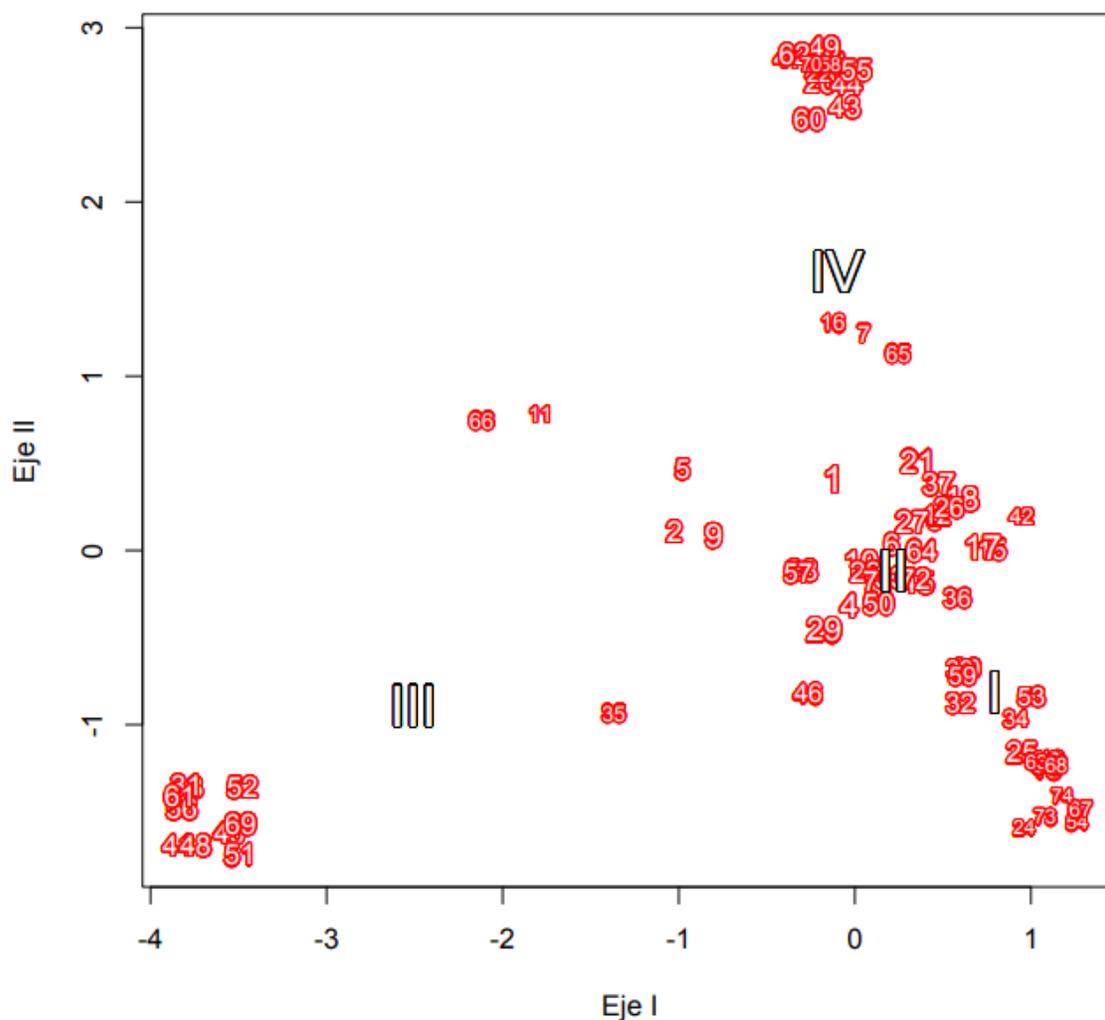


Figura 23. Gráfica de ordenación por un análisis de correspondencia de compuestos químicos asociados a plásticos (números arábigos, como en el Anexo II) en muestras de PM₁₀ de aire ambiente con relación a los días muestreados (números romanos). El tamaño del número de cada compuesto es proporcional a su concentración.

De igual forma, utilizando el análisis por correspondencia, se trabajó solo con los compuestos que establecen algún riesgo a la salud (Figura 24), mostrando en el trimestre I, el compuesto químico N,N-Dimetildodecanamida (30 en la Figura 24), mismo que se registra con ¡Advertencia! Según la clasificación proporcionada por las empresas a la ECHA en los registros REACH, esta sustancia es muy tóxica para la vida acuática, provoca irritación ocular grave, es nociva para la vida acuática con efectos duraderos, provoca irritación cutánea y puede irritar las vías respiratorias. Para el segundo trimestre (muestreo II), los compuestos químicos que mayormente se asocian son Ácido tetradecanoico (21), Decanamida, N,N-dietil- (23), 1-Dodecanol (36), n-Pentadecano (72), y todos ellos cuentan con algún tipo de clasificación y/o etiquetado de la Agencia Europea de Sustancias químicas (ECHA). Mientras que al tercer trimestre (Muestreo III), no asociación alguna concentración de compuestos químicos asociados a plásticos; al cuarto trimestre (Muestreo IV) se asocia el compuesto químico Ácido n-decanoico (16), con etiquetado de ¡Advertencia! Según la clasificación y etiquetado armonizados (ATP07) aprobados por la Unión Europea, esta sustancia provoca irritación ocular grave, es nociva para la vida acuática con efectos duraderos y provoca irritación cutánea.

VIII.6 Determinación de la relación entre concentración de compuesto químicos asociados a plásticos y la concentración de PM₁₀.

Existe una correlación lineal simple moderada ($r = 0.586$) entre la concentración de compuestos químicos asociados a plásticos y la concentración de PM₁₀ de cada muestra (Figura. 25), es decir, la concentración de compuestos químicos asociados a plásticos se eleva al incrementarse la concentración de PM₁₀. Sin embargo, esta correlación lineal no es diferente de cero (prueba t de Student sobre coeficiente de correlación lineal, $t = 1.023$, g.l. = 2, $P = 0.414$); lo anterior, asociado al tamaño de muestra, se considera no significativo debido a que no se cuenta con poder estadístico. Sin embargo, la gráfica resulta sugestiva.

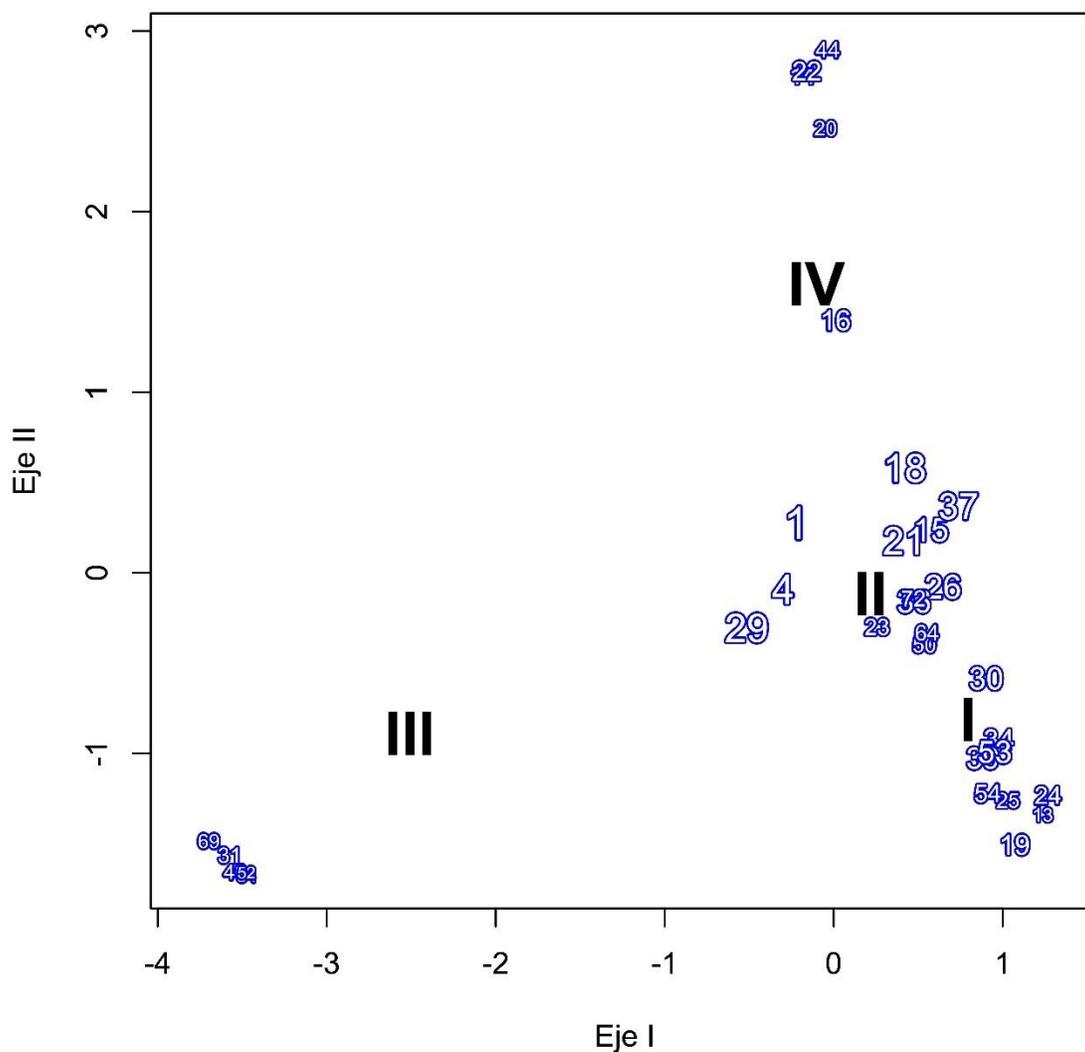


Figura 24.-Gráfica de ordenación por un análisis de correspondencia de compuestos químicos asociados a plásticos (números arábigos, como en el Anexo II) con riesgo a la salud en muestras de PM₁₀ de aire ambiente con relación a los días muestreados (números romanos). El tamaño del número de cada compuesto es proporcional a su concentración.

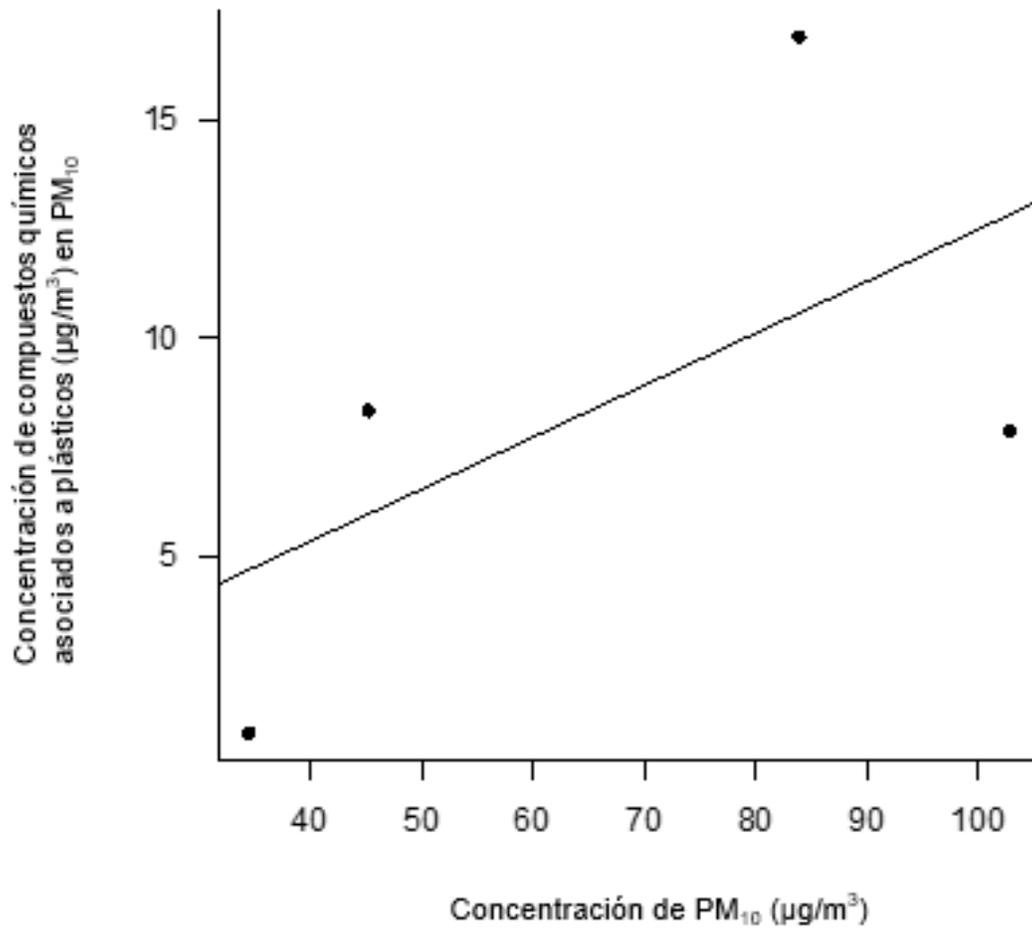


Figura 25. Correlación entre la concentración de compuestos químicos asociados a plásticos y la concentración de PM₁₀ en el aire ambiente en la ciudad de Hermosillo, Sonora.

IX. DISCUSIONES

La presente investigación tuvo como propósito determinar si en las partículas del aire ambiente en su fracción respirable (PM_{10}), existen microplásticos, lo cual se logró establecer a partir del análisis de compuestos químicos asociados a polímeros utilizados comúnmente en la fabricación de plásticos; planteándose las siguientes discusiones:

IX.1 Concentraciones de PM_{10}

Durante el año 2021, las concentraciones más altas de PM_{10} , se presentaron durante otoño e invierno, sobrepasando la Norma NOM-025-SSA1-2021 en 4 ocasiones; lo anterior es coincidente con reportes acerca del comportamiento anual de las concentraciones de partículas en el aire ambiente, mismas que se reportan con mayor concentración en los meses de noviembre a febrero (otoño – invierno), mientras que las concentraciones menores son de junio a agosto (verano); por lo que las concentraciones de PM_{10} , varían respecto al tiempo (López, 2018).

La contaminación en la ciudad de Hermosillo por material particulado PM_{10} , sigue presentándose en ocasiones por encima de los límites máximos permisibles, tanto para el estándar de 24 horas, como para el límite anual; de no contar con plan estratégico para reducir las concentraciones de PM_{10} , se continuará clasificando a la calidad del aire en Hermosillo como de regular a mala; aunado a la modificación de la NOM-025-SSA1-2021, que reduce los máximos permisibles con el objetivo de llegar a $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ máximo, para el 2026.

IX.2 Muestras para Procesos Analíticos

IX.2.1 Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier con Reflectancia Total Atenuada (FT-IR-ATR).

El análisis por medio del análisis de FT-IR-ATR, es considerada por la literatura como una técnica con ventajas para la identificación de plásticos mediante su huella química, con ventajas como la sencillez de la preparación de las muestras, la excelente reproducibilidad de los resultados no es un análisis destructivo, y es una técnica muy rápida para la identificación de componentes de materiales (Varrica *et al.*, 2019). Sin embargo para esta investigación no se logró confirmar la presencia de plásticos en las muestras analizadas; lo anterior atribuido primeramente al tamaño de partícula de interés (menores a 10 μ). Dris (2016), reporta como tamaño mínimo para manipular físicamente para ATR es de 50 μ , lo cual limita su uso práctico para microplásticos atmosféricos en la fracción respirable PM₁₀.

Por otra parte, dentro de las limitaciones que se han documentado para FT-IR en el análisis de plásticos, son las variaciones en las tomas de muestras, ya los espectros FT-IR adquiridos de diferentes modos no son los mismos, se produce una variación de acuerdo con el tipo de resolución utilizada y a la longitud de onda varía de acuerdo con su profundidad de penetración; otra desventaja que se presenta al analizar las partículas de plástico es el grado de degradación, envejecimiento y oxidación de su superficie que generan un cambio espectral; lo anterior genera diferencias al comparar los espectros resultantes del análisis con la literatura o la biblioteca espectral (Xu *et al.*, 2019).

La segunda limitante de la técnica en la identificación de plásticos en las concentraciones de PM₁₀, se debe al sustrato de la muestras (tipo de filtro utilizado para el muestreo de partículas PM₁₀) donde las longitudes de onda características de los plásticos, se vieron opacadas por la absorción asociada a la fibra de cuarzo de los filtros; lo anterior es coincidente con lo reportado por Caldwell *et al.* (2022), donde establece como limitante de la técnica la influencia que se puede generar en

los resultados la presencia de otras materias orgánicas, productos químicos y agua en las muestras. De igual forma Xu et al., (2019) resalta la importancia de contar con un sustrato de muestra que genere una interferencia espectral mínima, que permita que la luz penetre a través de las partículas, y genere resultados de alta calidad.

IX.2.2 Análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM) - Espectroscopía de rayos X de dispersión de energía (SEM-EDS)

Se analizaron muestras mediante SEM-EDS, con el objetivo de explorar las partículas presentes, en lo que refiere a la morfología y a su composición elemental. Esta técnica es útil para obtener información sobre el proceso de degradación de los microplásticos en el medioambiente, ya que proporciona una alta resolución con la que es posible identificar las diferentes grietas y fracturas formadas durante el proceso de meteorización (Toledo *et al.*, 2019); Zhou *et al.* (2018) utilizan esta técnica para observar la morfología de la superficie de los polímeros encontrados, Fries *et al.* (2013) también la utilizan para identificar los aditivos plásticos inorgánicos de los microplásticos en muestras de sedimentos; sin embargo, la aplicación de la técnica en dichas investigaciones se realiza sobre microplásticos previamente identificados y/o separados. Para el proyecto de investigación no resultó ser la técnica adecuada toda vez que las partículas observadas mediante SEM se visualizan en escalas de grises, por lo que no pueden identificarse los microplásticos por su color y no se cuenta con la certeza de una correcta identificación por lo que podría asumirse erróneamente visualizar e identificar un microplástico.

El análisis SEM-EDS arroja información analítica sobre los elementos presentes en una muestra, con la posibilidad de detectar señales de elementos que con menos del 1% en peso de una muestra (Fries *et al.*, 2013), pero no puede definir los enlaces químicos. Por otra parte, el carbono no puede ser exactamente cuantificado debido

a contaminaciones en la cámara de muestra y lo que puede ser adsorbido en la superficie de la muestra (Gniadek & Dąbrowska, 2019). Por lo tanto, el análisis de partículas plásticas a menudo se basa en la identificación de otros elementos (Edirisinghe *et al.*, 2018b).

Considerando que los microplásticos tienen el potencial de adherir a su superficie otros materiales, metales, aditivos, que se encuentren en contacto con ellos o bien suspendidos en la atmósfera, la composición elemental obtenida por SEM- EDS puede determinarse en 2 puntos, uno en un punto sin partículas adheridas y dos en una región con partículas adheridas al microplástico (Shruti *et al.*, 2022). Por lo tanto, tampoco se tiene la certeza de identificar microplásticos en las partículas PM₁₀.

IX.2.3 Análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM) - distribución de tamaño de partículas

Se utilizó una herramienta de conteo de partículas como parte del análisis vía SEM identificándose que la mayor cantidad (número probable) de partículas (hasta el 87.4%) presentes en la fracción respirable (PM₁₀) en el aire ambiente corresponden a las de tamaño menor a 2.5 μ , y que sin embargo estas representan solo el 17.8% del peso del total de partículas en dicha fracción. Las investigaciones establecen que solo las partículas menores de 5 μ pueden depositarse en el pulmón (Jabbal *et al.*, 2017), por lo que el riesgo potencial para la salud se encuentra en las partículas de menor tamaño.

Las partículas de menos de 0.1 μ de diámetro, se les conoce como partículas ultrafinas (UPF), y se les consideran entre las partículas contaminantes más peligrosas debido a su pequeño tamaño, lo que les permite ingresar en los pulmones y pasar al torrente sanguíneo a través de los pulmones (Kwon *et al.*, 2020). Si se considera que la normatividad de calidad del aire respecto de dichas partículas

(PM₁₀) está enfocada a la protección de la salud y que las partículas que representan mayor riesgo a la salud de la población son las iguales o menores a 2.5 μ , pero que éstas representan solo un 17.8% del peso de las PM₁₀. Entonces podría considerarse la pertinencia de un nuevo enfoque en el tipo de unidades que debería emplearse para el máximo permisible de tales contaminantes del aire, resultando de que, en vez de ser una concentración de masa en volumen ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) debería ser una concentración de cantidad o número probable de partículas de x tamaño en volumen ($N(\text{PM}_x\mu)/\text{m}^3$). Como ejemplo de dicha discusión, actualmente la Organización Mundial de la Salud (2021), plantea cuantificar las partículas ultrafinas ambientales en términos de concentración del número de partículas con un límite inferior de ≤ 10 nm y sin restricción en el límite superior, se proponen rangos de cantidades de partículas/ cm^3 por lapsos de tiempos y continuar con las investigaciones utilizando la ciencia y las tecnologías.

La Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014 establece que las partículas PM₁₀ se depositan en la región extratorácica del tracto respiratorio (nariz, boca, naso, oro y laringofaringe) y que las PM_{2.5} se depositan fundamentalmente en la región traqueobronquial (tráquea hasta bronquiolo terminal) aunque pueden ingresar a los alvéolos. Dicha norma ha sido actualizada bajo la NOM-025-SSA1-2021, Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto a las partículas suspendidas PM₁₀ y PM_{2.5}. Valores normados para la concentración de partículas suspendidas PM₁₀ y PM_{2.5} en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población. Tanto en la actual, como en su antecesora, ambas normas establecen como máximos permisibles una concentración de masa en volumen ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

En consecuencia a lo anterior, es pertinente cuestionar las unidades en la que están dados los máximos permisibles de partículas (microgramos por metro cúbico) ya que, al parecer el peso, como ha quedado analizado en este trabajo, no representa el riesgo a la salud, sino el tamaño y el número probable $N(\text{PM}_x\mu)/\text{m}^3$ de las

partículas. Dicho de otra forma, es pertinente plantear un cambio a fin de que el máximo permisible de partículas en el aire sea dado por cantidad en volumen $N(\text{PM}_x)/\text{m}^3$ y no por masa en volumen $\mu\text{g}/\text{m}^3$. La cantidad o número probable de partículas según su tamaño en el aire, es posible actualmente medirla con tecnologías accesibles de manera inmediata y referirlas a un volumen de aire, por ejemplo, el litro o el metro cúbico, y dicha concentración ($N(\text{PM}_{x\mu})/\text{m}^3$) relacionarla a pruebas de espirometría como las reducciones agudas en el volumen espiratorio forzado del primer segundo (FEV1) y en la capacidad vital forzada (FVC), estas reducciones pueden observarse tanto de forma inmediata como tardía, u otras pruebas o análisis clínicos que evidencien posibles efectos a la salud por respiración de altas concentraciones de partículas, que permitan definir los valores máximos permisibles por afectación directa inmediata, independientemente de que existan posteriormente otros efectos a la salud derivado de la respiración de altas concentraciones de partículas del aire ambiente.

IX.2.4 Cromatografía de gases / Espectrometría de masas (GC-MS)

La identificación de plásticos en las partículas respirables PM_{10} , fue posible mediante cromatografía de gases - espectrometría de masas. Esta técnica constituye una potente herramienta que hace posible la identificación y cuantificación de una gran variedad de compuestos y aditivos en materiales que conforman polímeros (Blázquez *et al.*, 2017), con la ventaja de identificación y cuantificación en muestras que contienen $>1\mu\text{g}$ de material de interés (Caldwell *et al.*, 2022).

Como se ha mencionado en el desarrollo de la investigación, los estudios de microplásticos en la fracción respirable de las partículas del aire ambiente son de fechas recientes, por lo que no se tienen documentados ni establecidos protocolos para llevar a cabo los muestreos y cuantificación de microplásticos en el aire ambiente. Sin embargo, para los fines del estudio la GC-MS resultó ser la técnica

apropiada obteniendo como resultado la identificación de 74 compuestos químicos, mismos que se asocian a 4 tipos de plásticos y compuestos químicos plastificantes, ampliamente utilizados en la fabricación de plásticos. Es una excelente herramienta para la identificación del contenido de partículas poliméricas, sin embargo, es una técnica destructiva, lo que limita contar con información estructural de las muestras, y no brinda información acerca de tamaño o forma de los plásticos (Liu *et al.*, 2020).

La distribución de los compuestos químicos asociados a plásticos presentes en las partículas PM₁₀ en los días muestreados, arrojan como resultado que, en la muestra representativa del primer trimestre, la poliamida es la de mayor presencia con un 69%, la poliamida es comúnmente conocida como Nylon. De acuerdo con Dris *et al.* (2016), la poliamida puede provenir de fibras de ropa o muebles de casa. Esto coincide con Napper y Thompson (2016), quienes mencionan que los microplásticos fibrosos derivan del desgaste de los textiles, indicado que una fuente de emisión podría provenir del lavado o degradado de éstos.

Las muestras que representan los trimestres II y IV, presentan 64% de compuestos químicos identificados como plastificantes, el compuesto Bis(2-etilhexilo) ftalato, se agrega a los plásticos para hacerlos flexibles, y puede adherirse a las partículas de polvo (ATSDR, 2022). De acuerdo con Narmadha *et al.* (2020), el polvo es una fuente importante de microplásticos tanto en entornos urbanos como rurales. La muestra representativa del trimestre III, presentó en mayor porcentaje la presencia de poli(etileno-metil acrilato) con un 60%. Este compuesto es conocido comúnmente como acrílico, material de gran consumo por sus usos en construcción, publicidad, decoración, impresión, componentes de autos, muebles, artículos médicos, artículos del hogar, domos, tragaluces, entre muchos otros usos (acero mundo, 2022).

Los plásticos reportados en el aire varían ampliamente, se tienen reportados con mayor frecuencia el polietileno (PE), polietersulfona (PES), poliactonitrilo (PAN),

poliamida (PA), polietilentereftalato (PET), poliestireno (PS), polipropileno (PP), PVC, acrílico (AC), policarbonato (PC), ácido poliacrílico (PAA), etileno-acetato de vinilo (EVA), politetrafluoroetileno (PTFE), etileno propileno (EP), etileno acrílico (EA), acetato de etilenvinilo (EVAC), polimetilacrilato (PMA), acetato de polivinilo (PVA) y poliuretano (PU). Concluyendo que la abundancia de estos es relativa y es muy variable, tanto en tipo de plástico identificado como en cantidad (Habibi *et al.*, 2021).

IX.2.5 Clasificación y etiquetado de la Agencia Europea de Sustancias Químicas (ECHA)

Muchos productos químicos potencialmente dañinos se utilizan durante la producción de plásticos ya sea como bloques de construcción del propio material plástico o como aditivos para proporcionar ciertas propiedades como el color o la flexibilidad. Estas sustancias químicas permanecen en el producto final y, por lo tanto, los plásticos contienen y lixivian muchas sustancias químicas peligrosas, incluyendo las que alteran los sistemas hormonales del organismo o perturbadores endocrinos (Sociedad de Endocrinología, 2020).

La Agencia Europea de Sustancias y Mezclas Químicas, es una fuente única de información sobre las sustancias químicas que se fabrican e importan en Europa y recoge sus propiedades peligrosas, su clasificación y etiquetado e información para un uso seguro de las mismas, con base en la información de dicha Agencia, se lograron identificar 74 compuestos químicos asociados a plásticos, 32 de estos (más del 40%) cuentan con alguna etiqueta o clasificación de riesgo.

Está documentado que las sustancias químicas entran en nuestro organismo principalmente por la vía oral, por contacto con la piel, por vía intravenosa y por inhalación (Sociedad de Endocrinología, 2020). Los compuestos químicos identificados en esta investigación en el análisis con riesgo por inhalación y/o o

afectaciones en vías respiratorias (18 compuestos químicos), y se asocian a poliamida, poliéster y polietileno. Sripada *et al.* (2022) resalta que los productos químicos presentes en los plásticos se han convertido en un importante tema de investigación, su presencia como partículas está críticamente inexplorada. En México se presenta la necesidad de establecer una clasificación y regulación para la elaboración, comercialización y usos finales de los plásticos.

IX.2.6 Concentración ($\mu\text{g}/\text{Std}m^3$) de compuestos químicos identificados y asociados a polímeros en partículas PM_{10} del aire ambiente.

De acuerdo con los resultados obtenidos, en la zona norte de la ciudad de Hermosillo es posible que hasta un 20% de las concentraciones de PM_{10} corresponden a compuestos químicos asociados a plásticos, y debido a la escasa información acerca de los riesgos que pueda tener la exposición a los micro y nanoplásticos, se sugiere el uso del principio de la precaución para la formulación de políticas y toma de medidas apropiadas para reducir la exposición de éstos, tomando en consideración la investigación de las escalas de riesgo y cuantificar los riesgos (Lesli & Deplegde, 2020).

IX.3 Determinación de relación de la concentración de compuestos químicos asociados a plásticos entre los días analizados

Considerando los resultados de concentración en aire ambiente, tanto de PM_{10} como de compuestos químicos asociados a plásticos identificados en esas partículas, se obtuvo entre ellos un valor de correlación lineal simple moderada de 0.586 que, si bien es de interés desde el punto de vista ambiental, es pertinente señalar que debido al pequeño número de muestras (4), no se alcanza a obtener significancia estadística. En esencia este resultado sugiere que a mayor concentración de PM_{10} , mayor concentración de compuestos químicos en esas partículas lo cual parece lógico, sin embargo, se recomiendan posteriores estudios que aporten significancia estadística a este resultado.

IX.4 Determinación de la relación entre concentración de compuesto químicos asociados a plásticos y la concentración de PM₁₀.

Al utilizar la gráfica de dispersión (en este caso temporal) para los compuestos químicos asociados a plásticos identificados en las partículas PM₁₀ y sus concentraciones, respecto de los días de muestreo (una muestra por trimestre), fue posible identificar que aparentemente la presencia de dichos compuestos y sus valores de concentración no presentan similitud entre los días muestreados. Al respecto se tiene documentado que la presencia de microplásticos puede ser muy variable debido a diferentes factores como la lluvia, el viento y la humedad (Abbasi *et al.*, 2017), dichos factores influyen en la dispersión de los microplásticos y no es posible tener certeza de la cantidad de plásticos que puedan contabilizarse en un lugar (Yurtsever *et al.*, 2017).

IX.5 Limitaciones de la Investigación

La investigación dio como resultado información fundamental acerca de la presencia de compuestos químicos asociados a plásticos en el aire ambiente de la ciudad de Hermosillo, Sonora; El estudio permite establecer que la metodología de identificación de microplásticos en la fracción respirable de las partículas del aire ambiente, puede realizarse por análisis químico, en este caso GC-MS a través de la identificación y cuantificación de los compuestos químicos asociados a los plásticos, sin embargo, dicha técnica es costosa por lo que el número de muestras a analizar puede verse limitado dependiendo del presupuesto de cada proyecto.

Es importante puntualizar que el estudio no considera las variables meteorológicas, las cuales afectan directamente en la presencia y transporte de microplásticos (Zhou *et al.*, 2017, Allen *et al.*, 2019, Ambrosini *et al.*, 2019). Los resultados están acotados al análisis químico, identificación, cuantificación, estándares y bases de datos o bibliotecas que el laboratorio CIATEC tiene establecidos.

X. CONCLUSIONES

Con base en la metodología especializada y utilizada por el laboratorio, con este tipo de análisis, se lograron identificar y cuantificar compuestos químicos que se asocian a distintos plásticos; por lo cual la hipótesis de investigación consistente en que la fracción respirable PM_{10} de las partículas del aire ambiente en la ciudad de Hermosillo, Sonora contienen o se constituyen de microplásticos se da por aceptada.

Habiéndose revisado el estado del arte en la temática de este estudio y trabajando distintos métodos de análisis, se concluye que la identificación y cuantificación de microplásticos en partículas PM_{10} en el aire ambiente, se puede llevar a cabo por medio de análisis químico. La cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas resulta ser idónea para dicho fin.

Con base en los resultados obtenidos en el presente estudio, se establece que las partículas respirables PM_{10} presentan en su composición compuestos químicos asociados a plásticos y que éstos pueden constituir hasta el 20% de la masa de dichas partículas.

XI. RECOMENDACIONES

Mayor investigación respecto a la aplicabilidad de un máximo permisible que se encuentra basado en peso (masa) de partículas PM₁₀, cuando se conoce que el tamaño y cantidad de éstas son las que repercuten en la salud.

Continuar con la investigación acerca de los compuestos químicos que forman parte de la fracción respirable PM₁₀ de las partículas del aire ambiente y que presentan clasificación y etiquetado por la Agencia Europea de Sustancias Químicas (ECHA), que sirva como línea base para nuevas regulaciones.

Continuar con investigaciones que permitan detonar iniciativas que regulen el uso y presencia de los compuestos químicos, considerando que algunos compuestos se tienen identificados como disruptores endocrinos o con características de carcinogenicidad, mutagenicidad o toxicidad reproductiva, entre otras afectaciones.

Mayor investigación respecto a la cantidad de partículas plásticas que potencialmente son respirables, y las posibles repercusiones en la salud; así como investigación en métodos de filtrado, o mitigación de la contaminación de microplásticos en el aire.

Establecer acuerdos como país, considerando el marco internacional respecto a las regulaciones y usos de plásticos, ya que el transporte de los microplásticos en el aire ambiente se reporta como generalizada en toda la atmosfera.

XII. LITERATURA CITADA

Abbasi, S., Keshavarzi, B., Moore, F., Delshab, H., Soltani, N., & Sorooshian, A. (2017). Investigation of microrubbers, microplastics and heavy metals in street dust: a study in Bushehr City, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 76(23).
<https://doi.org/10.1007/s12665-017-7137-0>

Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades | ATSDR. (s. f.).
<https://www.atsdr.cdc.gov/es>

Agilent Technologies, Inc. (2018). Fundamentos de la Cromatografía de gases: Teoría.
https://www.agilent.com/cs/library/slidepresentation/public/5991-5422ES_Agilent_GC_Theory_Spanish.pptx

Allen, S., Allen, D., Phoenix, V. R., Roux, G. L., Jiménez, P. D., Simonneau, A., Binet, S., & Galop, D. (2019). Atmospheric transport and deposition of microplastics in a remote mountain catchment. *Nature Geoscience*, 12(5), 339-344.
<https://doi.org/10.1038/s41561-019-0335-5>

Ambrosini, R., Azzoni, R., Pittino, F., Diolaiuti, G., Franzetti, A., & Parolini, M. (2019). First evidence of microplastic contamination in the supraglacial debris of an alpine glacier. *Environmental Pollution*, 253, 297-301.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.07.005>

Blázquez-Blázquez Enrique, Benavente Rosario, Pérez Ernesto y Cerrada María. (2017). Aditivos en polímeros y su identificación mediante cromatografía de gases – espectrometría de masas. *Revista de Plásticos Modernos*.

Brahney, J., Hallerud, M., Heim, E., Hahnenberger, M., & Sukumaran, S. (2020). Plastic rain in protected areas of the United States. *Science*, 368(6496), 1257-1260.
<https://doi.org/10.1126/science.aaz5819>

Guía sobre espectroscopía FT-IR. (s. f.). Bruker.

<https://www.bruker.com/es/products-and-solutions/infrared-and-raman/ft-ir-routine-spectrometer/what-is-ft-ir-spectroscopy.html>

Caicedo, Carolina, Crespo-Delgado, Lina Marcela, Cruz-Rodríguez, Hever de la, & Álvarez-Jaramillo, Norman Andrés. (2017). Propiedades termo-mecánicas del Polipropileno: Efectos durante el reprocesamiento. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 18(3), 245-252.

http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-77432017000300245&lng=es&tlng=es.

Caldwell, J., Taladriz-Blanco, P., Lehner, R., Lubskyy, A., Ortuso, R. D., Rothen-Rutishauser, B., & Petri-Fink, A. (2022). The Micro-, Submicron-, and Nanoplastic Hunt: A review of detection methods for plastic particles. *Chemosphere*, 293, 133514. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133514>

Castañeda G., Gutiérrez A., Nacaratte F., Manzano C. (2020). Microplásticos: un contaminante que crece en todas las esferas ambientales, sus características y posibles riesgos para la salud pública por exposición. *Revista Boliviana de Química*, vol. 37, núm. 3, pp. 160-175.

Centro de Actividad Regional para el Consumo y la Producción Sostenible; Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente; Basel, Rotterdam, Stockholm Conventions; IPEN. (2020). Los aditivos tóxicos del plástico y la economía circular.

Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios. (2017). Normas Oficiales Mexicanas (NOM) de Calidad del Aire Ambiente.

<https://www.gob.mx/cofepris/acciones-y-programas/4-normas-oficiales-mexicanas-nom-de-calidad-del-aire-ambiente>.

Cruz Campas M.E., Gómez Álvarez A., Quintero Núñez M., Varela Salazar J. (2013). Evaluación de la calidad del aire respecto de Partículas Suspendidas Totales (PST) y metales pesados (Pb, Cd, Ni, Cu, Cr) en la ciudad de Hermosillo, Sonora, México, durante un periodo anual. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 29 (4) 269-283.

Cruz-Campas M.E., Gómez-Álvarez A., Quintero-Núñez M., Ramirez-Leal R., Varela-Salazar J., Monge-Amaya O. (2014). Air Quality Regarding to TSP in Six Cities of Sonora, Mexico, a Criticism to the NOM-025-SSA1-1993 and a Proposed Criterion for Its Non-Compliance. *Journal of Environmental Protection*, 5, 864-875.
<http://dx.doi.org/10.4236/jep.2014.510088>

Dris, R. (2016). First assesment of sources and fate of macro and micro plastics in urban hydrosystems: Case of Paris megacity (Doctoral dissertation, Université Paris-Est).

European Chemicals Agency, (2022). Recuperado de: <https://echa.europa.eu/>

Flores, C.E. 2009. Polímeros vs. Plásticos. Facultad de Ingeniería - Universidad Rafael Landívar.

Fries, E., Dekiff, J. H., Willmeyer, J., Nuelle, M. T., Ebert, M., & Rémy, D. (2013). Identification of polymer types and additives in marine microplastic particles using pyrolysis-GC/MS and scanning electron microscopy. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 15(10), 1949. <https://doi.org/10.1039/c3em00214d>

Gaspéri, J., Wright, S., Dris, R., Collard, F., Mandin, C., Guerrouache, M., Langlois, V., Kelly, F. J., & Tassin, B. (2018). Microplastics in air: Are we breathing it in? *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 1, 1-5.
<https://doi.org/10.1016/j.coesh.2017.10.002>

Gniadek, M., & Dąbrowska, A. (2019). The Marine Nano- and Microplastics Characterisation by SEM-EDX: The potential of the method in comparison with various physical and chemical approaches. *Marine Pollution Bulletin*, 148, 210-216. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.07.067>

González-López R.C. (2012). Analisis de los datos obtenidos en los muestreos de partículas PM₁₀ y PST a partir del año 2007 al 2009 en la Ciudad de Hermosillo, Sonora, México. Tesis Licenciatura. Universidad Estatal de Sonora. México.

González-Pleiter, M., Edo, C., Aguilera, Á., Viúdez-Moreiras, D., Pulido-Reyes, G., González-Toril, E., Osuna, S., De Diego-Castilla, G., Leganés, F., Fernández-Piñas, F., & Rosal, R. (2021). Occurrence and transport of microplastics sampled within and above the planetary boundary layer. *Science of The Total Environment*, 761, 143213. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143213>

Habibi N, Uddin S, Fowler SW, Behbehani M. Microplastics in the atmosphere: a review. *J Environ Expo Assess* 2022;1:6. <https://dx.doi.org/10.20517/jeea.2021.07>

Leslie, H., Van Velzen, M., Brandsma, S., Vethaak, D., García-Vallejo, J. J., & Lamoree, M. (2022b). Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood. *Environment International*, 163, 107199. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107199>

Henry J. G. & Heinke G. W. (1999) *Ingeniería Ambiental*. México. Prentice Hall Hispanoamericana, S.A. (pp. 492).

Instituto de Investigaciones en Materiales. (2021). Introducción a los plásticos y microplásticos: problemas y soluciones. Recuperado de: <https://www.vinculacion.iim.unam.mx/>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía, INEGI. (2022). Aspectos Geográficos Sonora. Recuperado de:

https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/areasgeograficas/resumen/resumen_26.pdf

Jabbal, S., Poli, G., & Lipworth, B. J. (2017). Does size really matter?: Relationship of particle size to lung deposition and exhaled fraction. *The Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 139(6), 2013-2014.e1. <https://doi.org/10.1016/j.jaci.2016.11.036>

Jordana-Lluch, E., Martró, E., & Ruiz, V. A. (2012). La espectrometría de masas en el Laboratorio de Microbiología Clínica. *Enfermedades Infecciosas y Microbiología Clínica*, 30(10), 635-644. <https://doi.org/10.1016/j.eimc.2012.01.012>

Valtueña, J. A. (2001). *Enciclopedia de Ecología y la Salud*. Editorial Safeliz

Xu, J., Thomas, K. V., Luo, Z., & Gowen, A. (2019). FTIR and Raman Imaging for Microplastics Analysis: State of the art, Challenges and Prospects. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 119, 115629. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2019.115629>

Kwon, H., Ryu, M. H., & Carlsten, C. (2020). Ultrafine particles: unique physicochemical properties relevant to health and disease. *Experimental & Molecular Medicine*, 52(3), 318-328. <https://doi.org/10.1038/s12276-020-0405-1>

Lenz Robin, Enders Kristina, and Gissel-Nielsen Torkel Gissel, (2016). Microplastic exposure studies should be environmentally realistic; *Proceedings of the National Academy of Sciences*.

Leps J, Smilauer P. 2003. *Multivariate Analysis of Ecological Data Using CANOCO*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.

Leslie, H., & Depledge, M. H. (2020). Where is the evidence that human exposure to microplastics is safe? *Environment International*, 142, 105807.

<https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105807>

Liu, M., Lu, S., Chen, Y., Cao, C., Bigalke, M., & He, D. (2020). Analytical methods for microplastics in environments: current advances and challenges. En *The handbook of environmental chemistry* (pp. 3-24).

https://doi.org/10.1007/698_2019_436

Muñante, R. M. (2020, 15 septiembre). Microplásticos: el enorme problema de pequeñas partículas de plástico.

<https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/quimica/article/view/20796>

Edirisinghe, M., Charani, Z., Ciric, L., Illangakoon, U. E., & Edirisinghe, M. (2018b). Antimicrobial activity of tellurium-loaded polymeric fiber meshes. *Journal of Applied Polymer Science*, 135(25). <https://doi.org/10.1002/app.46368>

Narmadha, V. V., Jose, J., Patil, S., Farooqui, M. O., Srimuruganandam, B., Sivanesan, S., & Krishnamurthi, K. (2020). Assessment of microplastics in roadside suspended dust from urban and rural environment of Nagpur, India. *International Journal of Environmental Research*, 14(6), 629-640. <https://doi.org/10.1007/s41742-020-00283-0>

Napper, I. E., & Thompson, R. C. (2016). Release of synthetic microplastic plastic fibres from domestic washing machines: effects of fabric type and washing conditions. *Marine Pollution Bulletin*, 112(1-2), 39-45.

<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.09.025>

Nenadic, O, Greenacre M. (2007). Correspondence Analysis in R, with two- and three-dimensional graphics: The ca package. *Journal of Statistical Software* 20(3):1-13

Organización Mundial de la Salud. OMS, (2021). Contaminación del aire ambiente (exterior). Recueprado en: <https://www.who.int/es/news/item/22-09-2021-new-who-global-air-quality-guidelines-aim-to-save-millions-of-lives-from-air-pollution#:~:text=Cuando%20se%20act%C3%BAa%20sobre%20estos,incide%20en%20otros%20contaminantes%20perjudiciales.>

Organización Mundial de la Salud. OMS, (2021). Global air quality guidelines. Recuperado en: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. FAO, (2019). Los microplásticos en los sectores de pesca y acuicultura. Recuperado en: <http://www.fao.org/3/ca3540es/ca3540es.pdf>

R Core Team. (2022). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Viena, Austria. URL <https://www.R-project.org/>

Ramírez-Leal, R., Valle-Martinez, M., & Cruz-Campas, M. (2014). Chemical and Morphological study of PM₁₀ analysed by SEM-EDS. *Open journal of air pollution*, 03(04), 121-129. <https://doi.org/10.4236/ojap.2014.34012>

Romeva, C. R. I. (2010). Selección de materiales en el diseño de máquinas. Universitat Politècnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politècnica.

Sarijan, S., Azman, S., Said, M. I. M., & Lee, M. H. (2019). Ingestion of microplastics by commercial fish in Skudai River, Malaysia. *ResearchGate*. <https://doi.org/10.14456/ea.2019.47>

Schneider, M., Stracke, F., Hansen, S., & Schaefer, U. F. (2009). Nanoparticles and their interactions with the dermal barrier. *Dermato-endocrinology*, 1(4), 197-206. <https://doi.org/10.4161/derm.1.4.9501>

Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano. SEDATU. (2018). Programa Municipal de Ordenamiento Territorial de Hermosillo 2018. Boletín Oficial. 01 de febrero del 2018.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. SEMARNAT. (2012). Norma Oficial Mexicana NOM-156-SEMARNAT-2012, Establecimiento y operación de sistemas de monitoreo de la calidad del aire. *Diario Oficial de la Federación*. 16 de julio del 2012. Recuperado en: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5259464&fecha=16/07/2012#gs.c.tab=0

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. SEMARNAT. (2017). Estrategia Nacional de la Calidad del Aire (ENCA). Recuperado en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/195809/Estrategia_Nacional_Calidad_del_Aire.pdf

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. SEMARNAT. (2017). Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire para el Estado de Sonora 2017-2026 (PROAIRE). <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/programas-de-gestion-para-mejorar-la-calidad-del-aire>

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. SEMARNAT. (2019). NORMA Oficial Mexicana NOM-172-SEMARNAT-2019, Lineamientos para la obtención y comunicación del Índice de Calidad del Aire y Riesgos a la Salud. *Diario Oficial de la Federación*. 20 de noviembre del 2019.

https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5579387&fecha=20/11/2019#gsc.tab=0

Secretaria de Salud, SA. (2021). NORMA Oficial Mexicana NOM-020-SSA1-2021, Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al ozono (O3). Valores normados para la concentración de ozono (O3) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población. Diario Oficial de la Federación. 28 de octubre del 2021.

https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5633956&fecha=28/10/2021#gsc.tab=0

Secretaria de Salud. SA. (2021). NORMA Oficial Mexicana NOM-021-SSA1-2021, Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al monóxido de carbono (CO). Valores normados para la concentración de monóxido de carbono (CO) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población. Diario oficial de la Federación. 29 de octubre de 2021.

https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5634084&fecha=29/10/2021#gsc.tab=0

Secretaria de Salud. SA (2019). NORMA Oficial Mexicana NOM-022-SSA1-2019, Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al dióxido de azufre (SO2). Valor normado para la concentración de dióxido de azufre (SO2) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población. Diario Oficial de la Federación. 28 de agosto del 2019.

https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5568395&fecha=20/08/2019#gsc.tab=0

Secretaria de Salud. SA. (2021). NORMA Oficial Mexicana NOM-023-SSA1-2021, Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al bióxido de nitrógeno (NO2). Valor normado para la concentración de bióxido de

nitrógeno (NO₂) en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población. Diario Oficial de la Federación. 27 de octubre del 2021.

https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5633854&fecha=27/10/2021#gs.c.tab=0

Secretaría de Salud. SA. (2021). NORMA Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2021, Salud ambiental. Valores límite permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM₁₀ y PM_{2.5} en el aire ambiente y criterios para su evaluación. Diario Oficial de la Federación. 27 de octubre del 2021.

https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5633855&fecha=27/10/2021#gs.c.tab=0

Secretaría de Salud. SA. (2021). NORMA Oficial Mexicana NOM-026-SSA1-2021, Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al plomo (Pb). Valor normado para la concentración de plomo (Pb) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población. Diario Oficial de la Federación. 29 de octubre de 2021.

https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5634085&fecha=29/10/2021#gs.c.tab=0

Silva, A. B., Bastos, A. S., Justino, C. I., Da Costa, J. P., & Rocha-Santos, T. (2018). Microplastics in the Environment: Challenges in Analytical Chemistry - a review. *Analytica Chimica Acta*, 1017, 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2018.02.043>

Sociedad de Endocrinología & IPEN. (2020). Plásticos, salud, y perturbadores endocrinos.

Sripada, K., Wierzbicka, A., Abass, K., Grimalt, J. O., Erbe, A., Röllin, H. B., Weihe, P., Díaz, G. J., Singh, R. R., Visnes, T., Rautio, A., Odland, J. Ø., & Wagner, M.

(2022). A Children's health perspective on nano- and microplastics. *Environmental Health Perspectives*, 130(1). <https://doi.org/10.1289/ehp9086>

Street, M. E., & Bernasconi, S. (2021). Microplastics, environment and child health. *Italian Journal of Pediatrics*, 47(1). <https://doi.org/10.1186/s13052-021-01034-3>

Stuart, B. H. (2004). *Infrared Spectroscopy: Fundamentals and applications. En Analytical techniques in the sciences.* <https://doi.org/10.1002/0470011149>

Shruti, V., Kutralam-Muniasamy, G., Pérez-Guevara, F., Roy, P. D., & Martínez, I. (2022). Occurrence and characteristics of atmospheric microplastics in Mexico City. *Science of The Total Environment*, 847, 157601. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157601>

Universidad Veracruzana. (2022). Cromatografía de Gases/Espectrometría de Masas (GC/MS) – Instituto de Química Aplicada. <https://www.uv.mx/sara/equipamiento/gcms/>

40 CFR Appendix J to part 50 - Reference method for the determination of particulate matter as PM₁₀ in the atmosphere. (s. f.). LII / Legal Information Institute. https://www.law.cornell.edu/cfr/text/40/appendix-J_to_part_50

Cabra, J. R. V. (2018). Identificación de polímeros por espectroscopía infrarroja. *Ontare*, 5. <https://doi.org/10.21158/23823399.v5.n0.2017.2005>

Vethaak, A., & Legler, J. (2021). Microplastics and human health. *Science*, 371(6530), 672-674. <https://doi.org/10.1126/science.abe5041>

Wright, S., & Kelly, F. J. (2017). Plastic and human health: a micro issue? *Environmental Science & Technology*, 51(12), 6634-6647. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b00423>

Wright, S., Ulke, J., Font, A., Chan, K. L. A., & Kelly, F. J. (2020). Atmospheric microplastic deposition in an urban environment and an evaluation of transport. *Environment International*, 136, 105411. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105411>

Xie, Y., Li, Y., Feng, Y., Cheng, W., & Wang, Y. (2022). Inhalable microplastics prevails in air: Exploring the size detection limit. *Environment International*, 162, 107151. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107151>

Cai, Y., Mitrano, D. M., Hufenus, R., & Nowack, B. (2021b). Formation of fiber fragments during abrasion of polyester textiles. *Environmental Science & Technology*, 55(12), 8001-8009. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c00650>

Yúfera, E. P. (1994). *Química orgánica básica y aplicada: De la molécula a la industria*. Vol 1. Reverte.

Yurtsever, M., Kaya, A. T., & Bayraktar, S. Ç. (2017). A research on microplastic presence in outdoor air. *En Springer water* (pp. 89-97). https://doi.org/10.1007/978-3-319-71279-6_13

Zhang, Q., Xu, E. G., Li, J., Chen, Q., Ma, L., Zeng, E. Y., & Shi, H. (2020). A review of microplastics in table salt, drinking water, and air: Direct Human exposure. *Environmental Science & Technology*, 54(7), 3740-3751. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b04535>

Zhou, Q., Tian, C., & Luo, Y. (2017). Various forms and deposition fluxes of microplastics identified in the coastal urban atmosphere. *Kexue tongbao*, 62(33), 3902-3909. <https://doi.org/10.1360/n972017-00956>

Zhou, Q., Zhang, H., Fu, C., Yang, Z., Dai, Z., Li, Y., Tu, C., & Luo, Y. (2018). The distribution and morphology of microplastics in coastal soils adjacent to the Bohai Sea and the Yellow Sea. *Geoderma*, 322, 201-208. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.02.015>

XIII. ANEXOS

Anexo I.- Compuestos químicos asociados a plásticos identificados en muestras de PM₁₀ de aire ambiente en Hermosillo, Sonora, con clasificación y etiquetado de la Agencia Europea de Sustancias químicas (ECHA).

Anexo II.- Base de datos de concentraciones de compuestos químicos asociados a plásticos, con clasificación y etiquetado de la Agencia Europea de Sustancias químicas (ECHA), utilizados para las Figuras 24 y 25.

ANEXO I

Compuestos químicos asociados a plásticos identificados en muestras de PM₁₀ de aire ambiente en Hermosillo, Sonora, con clasificación y etiquetado de la Agencia Europea de Sustancias químicas (ECHA).

No.	Compuesto Químico	No. CAS	Polímero Asociado	Clasificación y etiquetado Agencia Europea de Sustancias Químicas	Afectación Vías Respiratorias
1	Ácido tetradecanoico	544-63-8	Poliamida	¡Advertencia! Según la clasificación facilitada por las empresas a la ECHA en las notificaciones CLP, esta sustancia provoca irritación ocular grave y provoca irritación cutánea.	
2	Ácido heptadecanoico	506-12-7	Poliamida	¡Advertencia! Según la clasificación facilitada por las empresas a la ECHA en las notificaciones CLP, esta sustancia provoca irritación ocular grave, irrita la piel y puede irritar las vías respiratorias.	X
3	Ácido pentadecanoico	1002-84-2	Poliamida		X
4	Ácido trans-13-octadecenoico	693-71-0	Poliamida		X
5	Dodecanamida, N,N-dietil-	3352-87-2	Poliamida		X
6	Heptadecanonitrilo	5399-02-0	Poliamida		¡Advertencia! Según la clasificación proporcionada por las empresas a la ECHA en las notificaciones CLP, esta sustancia es nociva si se ingiere.
7	Nonanamida	1120-07-6	Poliamida		
8	N,N-Dimetildodecanamida	3007-53-2	Poliamida	¡Advertencia! Según la clasificación proporcionada por las empresas a la ECHA en los registros REACH, esta sustancia es muy tóxica para la vida acuática, provoca irritación ocular grave, es nociva para la vida acuática con efectos duraderos, provoca irritación cutánea y puede irritar las vías respiratorias.	X
9	N,N-Dimetildecanamida	14433-76-2	Poliamida		X
10	Ácido n-decanoico	334-48-5	Poliamida	¡Advertencia! Según la clasificación y etiquetado armonizados (ATP07) aprobados por la Unión Europea, esta sustancia provoca irritación ocular grave, es nociva para la vida acuática con efectos duraderos y provoca irritación cutánea.	
11	Dietiltoluamida	134-62-3	Poliamida	¡Advertencia! Según la clasificación y etiquetado armonizados (ATP14) aprobados por la Unión Europea, esta sustancia es nociva por ingestión, provoca irritación ocular grave y provoca irritación cutánea.	
12	1-Hexadecanol	36653-82-4	Poliéter	¡Peligro! De acuerdo con la clasificación proporcionada por las empresas a la ECHA en los registros REACH, esta sustancia es muy tóxica para la vida acuática con efectos duraderos, es muy tóxica para la vida	X
13	1-Octadecanol	112-92-5	Poliéter		X

No.	Compuesto Químico	No. CAS	Polímero Asociado	Clasificación y etiquetado Agencia Europea de Sustancias Químicas	Afectación Vías Respiratorias
				acuática, causa irritación ocular grave, es un líquido y vapor altamente inflamable, es nociva si se ingiere, es nocivo en contacto con la piel, puede causar irritación respiratoria y puede causar somnolencia o mareos.	
14	Éter monododecílico del dietilenglicol	3055-93-4	Poliéter	¡Peligro! Según la clasificación facilitada por las empresas a la ECHA en las notificaciones CLP, esta sustancia es muy tóxica para la vida acuática, provoca lesiones oculares graves y provoca irritación cutánea.	
15	1-Trideceno	2437-56-1	Polietileno	¡Peligro! Según la clasificación facilitada por las empresas a la ECHA en las notificaciones CLP, esta sustancia provoca una irritación ocular grave.	
16	1-Pentadeceno	13360-61-7	Polietileno	¡Peligro! Según la clasificación facilitada por las empresas a la ECHA en las notificaciones CLP, esta sustancia puede ser mortal en caso de ingestión y penetración en las vías respiratorias , provoca irritación ocular grave, puede irritar las vías respiratorias y provoca irritación cutánea.	X
17	Ácido dodecanoico	143-07-7	Poliamida	¡Peligro! Según la clasificación facilitada por las empresas a la ECHA en los registros REACH esta sustancia provoca lesiones oculares graves.	
18	1-Octanol	111-87-5	Poliéter	¡Peligro! Según la clasificación facilitada por las empresas a la ECHA en los registros REACH, esta sustancia es muy tóxica para los organismos acuáticos con efectos duraderos, es muy tóxica para los organismos acuáticos, provoca lesiones oculares graves, es nociva por ingestión, es nociva en contacto con la piel, es un líquido y vapor altamente inflamable, puede causar irritación respiratoria y puede causar somnolencia o mareos.	X
19	Ácido octadecanoico	57-11-4	Poliamida	¡Peligro! Según la clasificación proporcionada por las empresas a la ECHA en las notificaciones CLP, esta sustancia es tóxica por ingestión y es muy tóxica para la vida acuática.	
20	Ácido 1,3-bencenodicarboxílico, éster bis(etilhexílico)	137-89-3	Poli(etileno-metil acrilato)	¡Peligro! Según la clasificación proporcionada por las empresas a la ECHA en las notificaciones CLP, esta sustancia puede dañar la fertilidad o al feto y es muy tóxica para la vida acuática.	
21	Nonadecano	629-92-5	Polietileno	¡Peligro! Según la clasificación proporcionada por las empresas a la ECHA en las notificaciones CLP, esta sustancia puede ser	X

No.	Compuesto Químico	No. CAS	Polímero Asociado	Clasificación y etiquetado Agencia Europea de Sustancias Químicas	Afectación Vías Respiratorias
				mortal si se ingiere y entra en las vías respiratorias.	
22	1-Decanol	112-30-1	Poliéter	¡Peligro! Según la clasificación proporcionada por las empresas a la ECHA en los registros REACH, esta sustancia es muy tóxica para la vida acuática con efectos duraderos, es muy tóxica para la vida acuática, causa lesiones oculares graves, es un líquido y vapor altamente inflamable, es nociva por ingestión, es nocivo en contacto con la piel, puede causar irritación respiratoria y puede causar somnolencia o mareos.	X
23	1-Dodecanol	112-53-8	Poliéter	¡Peligro! Según la clasificación proporcionada por las empresas a la ECHA en los registros REACH, esta sustancia puede ser mortal si se ingiere y entra en las vías respiratorias y puede causar efectos nocivos duraderos para la vida acuática.	X
24	Dodecano, 2,6,10-trimetil-	3891-98-3	Polietileno	¡Peligro! Según la clasificación proporcionada por las empresas a la ECHA en los registros REACH, esta sustancia puede ser mortal si se ingiere y entra en las vías respiratorias y puede causar efectos nocivos duraderos para la vida acuática.	X
25	1-Docoseno	1599-67-3	Polietileno	¡Peligro! Según la clasificación proporcionada por las empresas a la ECHA en los registros REACH, esta sustancia puede ser mortal si se ingiere y entra en las vías respiratorias.	X
26	1-Dodeceno	112-41-4	Polietileno		X
27	1-Tetradeceno	1120-36-1	Polietileno		X
28	n-Pentadecano	629-62-9	Polietileno		X
29	Bis(2-etilhexilo) ftalato	117-81-7	Plastificante	¡Peligro! Según la clasificación y el etiquetado armonizados (CLP00) aprobados por la Unión Europea, esta sustancia puede perjudicar la fertilidad y causar daños al feto.	
30	Decanamida, N,N-dietil-	2602-61-1	Poliamida		
31	Ácido benzoico	65-85-0	Poliamida	¡Peligro! Según la clasificación y etiquetado armonizados (ATP06) aprobados por la Unión Europea, esta sustancia provoca daños en los órganos tras exposiciones prolongadas o repetidas, provoca lesiones oculares graves y provoca irritación cutánea.	
32	Ácido octanoico	124-07-2	Poliamida	¡Peligro! Según la clasificación y etiquetado armonizados (ATP07) aprobados por la Unión Europea, esta sustancia provoca quemaduras graves en la piel y lesiones oculares y es nociva para la vida acuática con efectos duraderos.	

ANEXO II

Base de datos de Concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de compuestos químicos asociados a plásticos, con clasificación y etiquetado de la Agencia Europea de Sustancias químicas (ECHA), utilizados para las Figuras 24 y 25.

ID	Compuesto	Trimestre Muestreado				Etiqueta de Riego	Afectación Vías Respiratorias
		I	II	III	IV		
1	Bis(2-etilhexilo) ftalato	0.4246	5.1608	0.1422	4.9652	Si	No
2	Didecan-2-ilo ftalato	0.0000	0.1562	0.0695	0.0641	No	No
3	Ácido 1,2-bencenodicarboxílico, éster bis(8-metilnonilo)	0.0000	0.0000	0.0289	0.0000	No	No
4	Ácido 1,3-bencenodicarboxílico, éster bis(etilhexílico)	1.7514	0.1640	0.0396	0.0678	Si	No
5	Ácido 1-propeno-1,2,3-tricarboxílico, éster tributílico	0.0000	0.0291	0.0331	0.0403	No	No
6	Ácido 7-oxodehidroabiético, éster metílico	0.0000	0.0159	0.0000	0.0000	No	No
7	Ácido ftálico, éster bis(7-metiloctilo)	0.0000	0.0550	0.0000	0.0266	No	No
8	Ácido hexadecanoico, éster metílico	0.1010	0.0156	0.0000	0.0141	No	No
9	Ácido hexanodioico, éster bis(2-etilhexílico)	0.0296	0.0871	0.4352	0.1359	No	No
10	Ácido octadecanoico, éster etenílico	0.3852	0.2179	0.0193	0.0419	No	No
11	Ácido sulfuroso, butil heptadecil éster	0.0000	0.0000	0.0083	0.0233	No	No
12	Estearato de metilo	0.0697	0.0125	0.0000	0.0108	No	No
13	Ácido benzoico	0.0058	0.0000	0.0000	0.0000	Si	No
14	Ácido dodecanoico	0.0000	0.0000	0.0000	0.0423	Si	No
15	Ácido heptadecanoico	0.0774	0.0160	0.0000	0.0191	Si	Si
16	Ácido n-decanoico	0.0000	0.0145	0.0000	0.0391	Si	No
17	Ácido n-hexadecanoico	5.9980	1.1443	0.0000	0.4513	No	No
18	Ácido octadecanoico	2.7326	0.0393	0.0000	0.8112	Si	No
19	Ácido octanoico	0.5984	0.0000	0.0000	0.0000	Si	No
20	Ácido pentadecanoico	0.0000	0.0000	0.0000	0.0128	Si	Si
21	Ácido tetradecanoico	0.5758	0.1382	0.0000	0.2584	Si	No
22	Ácido trans-13-octadecenoico	0.0000	0.0000	0.0000	0.2286	Si	Si
23	Decanamida, N,N-dietil-	0.0000	0.0311	0.0000	0.0000	Si	No
24	Dietiltoluamida	0.0757	0.0000	0.0000	0.0000	Si	No
25	Dodecanamida, N,N-dietil-	0.0137	0.0000	0.0000	0.0000	Si	Si
26	Heptadecanonitrilo	0.1000	0.0255	0.0000	0.0203	Si	No
27	Hexadecanamida	0.5515	0.0910	0.0000	0.1262	No	No
28	Hexadecanonitrilo	0.1050	0.0232	0.0055	0.0210	No	No
29	N,N-Dimetildecanamida	0.3110	0.2310	0.0379	0.0313	Si	Si
30	N,N-Dimetildodecanamida	0.1358	0.0673	0.0000	0.0000	Si	Si
31	Nonanamida	0.0000	0.0000	0.0171	0.0000	Si	No

ID	Compuesto	Trimestre Muestreado				Etiqueta de Riesgo	Afectación Vías Respiratorias
		I	II	III	IV		
32	Octadecanamida	0.3852	0.0970	0.0000	0.0000	No	No
33	Tetradecanonitrilo	0.0000	0.0222	0.0000	0.0000	No	No
34	1-Decanol	0.0717	0.0083	0.0000	0.0000	Si	Si
35	1-Decanol, 2-hexilo-	0.0000	0.0229	0.0101	0.0000	No	No
36	1-Dodecanol	0.0672	0.0110	0.0000	0.0077	Si	Si
37	1-Hexadecanol	0.3611	0.0773	0.0000	0.0700	Si	Si
38	1-Hexadecanol, 3,7,11,15-tetrametil-	0.0286	0.0000	0.0000	0.0000	No	No
39	1-Octadecanol	0.0963	0.0263	0.0000	0.0000	Si	Si
40	1-Octanol	0.0000	0.0000	0.0136	0.0000	Si	Si
41	3-Dodecanol	0.0000	0.0000	0.0094	0.0000	No	No
42	Etanol,2-(dodeciloxi)-	0.0502	0.0000	0.0000	0.0062	No	No
43	Etanol,2-(hexadeciloxi)-	0.0000	0.0000	0.0000	0.0052	No	No
44	Éter monododecílico del dietilenglicol	0.0000	0.0000	0.0000	0.0242	Si	No
45	n-heptadecanol-1	0.5807	0.1180	0.0000	0.0503	No	No
46	n-Nonadecanol-1	0.0700	0.0317	0.0063	0.0000	No	No
47	Trietilenglicol di(2-etilhexoato)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0227	No	No
48	10-Heneicoseno (c,t)	0.0000	0.0000	0.0188	0.0000	No	No
49	10-Metilnonadecano	0.0000	0.0000	0.0000	0.0204	No	No
50	1-Docoseno	0.0000	0.0185	0.0000	0.0000	Si	Si
51	1-Dodeceno	0.0000	0.0000	0.0065	0.0000	Si	Si
52	1-Pentadeceno	0.0000	0.0000	0.0026	0.0000	Si	Si
53	1-Tetradeceno	0.1554	0.0490	0.0000	0.0000	Si	Si
54	1-Trideceno	0.0902	0.0000	0.0000	0.0000	Si	No
55	1-Undeceno, 9-metil-	0.0000	0.0000	0.0000	0.0198	No	No
56	2-Metiltetracosano	0.0000	0.0000	0.0055	0.0000	No	No
57	5-Octadeceno, (E)-	0.0409	0.0133	0.0041	0.0107	No	No
58	7-Hexadeceno, (Z)-	0.0000	0.0000	0.0000	0.0496	No	No
59	9-Eicoseno, (E)-	0.2855	0.0182	0.0000	0.0000	No	No
60	9-Octadeceno, (E)-	0.0000	0.0000	0.0000	0.0138	No	No
61	Decano, 6-etil-2-metil-	0.0000	0.0000	0.0042	0.0000	No	No
62	Decano,2,3,5-trimetil-	0.0000	0.0000	0.0000	0.0249	No	No
63	Dodecane, 2,6,11-trimethyl-	0.0756	0.0000	0.0000	0.0000	No	No
64	Dodecano, 2,6,10-trimetil-	0.0000	0.0211	0.0000	0.0000	Si	Si
65	Dodecano,2,7,10-trimetil-	0.0000	0.0213	0.0000	0.0245	No	No
66	Heptadecano, 2,6,10,15-tetrametil-	0.0000	0.0000	0.0223	0.0197	No	No
67	Hexadecano, 2,6,10,14-tetrametil-	0.2012	0.0000	0.0000	0.0000	No	No
68	Hexadecano, 2,6,11,15-tetrametil-	0.1293	0.0000	0.0000	0.0000	No	No
69	Nonadecano	0.0000	0.0000	0.0089	0.0000	Si	Si

ID	Compuesto	Trimestre Muestreado				Etiqueta de Riesgo	Afectación Vías Respiratorias
		I	II	III	IV		
70	Nonano, 3,7-dimetil-	0.0000	0.0000	0.0000	0.0721	No	No
71	Nonano, 3-metil-5-propil-	0.0000	0.0286	0.0000	0.0000	No	No
72	n-Pentadecano	0.0000	0.0246	0.0000	0.0000	Si	Si
73	Tetracosano	0.1147	0.0000	0.0000	0.0000	No	No
74	Undecano, 3,8-dimetil-	0.0654	0.0000	0.0000	0.0000	No	No