

# Atmospheric pollution by PM 2.5 and microplastics: risks and scientific advances

## Contaminación atmosférica por PM 2.5 y microplásticos: riesgos y avances científicos

Rodrigo Dávid Colichón Carranza<sup>1</sup>  , Alexis Torres-del Aguila<sup>1</sup>  , Carlos Mauricio Lozano Carranza<sup>1</sup>  , Andi Lozano Chung<sup>2</sup>  

<sup>1</sup>Universidad César Vallejo, Facultad De Ingeniería Y Arquitectura. Tarapoto, Perú.

<sup>2</sup>Universidad Nacional de San Martín. Tarapoto, Perú.

### Cite as

Colichón Carranza RD, Torres-del Aguila A, Lozano Carranza CM, Lozano Chung A. Atmospheric pollution by PM 2.5 and microplastics: risks and scientific advances. SAP Biomedical & Chemical Engineering Innovation. 2023; 2:39. <https://doi.org/10.56294/evk202239>

### Publication History

Submitted: 10-10-2022

Revised: 03-01-2023

Accepted: 12-04-2023

Published: 13-04-2023

### Corresponding Author

Rodrigo Dávid Colichón Carranza 

### ABSTRACT

**Introduction:** pollution by fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) and microplastics (PMs) appeared as a growing environmental and public health problem. PM<sub>2.5</sub> particles, with a diameter of less than 2.5 µm, penetrated deeply into the respiratory system, while PMs, plastic fragments smaller than 5 mm, acted as carriers of pollutants. Scientific evidence indicated that their combination could increase respiratory, cardiovascular and oncological risks.

**Development:** international and local studies reported variable concentrations of PM<sub>2.5</sub>, from low values in Villavicencio and Tarapoto to critical levels in Shanghai, New Delhi and Brazilian cities, where WHO recommendations were widely exceeded, especially in winter. Research such as that of Zhu et al. and Abbasi identified PMs in PM<sub>2.5</sub> fractions, using techniques such as FTIR spectroscopy and scanning electron microscopy (SEM/EDS). The main sources were documented to include transportation, industrial emissions, domestic combustion and degradation of major plastics. Meteorological factors such as temperature, humidity and wind speed influenced particle dispersion. Spatial and temporal variability evidenced the need for integrated and accurate monitoring systems.

**Conclusions:** the interaction between PM<sub>2.5</sub> and PMs generated a complex environmental risk scenario, requiring public policies to reduce emissions and regulate the use of plastics. Methodological advances improved detection, although limitations persisted in understanding their chronic effects. Evidence supported that early and coordinated action was key to mitigate impacts on health and the environment.

**Keywords:** PM<sub>2.5</sub>; Microplastics; Public Health; Atmospheric Pollution; Environmental Monitoring.

### RESUMEN

**Introducción:** la contaminación por material particulado fino (PM<sub>2.5</sub>) y microplásticos (MPs) se presentó como un problema ambiental y de salud pública creciente. Las partículas PM<sub>2.5</sub>, con diámetro inferior a 2,5 µm, penetraron profundamente en el sistema respiratorio, mientras que los MPs, fragmentos plásticos menores a 5 mm, actuaron como portadores de contaminantes. La evidencia científica indicó que su combinación pudo incrementar riesgos respiratorios, cardiovasculares y oncológicos.

**Desarrollo:** estudios internacionales y locales reportaron concentraciones variables de PM<sub>2.5</sub>, desde valores bajos en Villavicencio y Tarapoto hasta niveles críticos en Shanghai, Nueva Delhi y urbes brasileñas, donde se superaron ampliamente las recomendaciones de la OMS, especialmente en invierno. Investigaciones como las de Zhu et al. y Abbasi identificaron MPs en fracciones de PM<sub>2.5</sub>, empleando técnicas como espectroscopia FTIR y microscopía electrónica de barrido (SEM/EDS). Se documentó que las fuentes principales incluyeron transporte, emisiones industriales, combustión doméstica y degradación de plásticos mayores. Factores meteorológicos como temperatura, humedad y velocidad del viento influyeron en la dispersión de las partículas. La variabilidad espacial y temporal evidenció la necesidad de sistemas de monitoreo integrados y precisos.

**Conclusiones:** la interacción entre PM<sub>2.5</sub> y MPs generó un escenario de riesgo ambiental complejo, requiriendo políticas públicas para reducir emisiones y regular el uso de plásticos. Los avances metodológicos mejoraron la detección, aunque persistieron limitaciones para comprender sus efectos crónicos. La evidencia respaldó que la acción temprana y coordinada fue clave para mitigar impactos sobre la salud y el ambiente.

**Palabras clave:** PM<sub>2.5</sub>; Microplásticos; Salud Pública; Contaminación Atmosférica; Monitoreo Ambiental.

## INTRODUCCIÓN

La contaminación atmosférica por material particulado fino (PM<sub>2.5</sub>) se ha convertido en uno de los problemas ambientales y de salud pública más relevantes a nivel mundial. Las partículas PM<sub>2.5</sub>, con un diámetro inferior a 2,5 micrómetros, pueden penetrar profundamente en el sistema respiratorio, llegando a los alvéolos pulmonares y generando efectos adversos que incluyen enfermedades respiratorias, cardiovasculares y cáncer de pulmón. La Organización Mundial de la Salud (OMS) considera la contaminación del aire una de las diez principales amenazas para la salud global, estimando que la contaminación por PM<sub>2.5</sub> es responsable del 62 % de las muertes atribuibles a la mala calidad del aire y de una importante pérdida de años de vida ajustados por discapacidad (AVAD).<sup>(1)</sup>

Diversos estudios han documentado la presencia y variabilidad de PM<sub>2.5</sub> en diferentes regiones. En ciudades como Villavicencio (Colombia) o Tarapoto (Perú), los niveles medidos se han mantenido por debajo de los estándares nacionales, aunque con variaciones influenciadas por factores meteorológicos como temperatura, humedad y velocidad del viento. En contraste, investigaciones en megaciudades de China, India y Brasil han evidenciado concentraciones que superan ampliamente las recomendaciones de la OMS, especialmente durante el invierno, revelando picos diarios asociados a patrones de movilidad y emisiones industriales.<sup>(2)</sup>

Además, en años recientes ha surgido una creciente preocupación por la interacción entre PM<sub>2.5</sub> y microplásticos (MPs). Estos últimos, definidos como fragmentos de plástico menores a 5 mm, provienen tanto de fuentes primarias (microesferas y pellets industriales) como secundarias (fragmentación de objetos mayores) y se han encontrado en diversos ambientes, incluyendo el aire. Estudios con técnicas avanzadas como espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) y microscopía electrónica de barrido (SEM) han detectado partículas plásticas de tamaños comparables a PM<sub>2.5</sub> en ambientes urbanos e interiores, lo que sugiere un potencial riesgo adicional para la salud humana debido a su capacidad para transportar contaminantes químicos y biológicos.<sup>(3)</sup>

La identificación y caracterización de PM<sub>2.5</sub> y MPs requiere métodos analíticos precisos y estandarizados, como el muestreo gravimétrico, el uso de separadores selectivos tipo WINS o VSCC, y el análisis de composición mediante FTIR y SEM/EDS. La complejidad de estas partículas y su diversidad de orígenes dificulta la evaluación del riesgo ecológico y sanitario, pero la evidencia disponible subraya la necesidad de fortalecer los programas de monitoreo y control.<sup>(4)</sup>

En este contexto, el presente trabajo aborda la problemática del PM<sub>2.5</sub> y su relación con los microplásticos, integrando estudios de caso internacionales y locales, así como los avances metodológicos en su detección y caracterización, con el fin de aportar información que respalde políticas públicas y estrategias de mitigación orientadas a proteger la salud y el ambiente.

## DESARROLLO

Un autor estudió la concentración y los impactos ocasionados por partículas suspendidas (PM<sub>2.5</sub>) en la ciudad de Villavicencio-Colombia, octubre 2018, en tres lugares de la ciudad usando tres medidores distintos (A, B, C), encontrando una concentración máxima de 30,11 µg/m<sup>3</sup>. Lo cual fue inferior al estándar nacional para 24 horas (37 µg/m<sup>3</sup>).

Un estudio colectó muestras de PM<sub>2.5</sub> en 5 mega ciudades del norte y sureste de China, (Beijing, Tianjin, Shanghái, Nanjing, Hangzhou), de agosto a setiembre del año 2019, usando un muestreador inteligente de partículas suspendidas totales de flujo medio con una tasa de flujo de entrada de promedio de 100 L/min, y demostró que la ciudad de Shanghái está más contaminada de PM<sub>2.5</sub> con una concentración de 56 µg/m<sup>3</sup>, además aplicó el análisis de espectroscopia FTIR para identificar partículas plásticas y no plásticas presentes en los filtros, el detector fue operado en el 675-4000 cm rango de onda, con un tiempo de recolección de 3 s e integración de 16 escaneos a una resolución de 8 cm se logró encontrar la presencia de partículas plásticas.<sup>(5)</sup>

Un estudio recolectó polvo en suspensión diariamente durante 5 días en la ciudad de Asaluyeh, Irán en un año usando un dispositivo muestreador de bajo volumen y un filtro modificador con tubo de entrada y un cabezal de muestreo; para investigar la presencia de micro plásticos, caracterizados mediante microscopias de fluorescencia, luz polarizada, SEM para cuantificarlos y clasificarlos; los resultados revelaron 2 lugares con partículas fibrosas de 2 µm a 100 µm, demostrando que los microplásticos si general daños a la salud, pero sus funciones precisas siguen sin ser claras y requieren más estudios.<sup>(6)</sup>

Siciliano et al.<sup>(1)</sup> en su artículo menciona a los patrones de calidad de aire en Brasil según la OMS, demostrando que en los estudios que realizaron encontró evidencias de que al monitorear las condiciones del aire de PM<sub>2.5</sub> en Brasil los resultados muestran que en el punto 1 tiene valor máximo de 60mg/m<sup>3</sup> evaluados en 24 horas, valor que sobrepasa según lo establecido por la OMS con valor de 10 y 25 ug/m<sup>3</sup>, considerando que el punto 1 no cumple con los medios de protección y bienestar poblacional.

En un artículo se presenta el análisis de variabilidad, tendencia y superación de PM<sub>2.5</sub> medido en la Embajada y el Consulado de EE. UU. en cinco megaciudades indias (Chennai, Kolkata, Hyderabad, Mumbai y Nueva Delhi) en los años (2014-2019), de todas las ciudades Delhi es la ciudad más contaminada, seguida de Kolkata, Mumbai, Hyderabad y Chennai, los resultados muestran diferentes variaciones diurnas, estacionales y mensuales en las cinco ciudades debido a las diferentes ubicaciones de los sitios y el clima local, todas las ciudades muestran concentraciones más alto y más bajo en los meses de invierno y monzón, respectivamente, a excepción de Chennai, que vio los niveles más bajos en abril. Todas las ciudades muestran consistentemente picos matutinos (~08:00–10:00 h) y el nivel más bajo al final de la tarde (~15:00–16:00.), concluye que los niveles de PM<sub>2.5</sub> en las ciudades superan los estándares de la OMS y los NAAQS indios en un 50 % y 33 % de días al año.<sup>(7)</sup>

En una investigación evaluaron el índice de calidad del aire (ICA) donde lo clasificaron en diferentes grupos, para predecir el AQI en la ciudad de Chennai, recopilaron un conjunto de datos donde luego lo procesaron para ser reemplazados. El mecanismo de aprendizaje profundo que utilizaron predijo con precisión los valores AQI y ayudaron a planificar el desarrollo de la ciudad metropolitana sostenible, el valor AQI esperado puede controlar el nivel de contaminación incorporando la coordinación de señales de transporte público, animando a la gente a usar el transporte público y plantando más árboles en algunos lugares.<sup>(8)</sup>

Un estudio tuvo como propósito evaluar el índice de calidad del aire en la ciudad de Kerman en diferentes temporadas en el

año 2015, los datos obtenidos respecto al PM<sub>2.5</sub> en la temporada de primavera los datos demostraron que los días 33 y 9 de la primavera tuvo condiciones desfavorables en relación a los contaminantes PM<sub>2.5</sub> es por ello que el contaminante responsable de la contaminación del aire en Kerman fue PM<sub>2.5</sub>, al comparar el ICA en temporadas diferentes del 2015 indican que tiene un índice de calidad del aire deseable.

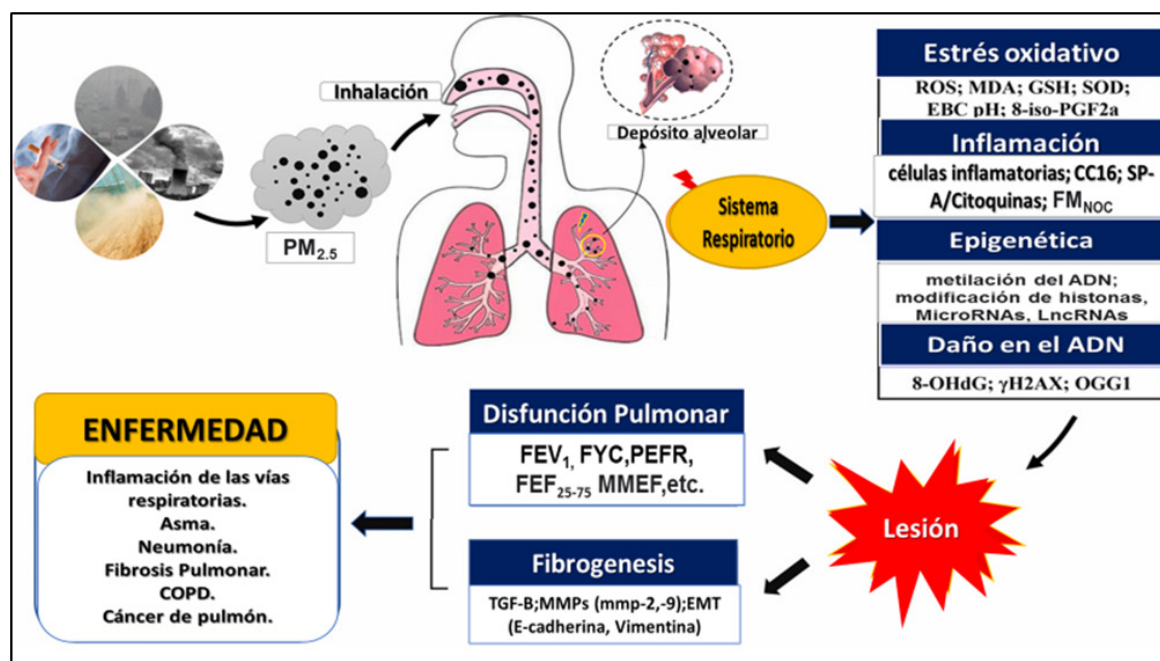
En un artículo menciona que el deterioro del aire se ha convertido en una amenaza seria, provocando efectos adversos en la salud y millones de muertes prematuras en China, su investigación tuvo como objetivo examinar las características espacio-temporales de la calidad del aire ambiente en cinco provincias evaluaron PM<sub>2.5</sub> el cual Superó los estándares de Grado II de los Estándares de calidad del aire ambiental de China (CAAQS), así como las directrices de calidad del aire recomendadas por la OMS Además, el índice de calidad del aire promedio (ICA), calculado a partir de datos terrestres, mejoró en 21,3 %, la proporción de calidad del aire Clase I (0-50) mejoró en un 114,1 %, y el número de días de contaminación disminuyó un 61,8 % en NWC. Todos los contaminantes (excepto el ozono) AQI y relaciones PM<sub>2.5</sub> mostraron los niveles más altos de contaminación en invierno y los más bajos en verano. El AQI se correlacionó positivamente con de PM<sub>2.5</sub> mientras que se correlacionó negativamente, PM<sub>2.5</sub>, con distintas variaciones temporales y temporales. la proporción de días con PM<sub>2.5</sub>, los contaminantes primarios disminuyeron.<sup>(9,10)</sup>

Teoría de partículas suspendidas PM<sub>2.5</sub>. Las partículas en suspensión (PM) se clasifica comúnmente como PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>0.1</sub>, que son PM menos de 10, 2,5 y 0,1  $\mu\text{m}$  en diámetro, respectivamente; el PM atmosférico con diámetro menor a 2,5  $\mu\text{m}$  (PM<sub>2.5</sub>) es un contaminante del aire de especial preocupación y, según una revisión reciente.

La polución del aire es una de las 10 amenazas importantes de salud mundial. La exposición a partículas materia (PM) se asocia con la carga mundial de enfermedades y mortalidad no accidental. Un número creciente de estudios sugieren que PM puede inducir enfermedades respiratorias, pulmonares cáncer y eventos cardiovasculares.

Entre estos, la contaminación ambiental por PM<sub>2.5</sub> representa el 62 % de todas las muertes atribuibles a la contaminación del aire y el 55 % de años de vida ceñidos por discapacidad (AVAD) perdidos, es decir, 4,14 (intervalo de incertidumbre [UI] del 95 %: 2,50–3,36) millones de muertes y 118 (95 % IU: 95,9–138) millones de AVAD. El estudio Global Burden of Disease (GBD) revela que la contaminación ambiental por PM ha aumentado del puesto 13 (1990) al puesto 7 (2019), principal factor de riesgo de AVAD atribuibles a nivel mundial. El costo global de las afecciones en la salud atribuibles a la contaminación ambiental por PM<sub>2.5</sub> aumentó a 3552 mil millones en 2013. Se señaló que la exposición a PM<sub>2.5</sub> afecta la función pulmonar.<sup>(11)</sup>

La evidencia experimental acumulada ha demostrado que PM<sub>2.5</sub> puede inhalarse fácilmente y depositarse en la tráquea, los bronquios e incluso los alvéolos, lo que produce efectos adversos en el sistema y la función respiratorios. Un estudio in vivo reciente encontró que la exposición a PM<sub>2.5</sub> aumentaría la susceptibilidad pulmonar, a pesar de una recuperación gradual de la lesión pulmonar después del cese de la exposición a PM<sub>2.5</sub>. Ante lo expuesto, es bien sabido que las partículas que ingresan por la nariz o la boca y se asientan en el tracto respiratorio superior son inhaladas ( $\leq 10 \mu\text{m}$ ), y las partículas que pueden acumularse y depositarse en los pulmones se conocen como partículas respirables. ( $\leq 2,5 \mu\text{m}$ ).<sup>(2)</sup>



**Figura 1.** Efecto del PM 2.5 en la salud del ser humano

Características de PM 2.5. Las fuentes de PM 2.5, imponen un riesgo para la salud por los efectos combinados del deterioro del aire ambiental (exterior) y doméstica (interior) y puede originarse como resultado de actividades antropogénicas o naturales, ya que en áreas urbanas, son los vehículos, con escape de diésel, las principales fuentes seguidas de la propagación de energía, sistemas de calefacción de edificios, emisiones industriales y combustión doméstica, también destaca la cocina, la calefacción y la Re suspensión de partículas, estos se producen por quema de combustibles como carbón y madera en ambientes que no corresponde.<sup>(12)</sup>

Función de los Equipos de colecta para Material Particulado (PQ200) -(MICRO VOL 1100). El Método de Referencia para el recaudo de material en suspensión, es la Gravimetría, este método fue patrocinado por el Decreto Supremo N° 10-2019-MINAM (2019).

En el caso de material particulado de menos de 2,5 micrómetros (PM2.5). Se necesita un mecanismo para registrar la frecuencia de muestreo (mecánico o digital) para verificar su estabilidad durante el tiempo de observación. En este caso, el caudal de muestreo sólo puede establecerse en el rango de baja capacitancia (10,44 l/min = 1 m<sup>3</sup>/h). El sistema de separación de partículas en un muestreador de bajo volumen para PM2.5 presenta dos etapas:

En la primera etapa, Intenta seleccionar partículas de menos de 10 micras de tamaño. La entrada selectiva al muestreador difiere del alto cabezal de flujo en el tamaño y número de toberas. Esto se debe al menor flujo de gas conectado a la muestra recolectada. (10,44 l/min). En la segunda etapa, Las partículas de hasta 2,5 micras de tamaño son transportadas a separadores selectivos de PM2.5 tipo WINS (Well Impactor Ninety-Six) o VSCC (Very Sharp Cut Cyclone), y las partículas pequeñas mayores de 2,5 micras son separadas y luego capturadas con un filtro de muestreo.<sup>(13)</sup>

Estación Meteorológica, lugar donde se realiza específicamente observaciones y mediciones de diferentes condiciones meteorológicas empleando equipos y herramientas apropiadas para establecer las características atmosféricas en diferentes regiones del territorio (Manual Técnico: MT-DRD-001 – SENAMHI).<sup>(14)</sup>

La generación de plástico se ha incrementado considerablemente en los últimos 70 años, y se puede decir que vivimos en un mundo de plástico. El aumento de la producción también conduce a un aumento de los desechos plásticos que, lamentablemente, promueve el acopio generalizado de plástico en el ambiente. Los plásticos se clasifican como macroplásticos (>25 mm), mesoplásticos (5–25 mm), microplásticos (0,1 mm).

Respecto a estudios realizados en Tarapoto para investigar la presencia de material particulado (PM2.5), un estudio, midió el PM2.5 en 3 ciudades del Perú (Tarapoto, Lima y Juliaca), demostrando que la ciudad de Tarapoto concentra 30,91 µg/m<sup>3</sup> de PM2.5, Juliaca una concentración de 19,80 µg/m<sup>3</sup> y Lima con valor de 14,58 µg/m<sup>3</sup>, valores que no superarían el (ECA) que es de (50 µg.m<sup>3</sup>); mientras que un estudio, evaluó la condición del aire en la ciudad de Tarapoto y la relación con temperatura, la humedad relativa y velocidad del viento, los datos exportaron al software COMET y determinado una concentración de 11 ug/m<sup>3</sup> para PM2.5 combinado con 23,3 °C de temperatura y humedad relativa de 23 %, muestra la relación entre el material particulado y las variables meteorológicas, pero esta relación no es importante a excepción del PM2.5, que tiene una velocidad del viento. Es decir, a mayor velocidad de este, menor concentración de partículas suspendidas y viceversa.<sup>(15)</sup>

En este caso en el distrito de Morales las concentraciones de Material Particulado PM2.5 sobrepasan los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) en los sitio de muestreo, determinando altos niveles de concentración por contaminantes atmosféricos, que a su vez han sido influenciados con las condiciones meteorológicas (temperatura, humedad relativa, velocidad del viento).<sup>(16)</sup>

Los PM han sido ampliamente reconocidos como un contaminante emergente universal en el medio ambiente terrestre y acuático.

Teoría de Microplásticos. Los microplásticos se definen más comúnmente como partículas de plástico >1 µm y <5 o 1 mm a lo largo de su dimensión más grande. Usaremos la definición de <5 mm para nuestra consideración de microplásticos, ya que esto incluirá gran parte de la literatura. El número de publicaciones revisadas por pares sobre microplásticos ha aumentado rápidamente durante la última década, con estudios que encuentran microplásticos en casi todos los sistemas ambientales, así como en alimentos y bebidas para humanos. Sin embargo, las implicaciones de los microplásticos en el medio ambiente no están claras, y algunos estudios sugieren impactos negativos en los organismos, como tasas de crecimiento más bajas, niveles más altos de contaminantes y deformidades, mientras que otros encuentran resultados neutrales. Los tipos más comunes de MP son el polietileno de alta densidad (HDPE), el polietileno de baja densidad (LDPE), el tereftalato de polietileno (PET), el polipropileno (PP), el poliestireno (PS), el cloruro de polivinilo (PVC) y la poliamida (PA.). Los MP se encuentran en una variedad de ambientes, incluidos los ambientes acuáticos, la atmósfera, el suelo y los productos alimenticios.<sup>(17)</sup>

La degradación del plástico varía según la composición química, incluidos los aditivos utilizados durante la producción; por ejemplo, una bolsa de plástico HDPE tarda entre 10 y 20 años en descomponerse, mientras que una botella de PET tarda entre 450 y 1000 años. Además, el uso de productos cotidianos que contienen MP, como cosméticos y ropa (fabricados con fibras de poliéster y poliamida), es una fuente de liberación de estos materiales al medio ambiente. La producción en masa de plásticos comenzó hace unos 70 años y se espera que en los próximos 20 años se duplique.<sup>(18)</sup>

Esta variabilidad informada destaca la naturaleza de los microplásticos como un conjunto diverso de contaminantes, con una gama de polímeros, tamaños de partículas, colores, morfologías y contaminantes asociados. Junto con el hecho de que los microplásticos a menudo se encuentran en concentraciones irregulares con mezclas complejas de tipos de partículas, actualmente es difícil determinar el riesgo ecológico que presentan los microplásticos en el medio ambiente.<sup>(19)</sup>

Con una generación mundial de plástico de 400 millones de Tn por año para 2025, es probable que 11 mil millones de toneladas métricas de plásticos se acumulen en el entorno. En cinco décadas, la producción de plástico se ha convertido en una industria global de 600 mil millones de dólares. Es probable que alrededor del 60 % de los plásticos fabricados a nivel mundial ya se hayan acumulado en el medio ambiente (El PNUMA venció la contaminación plástica Solo se recicla el 9 % de los residuos plásticos (solo en países desarrollados), y el 91 % restante permanece en el medio ambiente durante siglos.<sup>(20)</sup>

Clasificación de Microplásticos (MP). Los microplásticos primarios se fabrican para ser <5mm de tamaño mínimo. Incluyen gránulos de preproducción utilizados para fabricar productos plásticos y microesferas utilizadas como abrasivos para fines industriales o en productos de cuidado personal. Los microplásticos secundarios son fragmentos pequeños de plástico no producidos intencionalmente, sino que son el resultado de la ruptura y fragmentación de artículos de plástico más grandes a través de procesos biológicos, físicos y químicos. Se pueden formar microplásticos secundarios durante el uso del producto (p. ej., microfibras que se

despegan de las prendas durante el lavado o partículas de desgaste de los neumáticos).

Exposición humana a los microplásticos. Los humanos están expuestos a MP en ambientes por medio de ingesta (p. ej., introduciendo MP en el aire a la boca o comiendo mariscos), el contacto dérmico o las vías de inhalación y los consiguientes impactos adversos para la salud son las mayores preocupaciones mundiales. Sin embargo, faltan estudios empíricos sobre la exposición humana a MP. Se reporta la presencia de partículas plásticas fibrosas en el aire en ambientes urbanos y se indicó que los materiales fibrosos son generalmente más abundantes en interiores, pero su tamaño es menor. Sobre la base de las concentraciones medianas de MP y microgomas en polvo de calles de la jurisdicción de Asaluyeh.<sup>(21)</sup>

Microplásticos en el aire y exposición humana. A pesar de su omnipresencia en todos los aspectos de la vida y la ecología, se sabe poco sobre las consecuencias para la salud de la exposición a MP en humanos. Si bien se estudió la distribución de MP en sistemas acuáticos, también se encontró la presencia de partículas de plástico en el aire, por ejemplo, en el polvo y el aire de la calle y en la lluvia radiactiva atmosférica. Los PM que ingresan por la nariz o la boca pueden alojarse en vías respiratorias superiores que pueden inhalarse, pero las sustancias que pueden llegar a la a lo más profundo del pulmón. La deposición en las vías respiratorias es en función del tamaño y en el área respiratoria, la deposición cae por encima de los 5 mm de diámetro.<sup>(22)</sup>

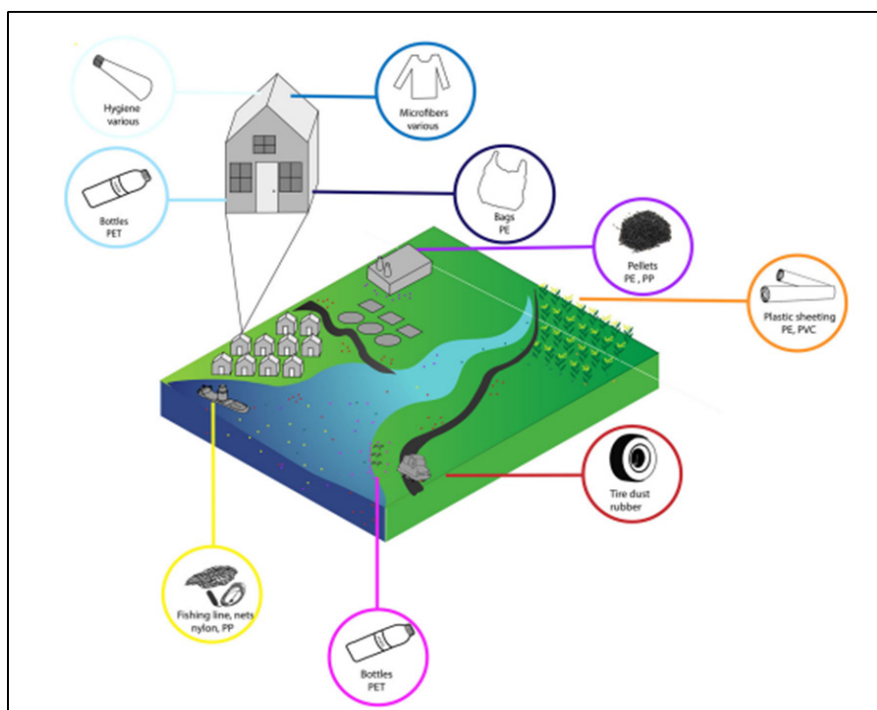
Fuente de microplásticos. Los microplásticos ingresan al medio ambiente a través de varias fuentes y vías. Debido a que los microplásticos son pequeños y, a menudo, los restos desgastados de su producto original, puede ser difícil rastrearlos hasta su origen.<sup>(23)</sup>

La relación entre microplásticos y PM2.5. Se han publicado pocos estudios sobre las características o la distribución de los microplásticos en el aire en partículas con tamaños menores a 2,5 µm o 10 µm (PM2.5/PM10), las tasas de deposición de microplásticos en el aire varían según la elevación atmosférica. Los microplásticos transportados por el aire tienen un mayor movimiento que los encontrados en los sedimentos o el agua.

Los principales plásticos sintéticos muy utilizados en la vida cotidiana son el polietileno (PE), el polipropileno (PP), el poliestireno (PS), el tereftalato de polietileno (PET) y el cloruro de polivinilo (PVC), que penetran en el medio ambiente. A través de reacciones fotoquímicas bajo la irradiación de la luz solar, los microplásticos transportados por el aire podrían descomponerse y liberar esos aditivos químicos y otros, como los monómeros, que pueden afectar negativamente la salud humana.

Las partículas (PM2.5) y los microplásticos podrían actuar como portadores de hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH) que pueden aumentar el riesgo potencial de cáncer. Por lo tanto, las investigaciones de distribución, de microplásticos en el aire, también podrían proporcionar información importante para las evaluaciones de riesgos humanos y ecológicos.

Un estudio exploró las distribuciones, composiciones y morfología de los microplásticos presentes en el aire de interiores y ambiente en Nueva Jersey, Estados Unidos, las fibras microplásticas, pedazos y películas de Poliestireno (PS), Polietileno tereftalato (PET), Policloruro de vinilo (PVC), Polietileno (PE), y Polipropileno (PP) fueron identificados en oficina, pasillo, salón de clases y vivienda unifamiliar de este estudio, encontraron tasas de deposición de fibras sintéticas con una longitud de 35 µm a 1000 µm fueron más altas en la vivienda unifamiliar  $((1,96 \pm 1,09) \times 104 \text{ fibras/m}^2/\text{día})$  y más bajas en el aula  $((6,20 \pm 0,57) \times 103 \text{ fibras/m}^2/\text{día})$  os microplásticos con texturas similares pero diferentes tamaños se identificaron tanto en la deposición atmosférica total como en las muestras de partículas (PM2.5 y PM10), Estos resultados revelan las propiedades de los microplásticos transportados por el aire en entornos urbanos que son importantes para comprender su destino, transporte y riesgos potenciales para la salud.



**Figura 2.** Diversas fuentes de contaminación por Microplásticos

Un estudio investigo en Sambalpur, una de las ciudades más importantes de las regiones occidentales del estado de Odisha, en el este de la India, se previó un trabajo para medir los gases y partículas contaminantes y calcular el índice de contaminación del aire (API) en cuatro estaciones de muestreo representativas (Budharaja, Modipara, Sakhipara y Kacheri) basado en las directrices de la Junta Central de Control de la Contaminación (CPCB), Nueva Delhi. Los resultados de las partículas PM<sub>2.5</sub> de 36,38 a 64,00 µg / m<sup>3</sup> se evidencio están por encima del límite permisible anual fijado por el CPCB. La meteorología y la rosa de los vientos jugaron un papel en la dispersión y dilución de los contaminantes, además de verse favorecidos por la topografía y las actividades antrópicas de la zona en donde la temperatura media del aire más alta se registró en el mes de abril (26,4 °C) y mayo de (26,2 °C) y la más baja fue de (21,5 °C) Una correlación positiva significativa entre la temperatura y la velocidad del viento en nuestro análisis refuerza este hecho ( $r=+0,338$ ,  $p<0,05$ ). La calidad del aire del área osciló de una contaminación atmosférica ligera a una contaminación atmosférica moderada, que se atribuye principalmente a las partículas (PM<sub>2.5</sub>).<sup>(24)</sup>

Los principales métodos para determinar el tipo de los microplásticos están construyendo los números de onda característicos de microplásticos y datos espectrales combinados con aprendizaje automático. Desafortunadamente, los microplásticos tienen fuerte capacidad de adsorción y acumulación por su gran capacidad específica área de superficie, que proporciona un sitio de contacto rico para otras sustancias tóxicas, como aditivos, elementos de metales pesados, contaminantes orgánicos y plastificantes.<sup>(25)</sup>

En la actualidad, como un contaminante ambiental de último modelo, los microplásticos han atraído gradualmente la atención académica global.

El método de inspección visual podría seleccionar, clasificar microplásticos y observar el color y el tamaño del objeto probado con un microscopio o a simple vista.

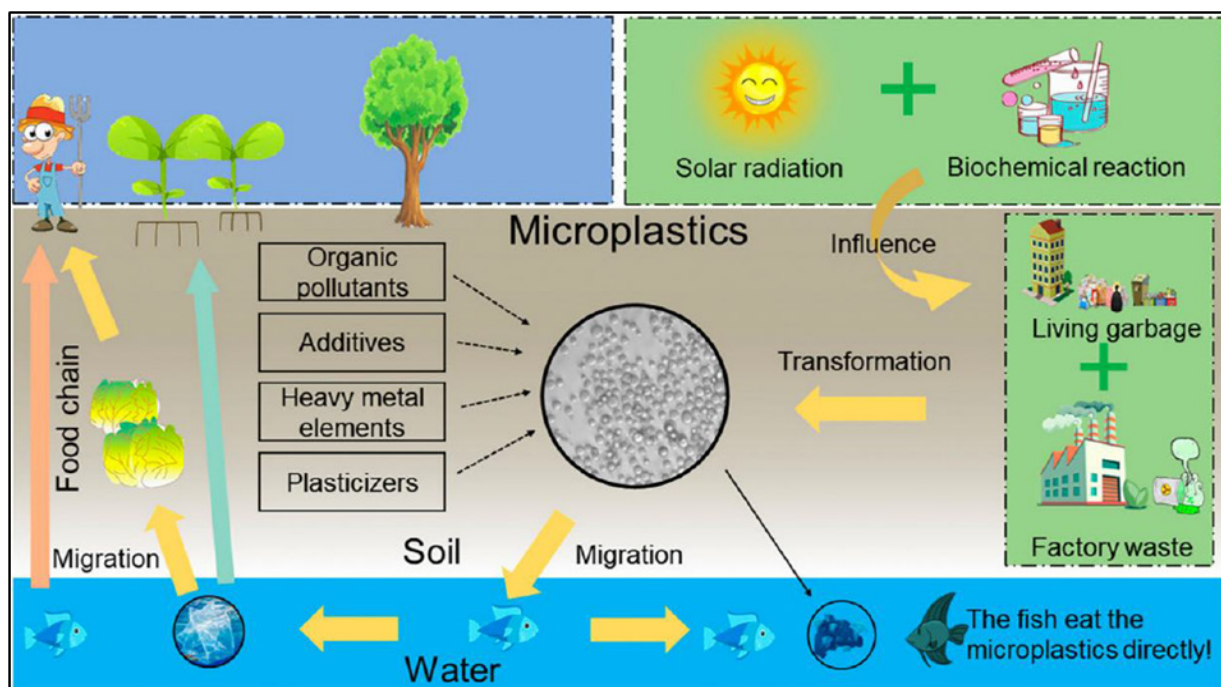


Figura 3. El origen, la migración y los daños de los microplásticos

Entre los métodos de caracterización de los PM<sub>2.5</sub> se encuentran: SEM – FTIR, esto permite conocer las posibles partículas inorgánicas y orgánicas.

| Estabilidad y reactividad             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|---------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Estabilidad química                   | Estable a temperaturas y condiciones de almacenamiento normales                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Incompatibilidad con otros materiales | Ninguno razonablemente previsible                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Descomposición                        | Se descompone con el calor<br>Temperatura de descomposición: >250 °C (>482 °F)<br>Durante la combustión se pueden formar productos de descomposición peligrosos, incluidos dióxido de carbono, monóxido de carbono, fluoruro de hidrógeno, gases tóxicos o partículas. Estos productos pueden causar irritación grave en los ojos, la nariz, la garganta y los pulmones o efectos tóxicos.<br>Se descompone cuando se expone a la luz ultravioleta |
| Polimerización                        | La polimerización no ocurrirá                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |

Figura 4. Estabilidad y reactividad

La espectroscopia FTIR se ocupa de la medición de la radiación infrarroja (IR) absorbida por la muestra MP, permite estudiar la composición molecular, el espectro infrarrojo simboliza en una muestra la huella digital (MP) con un pico de absorción que

corresponde a la frecuencia vibratoria entre los enlaces de los átomos que componen el material.<sup>(26)</sup> Debido a que cada material polimérico diferente es una única combinación de átomos, los dos compuestos no producen exactamente el mismo espectro infrarrojo por lo tanto, la estructura química de una molécula de polímero se puede determinar mediante FTIR.<sup>(27,28)</sup>

Según a la empresa HengTong Fluorine, el Perfluorododecyl iodide tiene como nombre químico “Iodopentacosafuorododecane” y nos describe lo siguiente, que el plástico encontrado no tiene compatibilidad alguna con otros materiales similares.<sup>(29,30)</sup>

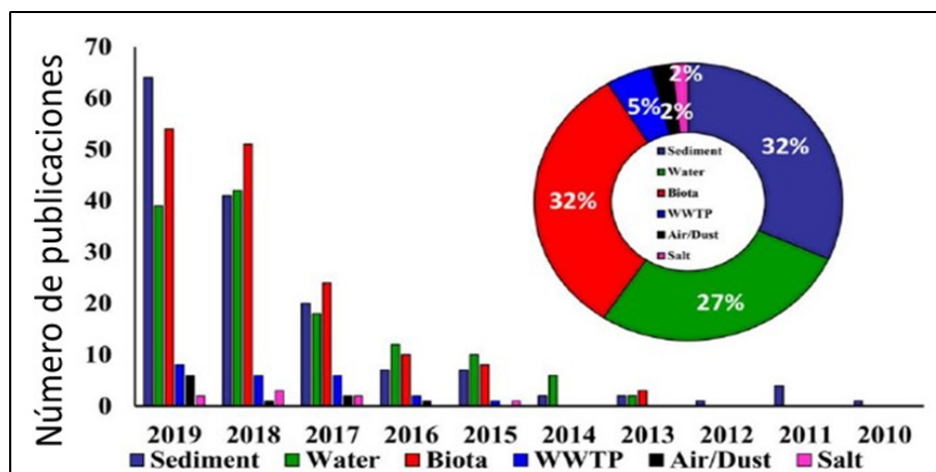


Figura 5. Resultados de literatura usando FTIR

Los artículos publicados se clasificaron en varias matrices ambientales (sedimento, agua, plantas de tratamiento de aguas residuales, biota, polvo/aire, y sal).

### La microscopía electrónica de barrido (SEM)

La microscopía electrónica de barrido (SEM), que además se examina como análisis SEM o técnica SEM, se ha utilizado a escala global en muchos campos de estudios, este método es muy eficaz en los estudios de compuestos materiales orgánicos e inorgánicos en un nivel de nanómetro a micrómetro. El SEM trabaja con un alto aumento que logra los 300000x e incluso un 1000000 x para mostrar imágenes con mucha precisión de una amplia gama de materiales, la espectroscopia de rayos X de dispersión de energía (EDS) funciona junto con el SEM para identificar resultados cualitativos y semicuantitativos estas técnicas, juntas, tienen el potencial de recopilar información fundamental sobre la composición del material de las muestras escaneadas, que no podrían proporcionar las pruebas de laboratorio comunes.<sup>(31,32)</sup>

Variables meteorológicas. La temperatura es una variable del movimiento de partículas del medio. Un cuerpo depende de la velocidad de movimiento de las partículas que lo conforman, o de la frecuencia de vibración, según. Es la concordancia entre la presión de vapor de equilibrio del agua a una determinada temperatura y presión parcial del vapor de agua. La humedad relativa obedece a la presión del sistema y la temperatura. Esta es la cantidad básica de aire que generalmente es causada por el movimiento de alta presión o baja presión del aire debido a los cambios de temperatura.<sup>(33)</sup>

| Parámetros                                                                | Periodo  | Valor [ug/m <sup>3</sup> ] | Criterios de evaluación  | Método de Análisis                           |
|---------------------------------------------------------------------------|----------|----------------------------|--------------------------|----------------------------------------------|
| Material Particulado con Diámetro menor a 2.5 micras (PM <sub>2.5</sub> ) | 24 horas | 50                         | NE más de 7 veces al año | Separación inercial/filtración (Gravimetría) |
|                                                                           | Anual    | 25                         | Media aritmética anual   |                                              |

Figura 6. Parámetros de Estándares de Calidad Ambiental

Estándares de Calidad del Aire (ECA), representa medidas que establece concentraciones o niveles de sustancias elementos, parámetros fisicoquímicos o biológicos presentes en el aire, suelo o agua en su estado receptivo sin riesgo potencial en la salud humana o ambiental (Numeral 31.1 del artículo 31 de la Ley General del Ambiente N° 28611).

Índice de Calidad del Aire - INCA. Son categorías que tienen un óptimo valor que comprende entre 0 y 100 y concuerda con los cumplimientos del ECA de aire, se dividen en 4.<sup>(34,35)</sup> Cuando la es buena la calidad del aire mostrará color verde y sin riesgo alguno

al ser respirada, amarillo indica que la calidad del aire es moderada, mientras que el color naranja señala mala calidad del aire y dañina para la salud, el color rojo advierte que la calidad del aire supera los valores del contaminante y puede ser mortal (RM-Nº-181-2016-MINAM).

| Valor del Índice | Calidad del Aire | Color    |
|------------------|------------------|----------|
| 0-50             | Buena            | Verde    |
| 51- 100          | Admisible        | Amarillo |
| 101 – 150        | Mala             | Rojo     |
| >150             | Muy mala         | Marrón   |

Figura 7. Valores del Índice de la Calidad del Aire

| CALIFICACIÓN             | CUIDADOS                                                                                                                                                                                                             | RECOMENDACIONES                                                                                                                                              |
|--------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Buena</b>             | La calidad del aire es buena y no representa daño alguno para la salud.                                                                                                                                              | La calidad del aire es tolerable y cumple con el ECA de aire. Se puede realizar actividades en el exterior.                                                  |
| <b>Moderada</b>          | Las poblaciones vulnerables (niños, ancianos, mujeres embarazadas, personas con enfermedades respiratorias y cardiovasculares crónicas) pueden experimentar ciertos problemas de salud.                              | La calidad del aire es pasable y cumple con la ECA de aire. Se pueden practicar actividades al aire libre con ciertas restricciones para personas sensibles. |
| <b>Mala</b>              | Las personas sensibles pueden experimentar problemas de salud. El público en general puede verse afectado.                                                                                                           | Esperar el informe de calidad del aire. Evite las actividades al aire libre.                                                                                 |
| <b>Umbral de Cuidado</b> | Las concentraciones de contaminantes afectan la salud de todos y pueden tener serias implicaciones para poblaciones vulnerables como niños, ancianos, mujeres embarazadas y personas con enfermedades respiratorias. | Avisar a la Autoridad de Salud para que denomine los niveles de estados de alerta con respecto al DS N° 012-2005-SA.                                         |

Figura 8. Cuidados y recomendaciones del Índice de la calidad del aire (INCA)

| Material Particulado (PM <sub>2.5</sub> ) promedio 24 horas |                                                   |                                                       |
|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| Intervalo del INCA                                          | Intervalo de concentraciones (ug/m <sup>3</sup> ) | Ecuación                                              |
| 0 – 50                                                      | 0 – 12.5                                          | $1(\text{PM}_{2.5}) = [\text{PM}_{2.5}] \cdot 100/25$ |
| 51 – 100                                                    | 12.6 – 25                                         |                                                       |
| 101 – 500                                                   | 25.1 – 125                                        |                                                       |
| >500                                                        | >125                                              |                                                       |

Figura 9. Cálculo del Índice de calidad del aire (INCA)

Valores propuestos por la OMS. Según la OMS, aproximadamente el 58 % de las muertes tempranas afines en relación con el deterioro del aire en 2016 correspondieron a isquemia miocárdica y accidente cerebrovascular, y el 18 % de los decesos correspondieron a males del pulmón obstructiva crónica e infecciones agudas en la respiración y el 6 % de las muertes se deben al cáncer de pulmón (OMS página oficial).<sup>(36)</sup>

| <b>Valores Fijados por las Directrices<br/>Material Particulado Final (PM<sub>2.5</sub>)</b> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| 5 µg/m <sup>3</sup> de media anual                                                           |
| 15 µg/m <sup>3</sup> de media diaria                                                         |

**Figura 10.** Valores de las directrices de la OMS para la calidad del aire

| <b>Tabla 1.</b> Métodos analíticos para la caracterización de Material Particulado PM <sub>2.5</sub> |  |                                                                           |                                 |                                                                   |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|---------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| <b>Técnica</b>                                                                                       |  | <b>Propósito</b>                                                          | <b>Naturaleza de la Técnica</b> | <b>Referencia</b>                                                 |
| D.S N°10-2019-MINAM                                                                                  |  | Método de monitoreo para la concentración de Material Particulado         | Método Pasivo                   | Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire. |
| EPA 40 CFR Appendix L. (top art 50)                                                                  |  | Método de análisis para determinar Material Particulado PM <sub>2.5</sub> | Método Pasivo                   | Norma Técnica Peruana (NTP 900.069-2017)                          |

| <b>Tabla 2.</b> Métodos analíticos para la caracterización de Microplásticos (MPs)                                                                             |  |                                                                                                                              |                                                                             |                              |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| <b>Técnica</b>                                                                                                                                                 |  | <b>Propósito</b>                                                                                                             | <b>Naturaleza de la Técnica</b>                                             | <b>Referencia</b>            |
| Análisis termogravimétrico (TGA)                                                                                                                               |  | Determina la vía de degradación térmica de los microplásticos                                                                | Destructivo para muestra                                                    | Yu et al. (2019)             |
| Calorimetría diferencial de barrido (DSC)                                                                                                                      |  | Determina la fase endotérmica, transición, caracterización de fusión, cinética de reacción de microplásticos                 | Destructivo para muestra                                                    | Majewsky et al. (2016)       |
| Análisis termogravimétrico: proceso de extracción en fase sólida/ espectrometría de masas por cromatografía de gases con desorción térmica (TGA-SPE/TDS-GC-MS) |  | Permite la detección inequívoca y conveniente de los productos de descomposición característicos de los microplásticos       | Destructivo para muestra                                                    | Dumichen et al. (2015)       |
| Difracción de rayos X                                                                                                                                          |  | Análisis de grupos estructurales y funcionales, grado de cristalinidad                                                       | La destructividad depende del método de preparación de la muestra utilizado | Ariza-Tarazona et al. (2019) |
| Resonancia magnética nuclear (RMN)                                                                                                                             |  | Grupo estructural y funcional, análisis, identificación de la estructura exacta, fracciones químicas y estado conformacional | Preparación de muestra laboriosa no destructiva para muestra                | Peez et al. (2019)           |
| Microscopia electrónica de barrido/ espectroscopia de dispersión de energía (SEM/EDS)                                                                          |  | Caracterización de la estructura superficial y composición elemental en microplásticos                                       | Destructivo para muestra                                                    | Wang, Wagner y col (2017)    |
| Cromatografía de permeación en gel (GPC) con detección de fluorescencia (FLD)                                                                                  |  | Determinación selectiva semicuantitativa de microplásticos                                                                   | Preparación de muestra laboriosa destructiva para muestra                   | Biver et al. (2018)          |
| Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)                                                                                                   |  | Detectar contaminantes comunes presentes en ciertos elementos con la ayuda de la aplicación de la Interferometría            | Destructivo para muestra                                                    | Chialanza et al. (2018)      |

## CONCLUSIONES

En conclusión, la contaminación por material particulado fino (PM<sub>2.5</sub>) y microplásticos (MPs) representa un desafío creciente para la salud pública y el medio ambiente, dada su amplia distribución geográfica, diversidad de fuentes y complejidad en los procesos de detección y caracterización. Los estudios revisados demuestran que, aunque en algunas ciudades como Villavicencio o Tarapoto las concentraciones de PM<sub>2.5</sub> se mantienen por debajo de los límites nacionales, en otras, como Shanghái, Nueva Delhi o ciertas urbes brasileñas, los niveles superan ampliamente las recomendaciones de la OMS, especialmente en temporadas como invierno, coincidiendo con factores meteorológicos desfavorables y elevadas emisiones antrópicas.

La interacción entre PM<sub>2.5</sub> y microplásticos añade una dimensión adicional al problema, ya que estas partículas plásticas de tamaño similar pueden transportarse por el aire, actuar como vectores de contaminantes químicos y biológicos, y potencialmente

augmentar los riesgos de enfermedades respiratorias, cardiovasculares y cáncer. A pesar de que se ha avanzado en metodologías de identificación como la espectroscopia FTIR y la microscopía electrónica de barrido (SEM/EDS), aún existen limitaciones en la estandarización y en la comprensión completa de los impactos a largo plazo, particularmente en lo que respecta a la exposición crónica humana a MPs inhalables.

Las evidencias indican que las fuentes de PM<sub>2.5</sub> incluyen principalmente la combustión de combustibles fósiles, emisiones industriales, transporte y actividades domésticas, mientras que los microplásticos provienen tanto de procesos industriales directos como de la degradación de productos plásticos más grandes. Esta combinación de contaminantes en el aire genera un escenario complejo, ya que la presencia de MPs en fracciones PM<sub>2.5</sub> puede incrementar la capacidad de transporte de compuestos tóxicos como hidrocarburos aromáticos policíclicos, con consecuencias sanitarias potencialmente graves.

La variabilidad espacial y temporal en las concentraciones de PM<sub>2.5</sub> y MPs subraya la influencia de factores meteorológicos como temperatura, humedad y velocidad del viento, así como la necesidad de fortalecer los sistemas de monitoreo ambiental. Herramientas como el Índice de Calidad del Aire (ICA) resultan útiles para la comunicación de riesgos y la toma de decisiones, pero requieren integrarse con datos sobre microplásticos para ofrecer un panorama más completo.

Frente a este contexto, resulta imperativo implementar políticas públicas que reduzcan las emisiones de PM<sub>2.5</sub>, regulen el uso y disposición de plásticos, y promuevan la investigación interdisciplinaria sobre la interacción entre estos contaminantes. Asimismo, la inversión en tecnologías de detección precisas y accesibles permitirá mejorar la vigilancia y, con ello, desarrollar estrategias de mitigación que salvaguarden la salud humana y la integridad de los ecosistemas. La evidencia científica disponible respalda que la acción temprana y coordinada es clave para enfrentar este reto global.

## FINANCIACIÓN

Los autores no recibieron financiación para el desarrollo de la presente investigación.

## CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

## CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

*Conceptualización:* Rodrigo Dávid Colichón Carranza, Alexis Torres-del Aguila, Carlos Mauricio Lozano Carranza, Andi Lozano Chung.

*Curación de datos:* Rodrigo Dávid Colichón Carranza, Alexis Torres-del Aguila, Carlos Mauricio Lozano Carranza, Andi Lozano Chung.

*Análisis formal:* Rodrigo Dávid Colichón Carranza, Alexis Torres-del Aguila, Carlos Mauricio Lozano Carranza, Andi Lozano Chung.

*Redacción – borrador original:* Rodrigo Dávid Colichón Carranza, Alexis Torres-del Aguila, Carlos Mauricio Lozano Carranza, Andi Lozano Chung.

*Redacción – revisión y edición:* Rodrigo Dávid Colichón Carranza, Alexis Torres-del Aguila, Carlos Mauricio Lozano Carranza, Andi Lozano Chung.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Siciliano B, Carvalho G, Arbilla G. The updated Brazilian national air quality standards: a critical review. *J Braz Chem Soc*. 2020;31(3):523-35. doi:10.21577/0103-5053.20190212.
2. Liao Z, Ji X, Ma Y, Lv B, Huang W, Zhu X, et al. Airborne microplastics in indoor and outdoor environments of a coastal city in Eastern China. *J Hazard Mater*. 2021 Sep 5;417:126007. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126007>
3. Oroumihyeh F, Zhu Y. Brake and tire particles measured from on-road vehicles: Effects of vehicle mass and braking intensity. *Atmos Environ* (1994). 2021 Dec;12:100121. <https://doi.org/10.1016/j.aecoa.2021.100121>
4. Kelly FJ, Fussell JC. Toxicity of airborne particles—established evidence, knowledge gaps and emerging areas of importance. *Philos Trans A Math Phys Eng Sci*. 2020 Sep 28;378(2183):20190322. <https://doi.org/10.1098/rsta.2019.0322>
5. Evangelidou N, Grythe H, Klimont Z, Heyes C, Eckhardt S, Lopez-Aparicio S, et al. Atmospheric transport is a major pathway of microplastics to remote regions. *Nat Commun*. 2020 Jul 14;11:3381. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17201-9>
6. Provencher JF, Ammendolia J, Rochman CM, Mallory ML. Proceed with caution: The need to raise the publication bar for microplastics research. *Sci Total Environ*. 2020 Dec 15;748:141426. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141426>
7. Gasperi J, Wright SL, Dris R, Collard F, Mandin C, Guerrouache M, et al. Microplastics in air: Are we breathing it in?. *Curr Opin Environ Sci Health*. 2018 Feb;1:1–5. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2017.10.002>
8. Zhang Y, Kang S, Allen S, Allen D, Gao T, Sillanpää M. Atmospheric microplastics: A review on current status and

perspectives. *Earth Sci Rev.* 2020 Apr;203:103118. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103118>

9. Wright SL, Ulke J, Font A, Chan KL, Kelly FJ. Atmospheric microplastic deposition in an urban environment and an evaluation of transport. *Environ Int.* 2020 Mar;136:105411. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105411>

10. Prata JC, da Costa JP, Lopes I, Duarte AC, Rocha-Santos T. The importance of contamination control in airborne fibers and microplastic sampling: Experiences from indoor and outdoor air sampling in Aveiro, Portugal. *Mar Pollut Bull.* 2020 Oct;159:111522. doi:10.1016/j.marpolbul.2020.111522.

11. Gasperi J, Wright SL, Dris R, Collard F, Mandin C, Guerrouache M, et al. Microplastics in air: Are we breathing it in? *Curr Opin Environ Sci Health.* 2018 Feb;1:1-5. doi:10.1016/j.coesh.2017.10.002.

12. Beaupaire M, Dris R, Gasperi J, Tassin B. Microplastics in the atmospheric compartment: a comprehensive review on methods, results on their occurrence and determining factors. *Curr Opin Food Sci.* 2021 Oct;41:159-168. doi:10.1016/j.cofs.2021.04.010.

13. Daiber A, Kuntic M, Oelze M, Abou-El-Ardat K, Steven S, Schulz E, et al. Effects of air pollution particles (ultrafine and fine particulate matter) on mitochondrial function and oxidative stress – Implications for cardiovascular and neurodegenerative diseases. *Arch Biochem Biophys.* 2020 Dec 15;696:108662. doi:10.1016/j.abb.2020.108662.

14. Prata JC. Airborne microplastics: Consequences to human health? *Environ Pollut.* 2018 Mar;234:115-126. doi:10.1016/j.envpol.2017.11.043.

15. Fan C, Wu H, Zeng G, Li H, Zhou Y, Wang Z, et al. Microplastic constituent identification from admixtures by Fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy: The use of polyethylene terephthalate (PET), polyethylene (PE), polypropylene (PP), polyvinyl chloride (PVC) and nylon (NY) as the model constituents. *Environ Technol Innov.* 2021 Aug;23:101798. doi:10.1016/j.eti.2021.101798.

16. Stockin KA, Orams MB, Bollard B, Ventre K, Wiseman N, Moore MJ, et al. Fourier transform infrared (FTIR) analysis identifies microplastics in stranded common dolphins (*Delphinus delphis*) from New Zealand waters. *Mar Pollut Bull.* 2021 Dec;173:113084. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.113084>

17. Akdogan Z, Guven B. Microplastics in the environment: A critical review of current understanding and identification of future research needs. *Environ Pollut.* 2019 Nov;254:113011. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113011>

18. Correia Prata J, da Costa JP, Lopes I, Duarte AC, Rocha-Santos T. Environmental exposure to microplastics: An overview on possible human health effects. *Sci Total Environ.* 2020 Feb 1;702:134455. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134455>

19. Rahman A, Sarkar B, Yadav OP, Achari G, Slobodnik J. Potential human health risks due to environmental exposure to nano- and microplastics and knowledge gaps: A scoping review. *Sci Total Environ.* 2021 Mar 1;757:143872. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143872>

20. Habibi N, Kazemi SM, Shams M. Microplastics in the atmosphere: a review. *J Environ Expo Assess.* 2022. <https://doi.org/10.20517/jeea.2021.07>

21. Xie Y, Chen J, Li J, Zhang Y, Guo Y, Zhao Y, et al. Inhalable microplastics prevails in air: Exploring the size detection limit. *Environ Int.* 2022 Mar;162:107151. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107151>

22. Uddin S, Fowler SW, Saeed T, Al-Ghadban AN, Al-Shamroukh D, Zaki N, et al. A preliminary assessment of size-fractionated microplastics in indoor aerosol—Kuwait's baseline. *Toxics.* 2022 Feb;10(2):71. <https://doi.org/10.3390/toxics10020071>

23. Hu K, Gong M, Feng S, Gao S, Zhou J, Zhu L, et al. Emerging microplastics in the environment: Properties, distributions, and impacts. *Chemosphere.* 2022;297:134118. doi:10.1016/j.chemosphere.2022.134118

24. Luo Z, Mai L, Li H, Liu Y, Zhang D, Wong CS, et al. Environmental occurrence, fate, impact, and potential solution of tire microplastics: Similarities and differences with tire wear particles. *Sci Total Environ.* 2021;795:148902. doi:10.1016/j.scitotenv.2021.148902

25. Szewc K, Graca B, Dolega A. Atmospheric deposition of microplastics in the coastal zone: Characteristics and relationship with meteorological factors. *Sci Total Environ.* 2020;143272. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.143272

26. Amato-Lourenço LF, Carvalho-Oliveira R, Júnior GR, dos Santos Galvão L, Ando RA, Mauad T. Airborne microplastics and SARS-CoV-2 in total suspended particles in the area surrounding the largest medical centre in Latin America. *Environ Pollut*. 2022;292:118299. doi:10.1016/j.envpol.2021.118299
27. Ljubimova JY, Braubach O, Patil R, Chumakova A, Chen Z, Kleinman MT, et al. Coarse particulate matter (PM<sub>2.5-10</sub>) in Los Angeles Basin air induces expression of inflammation and cancer biomarkers in rat brains. *Sci Rep*. 2018;8(1):5708. doi:10.1038/s41598-018-23885-3
28. Amato-Lourenço LF, dos Santos Galvão L, de Weger LA, Hiemstra PS, Vijver MG, Mauad T. An emerging class of air pollutants: Potential effects of microplastics to respiratory human health? *Sci Total Environ*. 2020;749:141676. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.141676
29. Abbass RA, Kumar P, El-Gendy A. Car users exposure to particulate matter and gaseous air pollutants in megacity Cairo. *Sustain Cities Soc*. 2020;56:102090. doi:10.1016/j.scs.2020.102090
30. Chen G, Feng Q, Wang J. An overview of analytical methods for detecting microplastics in the atmosphere. *TrAC Trends Anal Chem*. 2020;130:115981. doi:10.1016/j.trac.2020.115981
31. Cooper DM, Loxham M. Particulate matter and the airway epithelium: the special case of the underground? *Eur Respir Rev*. 2019;28(153):190066. doi:10.1183/16000617.0066-2019
32. Attributable burden of disease in Iran from 1990 to 2016. *Environ Pollut*. 2019;255:113173. doi:10.1016/j.envpol.2019.113173.
33. Chen R, Yin P, Meng X, Liu C, Wang L, Xu X, et al. Associations between coarse particulate matter air pollution and cause-specific mortality: a nationwide analysis in 272 Chinese cities. *Environ Health Perspect*. 2019;127(1):017008. doi:10.1289/EHP2711.
34. Bai Y, Sun Q. Fine particulate matter air pollution and atherosclerosis: mechanistic insights. *Biochim Biophys Acta Gen Subj*. 2016;1860(12):2863-8. doi:10.1016/j.bbagen.2016.04.030.
35. Velasquez RMA, Romero YL, Noel J. Citizen science approach for spatiotemporal modelling of air pollution quality and traffic in Lima, Peru. In: 2019 IEEE Sciences and Humanities International Research Conference (SHIRCON). IEEE; 2019. doi:10.1109/SHIRCON48091.2019.9024879.
36. European Respiratory Society. Clean air for healthy lungs – an urgent call to action: European Respiratory Society position on the launch of the WHO 2021 Air Quality Guidelines. *Eur Respir J*. 58(6):2102447. <https://erj.ersjournals.com/content/58/6/2102447>